

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ  
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

**БОЛТАЕВ ГАНЖАБОЙ САПАЕВИЧ**

**ПЛАЗМА ҲОЛАТИДАГИ, ОРГАНИК ВА КЛАСТЕРЛИ  
МУҲИТЛАРНИНГ НОЧИЗИҚЛИ ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

**01.04.11 – Лазер физикаси (физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016 йил**

**Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси**  
**Оглавление автореферата докторской диссертации**  
**Content of the abstract of doctoral dissertation**

Болтаев Ганжабой Сапаевич Плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитларнинг ночизикли оптик хусусиятлари.....	3
Болтаев Ганжабой Сапаевич Нелинейно-оптические свойства плазменных, органических и кластерных сред.....	25
Boltaev Ganjaboy Sapaevich Nonlinear optical properties of plasma, organic and cluster media.....	45
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	63

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ  
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ**

**БОЛТАЕВ ГАНЖАБОЙ САПАЕВИЧ**

**ПЛАЗМА ҲОЛАТИДАГИ, ОРГАНИК ВА КЛАСТЕРЛИ  
МУҲИТЛАРНИНГ НОЧИЗИҚЛИ ОПТИК ХУСУСИЯТЛАРИ**

**01.04.11 – Лазер физикаси (физика-математика фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016 йил**

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 12.05.2015/В2015.1.FM200 рақам билан рўйхатга олинган.

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

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

**Илмий маслаҳатчи:**

**Ганеев Рашид Аширович**  
физика-математика фанлари доктори

**Расмий оппонентлар:**

**Азаматов Зокиржон Тохирович**  
физика-математика фанлари доктори

**Юсупов Джавдат Бакиджонович**  
физика-математика фанлари доктори

**Низамов Немат Низамович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.FM/Т.12.01 рақамли илмий кенгашнинг 2016 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, email: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

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

Диссертация автореферати 2016 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2016 йил \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**С.Л. Лутпуллаев**

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

**А.В. Каримов**

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

**С.А. Бахромов**

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

## **Кириш (Докторлик диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда жаҳонда лазер технологияси ва ночизикли оптиканинг ривожланишида муҳим муаммо бу плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитларда ультрақисқа лазер импульслари тарқалишида юзага келувчи жараёнлар ва турли тартибдаги оптик ночизиклиликларнинг тадқиқотларидир. Мазкур тадқиқотлар фан ва техниканинг турли соҳаларида янги материаллар яратиш, телекоммуникация ва информатика, метрология, сигналларни узатиш ва қайта ишлаш, тиббиёт, ген инженерлиги ва шу каби бошқа кўплаб соҳаларда ночизикли оптик эффектларга асосланган янги материаллар ва қурилмаларни яратишда устувор ҳисобланади.

Наноматериалларни турли соҳалардаги татбиқлари аниқ спектрал ва вақтий диапазонларда оптик ва ночизикли оптик параметрлари ва механизмларни ўрганишни талаб қилади. Нанозарралар ва углерод асосли муҳитларда оптик Керр эффектига асосланган синдириш кўрсаткичининг ночизикли ўзгариши, кўп фотонли ўтишлар натижасидаги ночизикли ютилиш ёки тўйишниш ютилиш ва тесқари тўйиниш ютилиш сингари ночизикли оптик жараёнларнинг етарлича қизиқишни ўзига жалб қилади. Охири келтирилган жараёнлар релаксация вақтига боғлиқ ҳолда бу каби нанозаррачаларнинг лазер физикасида ультрақисқа импульслар генерацияларида модалар пассив синхронизацияси учун муҳим сифатида фойдаланишда ҳал қилувчи аҳамиятга эга. Ультрабинафша ва юмшоқ рентген, яъни тўғридан-тўғри лазер нурланишлари генерациялари мавжуд бўлмаган соҳаларда ультрақисқа лазер импульслари частоталарини алмаштириш жараёнлари тадқиқотлари ҳам долзарб ҳисобланади.

Наноструктурали материалларни олиш учун лазер аблиция усули ва плазма ҳолатидаги муҳитларда юқори гармоника генерациялари усулларини ривожлантириш, бундан ташқари, юқори ночизиклиликка эга материалларда энергия алмаштириш самарадорлиги ортириш ҳам диссертация мавзуси билан боғлиқ тадқиқотнинг заруратини ифодалайди. Бундан ташқари, наноматериаллар ночизиклилиги таҳлили бўйича олинган тажриба натижалари лазер физикаси ва ночизикли оптика соҳаларида муҳим муаммо металл наноструктуралари асосида юқори самарали ночизикли элементлар яратиш жуда муҳим ҳисобланади.

Ривожланган мамлакатларда ҳудудий-территориал автоматлашган бошқариш системаларини ривожлантириш ва ягона информацион бўшлиқни яратиш бўйича амалга оширилаётган комплекс чора-тадбирлар ахборот коммуникация технологиялари асосида информацион системаларни кенг татбиқ қилишга йўналтирилган. Шу сабабдан, плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитларда ультрақисқа лазер импульслари тарқалишида юзага келувчи ночизикли оптик жараёнларнинг хусусиятларини таҳлил қилиш ва аниқлаш фан ва техниканинг бир бирига боғлиқ бўлган ва лазер физикаси ва ночизикли оптика соҳалари ривожини таъминловчи устувор йўналишларидан бири бўлиб қолмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442 – сонли «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарорида белги-ланган вазифаларни муайян даражада амалга оширишда мазкур диссертация тадқиқоти хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши-нинг устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг Ф2 «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» асосий устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шархи.** Ультрақисқа лазер импульсларининг плазма ҳолатдаги органик ва кластерли муҳитларда тарқалишида юзага келувчи ночизиқли оптик жараёнларнинг тадқиқотлари етакчи мамлакатларнинг илмий марказлари, университет ва илмий-тадқиқот институтларида, жумладан Вильгельм Вестфалиш универси-тети (Мюнстер, Германия), Токио университетнинг қаттиқ жисм физикаси институти (Кашива, Япония), Ража Раман номидаги илғор технологиялар маркази (Индор, Ҳиндистон), Империя коллежи (Лондон, Буюк Британия), Рокасолано физика-кимё институти (Мадрид, Испания), Илмий тадқиқотлар миллий институти (Монреал, Канада), Умумий физика институти (Москва, Россия) ва дунёнинг бошқа мамлакатларидаги илмий марказларда олиб бо-рилмоқда.

Жаҳон миқёсида бир қанча долзарб масалалар ечилган бўлиб, жумладан, қуйидаги илмий натижалар олинган: вакуум шароитида кумуш, қалай ва олтин наноструктуралари шаклланишида ушбу материалларнинг ўлчамлари ўттиз нанометрдан уч юз нанометргача бўлган нанозарралари олинган; платина нанозарралари эритмаларининг тўлқин узунлиги 1054 нанометр бўлган лазер нурланиши учун пассив модулятор сифатида қўллаш таклиф этилган; тўлқин узунлиги 792 нанометр бўлган нурланишда олтин, палладий, рутений ва платина нанозарраларида турли тартибли ночизиқ-лилик аниқланган.

Бугунги кунда нанозарралар, углерод таркибли органик суюқликлар ва қаттиқ жисм юзасида ҳосил қилинувчи лазер плазмаси сингари муҳитлар ночизиқли оптика ва лазер физикасида кенг қўлланилмоқда. Шулардан келиб чиққан ҳолда, ўта қисқа ёруғлик импульслари майдонида материаллар но-чизиқли оптик хусусиятларини илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Металл нанозарралари эритмаларининг ночизиқли оптик параметрлари таҳлили Ҳиндистон олим-лари Mehendale S. C., Mishra S. R. томонидан импульс давомийлиги нано-секунд бўлган паст қувватга эга ёруғлик майдонларида олиб борилган. Бунда нанозарралар коллоид эритмаларидаги ночизиқли оптик жавоблар иссиқлик ночизиқлилигига асосланган.

Россиялик олимлар А.Б. Федотов, С.М. Гладковлар ўзларининг бир қатор ишларида плазма муҳитларида лазер нурланиши тарқалишида паст ва юқори гармоника генерацияларини тадқиқ этган. Ушбу тадқиқотларда қаттиқ

жисм материаллари юзаларида лазер абляцияси жараёнида ҳосил қилинган плазма параметрларини оптималлаштириш кераклиги ҳақида айтиб ўтилган. Бироқ, лазер нурланиши энергиясини гармоника энергиясига алмаштириш самарадорлигининг кутилган қийматлари олинмаган. Кучли уйғотилган ва юқори температурага эга плазмалардан фойдаланилганда нурланиш частоталарни алмаштириш самарадорлиги шароитлари ёмонлашиши рўй беради ва юқори тартибли гармоникалар олишга имкон бермайди.

Ўзбекистонлик олимлар, жумладан Ганеев Р.А., Кулагин И.А., Усманов Т.Б., пленка кўринишидаги ва ион имплантация усули билан шишага киритилган металл нанозарраларининг ночизикли оптик хусусиятлари таҳлили олиб борилган, бундан ташқари юқори гармоника генерациялари бўйича тадқиқотлар кучли ионлашган плазмалардан фойдаланган ҳолда олиб борилган. Тадқиқотларда юқори гармоника генерациялари бўйича лазер нурланиши алмаштириш самарадорликларининг нисбатан паст қийматлари олинган. Суст ионлашган плазмалардан фойдаланилганда энергия алмашилиш самарадорликлари ортиши бўйича тадқиқотлар ва резонанс шароитларда алоҳида гармоника самарадорликлар ортиши ўрганилмаганлигини кузатиш мумкин.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган илмий-тадқиқот муассасаси илмий ишлари билан боғлиқлиги:** Илмий тадқиқот ишлари Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг ФА-Ф2-Ф049 «Вакуум ультрабинафша соҳасида юқори гармоникалар генерацияси ва моддаларнинг ночизикли оптик хусусиятларини ўрганиш (2007-2011), Ф2-ФА-Ф160 «Чирпирланган лазер импульсларини оптик параметрик кучайтириш ва фемтосекунд давомийликдаги нурланишнинг моддалар билан ночизикли ўзаро таъсири тадқиқоти ўрганиш» (2012-2016), ривожланаётган давлатлар фанини ривожлантириш бўйича дунё фанлари академияси халқаро грантлари дастурлари (TWAS Research Grants) (09-113 RG/PHYS/AS\_G - UNESCO FR:3240232129) «High order harmonic generation of laser radiation in plasma using picosecond laser pulses» (2010-2012) ва (12-040 RG/PHYS/AS\_G - UNESCO FR:3240271323) «High-order harmonic generation of picosecond radiation in laser-produced plasma in the extreme ultraviolet range» (2012-2014), бундан ташқари, Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Фан ва Технологияларни Ривожлантиришни Мувофиқлаштириш Қўмитаси № М/РУ-ФРГ - 69/2013 «Даврий плазма структураларида лазер нурланишининг юқори гармоника генерациялари» (2013-2015) мавзусидаги тадқиқотлар таркибий қисмига киритилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитлар ультракисқа лазер импульслари тарқалишида юзага келувчи ночизикли оптик жараёнларни ўрганишдан иборат.

Белгиланган мақсадга эришиш учун куйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

ташқи инерт газларнинг турли босимлари остида ва суюқликлардаги лазерли абляция жараёнида металл нанозаррачалар шаклланиш қонуниятларини ўрганиш;

металл кластерлари суспензияларидаги ночизикли оптик жараёнлар самарадорлигига пикосекунд лазер нурланиши параметрларининг таъсирини тадқиқ қилиш;

фуллеренларнинг ночизикли оптик параметрларини тажрибада аниқлаш ва  $C_{60}$  фуллеренининг толуолдаги эритмасида оптик чекланишини таҳлил қилиш;

органик материалларда қувватли лазер нурланиши тарқалиши жараёнига керр ночизиклиги таъсирини ва икки фотонли ютилишни тадқиқ қилиш;

лазер абляция жараёнида қаттиқ жисм нишонлари юзасида ҳосил қилинган лазер плазма ҳолатидаги муҳитларда оптик гармоникалар генерацияларининг оптимал шароитларини аниқлаш;

квазисинхронизм шароитида юқори гармоника генерациялари самарадорликларини ошириш учун кўп струяли лазер плазмаларини ҳосил қилиш методикасини такомиллаштириш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида органик ва ноорганик моддаларнинг нанозарралари, плазма ҳолатидаги муҳитлар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** интенсив лазер майдонларининг моддалар билан ночизикли ўзаро таъсирдан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертацияда муҳитларни Z-сканлаш усули, лазер нурланиши оптик гармоникалар генерацияси, лазер абляция усули ва электрон микроскопия усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

ташқаридан киритилувчи инерт газларнинг турли босимлари остида металллар лазер абляцияси жараёнида металл кластерлари шаклланиши ўрганилган ва нанозарралар шаклланиши мумкин бўлган турли газлар босимларининг чегаравий қийматлари топилган;

лазер абляция жараёнида металл нанозарралари шаклланиши жараёнларининг лазер импульслари интенсивликлари ва давомийликларига боғлиқлиги аниқланган. Ўлчамлари 20 ва 60 нм бўлган кумуш ва мис нанозарраларидан ташкил топган наноматериаллар олинган;

тўлқин узунлиги 1064 ва 532 нм ва давомийлиги 50 пс бўлган импульслар интенсивликларининг  $I = 9 \times 10^9 \div 1,7 \times 10^{10} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  соҳаларида Pd, Ru, Au и Mn нанозарралари суспензияларининг ночизикли рефракция ва ночизикли ютилиш коэффициентлари аниқланган. Олтин нанозарралари эритмаларида Nd:YAG лазери иккинчи гармоникаси (тўлқин узунлиги  $\lambda_{2\omega} = 532 \text{ нм}$ ) частотасининг юзавий плазмон резонанс частотаси (тўлқин узунлиги  $\lambda_p \sim 530 \text{ нм}$ ) билан мос келиши ночизикли тўйиниш ютилиш коэффициенти ортишига олиб келиши аниқланган;

$C_{60}$  толуолдаги эритмасида қувватли лазер импульсларининг оптик чекланиши асосида сенсорлар учун ҳимояловчи қурилмалар яратиш имкониятлари очиб берилган. Лазер нурланиши интенсивлиги ортиши билан глицеринда иккифотонли ютилиш ва тўйиниш ютилишга асосланган

ночизикли ютилиш коэффиценти ишорасининг ўзгариш динамикаси кўрсатилган;

углерод асосли материаллар плазмаларида керр ночизиклига ҳисобига 7-чи гармоника самарадорлигининг 5-чи гармоника самарадорлигига нисбатан ортиши аниқланган;

алюминий нишонлари юзаларини қайта ишлаш асосида лазер нурланиши юқори гармоникаларининг квазисинхрон генерациялари учун даврий лазер плазмалари ҳосил қилиш методикаси ишлаб чиқилган. Даври 0,15 мм дан 0,5 мм гача ўзгарувчи даврий структуравий плазмалар олиш имкониятлари кўрсатилган. Текис плазмаларга нисбатан даври 0,15 мм бўлган структуравий плазмада учинчи гармоника генерацияси интенсивлигининг 8 марта ортиши аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси.** Вакуум ва суюқликлардаги турли металлларнинг лазерли абляция жараёнида уларнинг нанозарраларидан ташкил топган юпка пленка ва эритмалари олинган. Металл нанозарралари эритмаларининг, органик материалларнинг ва фуллерен эритмаларининг ночизикли ютилиш коэффиценти ва синдириш кўрсаткичларининг қийматлари муҳитларни Z-сканлаш усули билан ўлчанган. Вакуум ультрабинафша соҳасида когерент ёруғлик манбалари олиш спектрал диапазонини кенгайтирувчи лазер плазмаси факелида пикосекунд давомийликка эга лазер нурланишининг самарали юқори гармоника генерациялари имкониятлари кўрсатилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** муҳитларни автоматлаштирилган Z-сканлаш схемалари калибровка қилиш ночизикли оптик параметрлари бошқа тадқиқотлар муаллифлари томонидан олинган натижаларга зид эмаслиги ва уларнинг асосий назарий ҳолати билан мос келиши билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг назарий аҳамияти лазер абляция усулидан фойдаланиш кумуш, мис ва марганец нанозарралари асосида ночизикли оптик материалларни синтез қилиш ва пикосекунд давомийликка эга лазер импульслари майдонида юқори қийматли ночизикли оптик параметрлар билан характерланувчи материаллар олиш имконини беради.

Диссертация натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, фуллерен эритмаларида иккифотонли ютилишнинг мавжудлиги туфайли, улардан лазер нурланишини чекловчи эффектив оптик элементлар яратишда фойдаланиш ва муҳитдаги алоҳида гармоникалар генерацияси самарадорлиги ошишини таъминловчи резонанс шароит вакуум ультрабинафша соҳасидаги когерент импульсларнинг энергетик қийматлари характеристикаларининг сезиларли даражада оширишдан иборат.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Диссертацияда ривожлантирилган органик ва ноорганик моддаларнинг ночизикли оптик параметрларини таҳлил қилиш самарадорлигини ўн марта оширувчи юзаларда кўп струяли плазмалар ҳосил қилиш усуллари Япониянинг Фан

ривожига кўмаклашувчи жамияти томонидан рағбатлантирувчи «Турли материаллар ва техникаларнинг биотиббидеги нозикли оптик қўлланишлари» мавзусидаги илмий тадқиқот лойиҳасини бажаришда қўлланилган (JSPS KAKENHI, №24760048 сонли гранти, Саитама тиббидеги университети қошидаги Илғор тиббидеги лазерлар ва офтальмология маркази маълумотномаси, 17.04.2015, Япония).

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация натижалари қуйидаги халқаро ва республика миқёсидаги илмий анжуман ва симпозиумларда: «Инновацион технологиялар ривожидеги олимлар нигоҳида» илмий анжуманида, ЎЗМУ, (Ташкент, 2010); «Лазер оптикиси» бўйича халқаро конференцияда (Санкт-Петербург, 2012); «Когерент ва нозикли оптика» бўйича халқаро конференцияда (Казань, 2010; Москва 2013); «Нанотехнология» ва қайта тикланадиган энергия манбалари муаммолар ва ечимлар республика илмий-амалий анжуманида (Қарши, 2012); Талабалар, аспирантлар ва ёш олимлар учун фундаментал фанлар бўйича «Ломоносов-2012» халқаро конференцияда (Москва, 2012); «Физик электрониканинг долзарб муаммолари» мавзусидаги халқаро анжуманида (UzPES-6 ва IPES-6 Ташкент, 2012 ва 2013); «Илм-фан тараққидеги ва иқтисодидеги инновацион ривожлантириш» мавзусидаги республика илмий-амалий анжуманида (ЎЗРФА, Ташкент, 2012); Молекуляр спектроскопия бўйича IV халқаро конференцияда (Самарқанд, 2013); «ОПТИКА ВА ФОТОНИКА-2013» халқаро анжуманида (Самарқанд, 2013); TWASROCASA, Regional conference for young scientists «Nanoscience & Nanomaterials» (Бангалор, Ҳиндистон, 2015); Ион-плазма ва лазер технологиялари бирлашган семинарларида (15.04.15), ва бундан ташқари Физика техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.FM/T.12.01 рақамли илмий кенгашининг бир марталик семинарида апробациядан ўтказилган (19.06.2016).

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 29 та илмий иш нашр этирилган, жумладан, 14 та илмий мақола нуфузли халқаро илмий журналларда ҳамда 15 та тезис халқаро ва республика конференциялар тўпламларида чоп этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тuzилиши.** Диссертация кириш, 5 та боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 191 саҳифадан иборат матн, 67 та расм ва 3 та жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

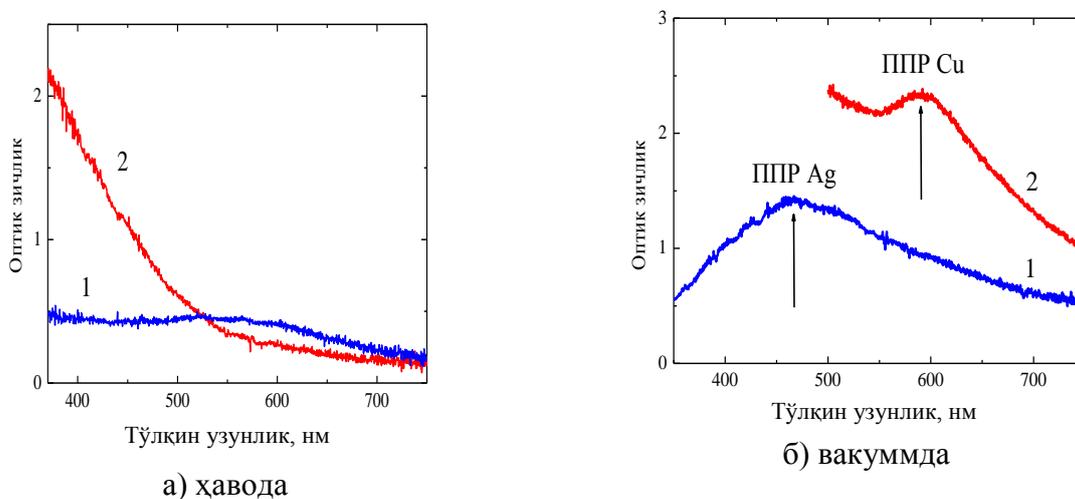
**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари ҳамда объект ва предметлари тавсифланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққидеги устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиёт-

га жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг биринчи боби «**Плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитларда ночизиклилик бўйича тадқиқотлар шарҳи ва ҳолати**»да плазма ҳолатидаги, органик ва кластерли муҳитларнинг ночизикли оптик хусусиятлари ва бундан ташқари плазма, металл кластерлари ва органик материалларнинг ночизикли оптик хусусиятлари муаммоларининг ҳолатлари бўйича адабиётлар маълумотлари таҳлил қилинган.

Диссертациянинг иккинчи боби «**Нанозарраларнинг асосий хусусиятлари ва тайёрлаш усуллари**»да пикосекунд давомийликка эга лазер импульслари билан лазер абляция жараёнида металллар нанозарралари шаклланиши ташқаридан киритилаётган инерт газларининг концентрацияга боғлиқлиги бўйича тадқиқот натижалари келтирилган. Электрон микроскоп ёрдамида нанозарраларнинг ўлчамига оид характеристикалари таҳлил қилинган. Металл нанозарраларининг шаклланишини абляция жараёни давомида материаллар юзасида буғланган ва учиб чиқаётган моддалар электрон газларининг тезкор уйғотилиши ва ўзларининг уйғониш энергияларини атом ячейкаларига узатиши ва кейинчалик уларнинг бирикиш жараёнлари сифатида келтириш мумкин.

Спектрал ўлчаш натижалари асосида шиша тагликлар юзасига учирилган моддалар ютилиш спектрларидаги юзавий плазмон резонанслар мавжудлигини кўрсатилди (1-расмга қаранг).

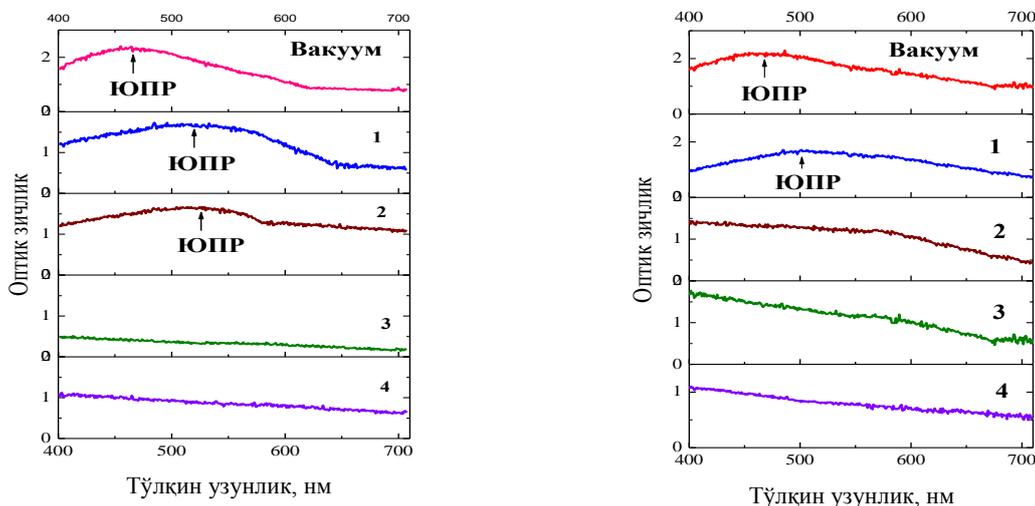


1 – кумуш; 2 – мис

**1 - расм. Турли шароитларда шиша таглик юзасига учирилган юққа металл пленкасининг ютилиш спектри**

Вакуум шароитида шиша таглик юзасида шаклланган металл нанозарраларнинг электрон микроскоп ёрдамида олинган микрофотографиялари шаклланган кластерларнинг тақсимотлари бир текис эканлигини кўрсатди. Нанозарраларнинг мавжудлигини намуналар ютилиш спектрларида кузатилган юзавий плазмон резонанслар пайдо бўлиши билан ҳам тасдиқлаш мумкин. Бобнинг якунида кумуш металллар кластерлари шаклланиши эҳтимолликлари билан намуналар тайёрланаётган камерага киритилган инерт газлар концентрациялари орасида кучли боғлиқлик мавжудлиги кўрсатилди.

Лазер абляцияси камерасига киритилаётган инерт газларнинг турли босимларда металл кластерлари шаклланиши илк маротаба таҳлил қилиниб, гелий ва ксенон газлари босимларининг (33 ва 12 торр) чегаравий қийматлари аниқланди. Газлар босимларининг кейинги оширилиши нанозарралар шаклланиш эҳтимолликларининг камайишини кўрсатди ва бу натижалар олинган ютилиш спектрларида юзавий плазмон резонанс пиклари мавжуд эмаслигида ўз аксини топган (2-расмга қаранг).



1 – 11 торр; 2 – 33 торр; 3 – 87 торр;  
4 – 136 торр  
а) гелий газида

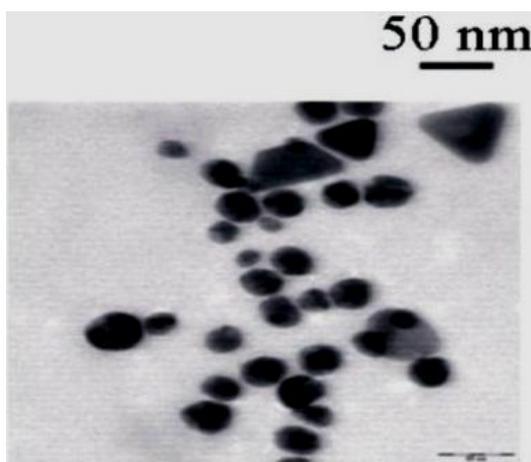
1 – 12 торр; 2 – 26 торр; 3 – 101 торр;  
4 – 285 торр  
б) ксенон газида

**2 - расм. Вакуум шароитида ва камерага киритилган инерт газларнинг турли босимларида юпқа кумуш пленкасининг ютилиш спектри**

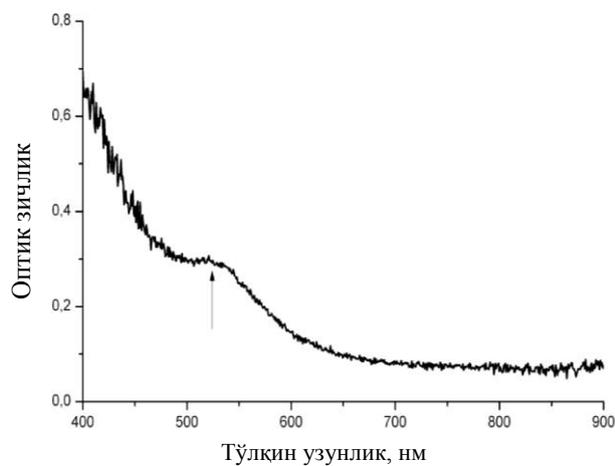
Диссертациянинг учинчи боби «Турли металллар нанозарраларининг ночизикли оптик характеристикалари ўзига хослиги»да рутений, палладий, олтин ва марганец каби металл нанозарралари эритмаларининг ночизикли оптик характеристикаларининг муҳитларни Z - сканлаш усули ёрдамида ўлчанган натижалари келтирилган.

Бунда эритмаларнинг дастлабки концентрациялари олтин учун 10 миллимоль ва палладий ва рутений учун эса 20 миллимолга тенг. Тажрибада эритмадаги палладий  $2 \times 10^{-4}$ , рутений  $4 \times 10^{-4}$  ва олтин нанозарраларнинг  $2 \times 10^{-4}$  га тенг ҳажмий муносабатларидан фойдаланилди. Эритмаларнинг бундай концентрациялар учун олинган чизикли ютилиш спектрларида аҳамиятли юзавий плазмон резонанслар пиклари кузатилди. Нанозаррлар ўлчамларини ва уларнинг морфологиясини ўрганишда электрон микроскопия усулидан фойдаланилди. Эритмаларнинг спектрал характеристикалари USB-2000 спектрометридан фойдаланган ҳолда ўрганилди. Спектрал тадқиқотлар учун намуналар 3 мм қалинликдаги шаффоф кварц кюветаларда тайёрланди. Баъзи эритмалардаги нанозарраларнинг ўзаро бирикишининг олдини олиш мақсадида поливинил пирролидон ва полиэтиленимин сингари кимёвий суюқликлар қўшилди. Бу суспензияларда эритувчи суюқлик сифатида дистилланган сув, этанол ва *n*-пропанолдан фойдаланилди. 3-расмда олтин

нанозарралари эритмасининг микрофотографияси келтирилган. Бунда олтин нанозарралари ўртача  $15 \div 30$  нм ўлчамга эга эканлиги аниқланди. Рутений ва палладий нанозарралари мос равишда 3,4 нм ва 2,5 нм ўлчамларга эга эканлиги аниқланди. Эритмада олтин нанозарралари, асосан, сфера шаклига ва баъзи бир ҳолатларда эса учбурчак шаклига эга эканликлари ўрнатилди. 4-расмда олтин нанозарралари эритмаларининг ютилиш спектри келтирилган. Бунда юзавий плазмон резонанслари пиклари 530 нм тўлқин узунлигига мос келиши кузатилди ва бу 30 нм ўлчамга эга бўлган олтин нанозарралари учун характерлидир. Палладий ва рутений нанозарралари эритмалари спектрларидаги юзавий плазмон резонанслари пиклари 305 ва 240 нм тўлқин узунлигига мос келиши кузатилди.



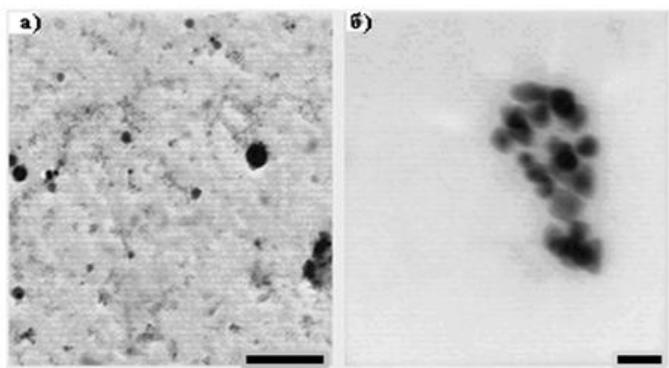
**3 - расм. Олтин нанозарраларининг микрофотографияси**



**4 - расм. 3 мм қалинликдаги кварц кюветага солинган олтин нанозарралари эритмасининг ютилиш спектри**

Марганец нанозарралари эритмалари марганец қаттиқ жисмининг суюқликдаги лазер аблицияси жараёнида тайёрланди. Марганец нанозарралари эритмасини тайёрлашда пассив синхронизация режимида ишловчи Nd:YAG лазеридан фойдаланилди. Лазер импульсининг давомийлиги 50 пс га тенг бўлиб, лазер ишчи частотаси эса 2 Гц. Марганец қаттиқ жисм намунаси кварц кювета ичига жойлаштирилиб, кюветага этанол ёки бошқа турдаги органик суюқлик солинди. Кювета ичидаги намуна юзасига энергияси  $E = 3$  мДж бўлган лазер нурланиши фокус масофаси 8 см бўлган йиғувчи линза ёрдамида фокусланди. Бунда намуна кюветанинг лазер нурланиши кириши томонидаги деворни тешишини олдини олиш мақсадида, унга тескари бўлган томонига яқин қилиб жойлаштирилди. Намунани 30 дақиқа давомида лазер импульслари билан нурлантирилди. Лазер аблицияси жараёни натижасида марганец нанозарралари суюқ муҳитда шаклланди. Тайёрланиш жараёнида марганец нанозарраларининг эритмадаги ҳажмий улуши  $2 \times 10^{-4}$  га тенг. 5-расмда марганец нанозарраларининг микрофотографияси келтирилган. Эритмада шаклланган марганец нанозарралари дастлаб сфера шаклига эга бўлган кейинчалик эса учбурчак ва тўртбурчак шаклига эга нанозарралар пайдо бўлиши кузатилди.

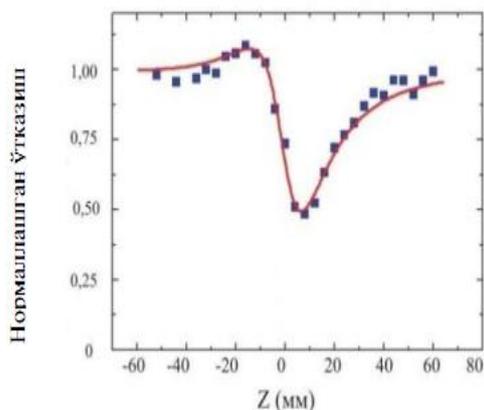
Тайёрланган эритмада нанозарралар ўлчамлари 6 нм дан 50 нм оралиғида эканлиги аниқланди (5а-расмга қаранг). Орадан 15 сутка ўтгандан кейин нанозарраларнинг ўлчамлари бўйича тақсимооти 7÷14 нм оралиғига тўғри келди (5б-расмга қаранг). Нанозарралар тақсимоотининг бу каби ўзгаришлари гравитацион кучлар таъсирида нисбатан ўлчамлари катта бўлган зарраларнинг чўкиши, суюқликнинг юқори сатҳларида эса суюқликнинг сирт таранглик кучлари таъсири сабаб чўкмага тушмаган, ўлчами нисбатан кичик бўлган нанозарралар кузатилди.



а – тайёрлангандан кейинги ва б – икки ҳафта ўтгандан кейинги тасвирлар. Тасвирнинг пастки ўнг бурчагида тасвир масштаби келтирилган: а – 200 нм; б – 50 нм

**5 - расм. Марганец нанозарралари микрофотографияси**

Металл нанозарралари намуналарнинг пикосекунд давомийликка эга лазер нурланишларининг иккита тўлқин узунлиги учун муҳитларни Z-сканлаш усули ёрдамидаги систематик тадқиқотлари шуни кўрсатдики, лазер

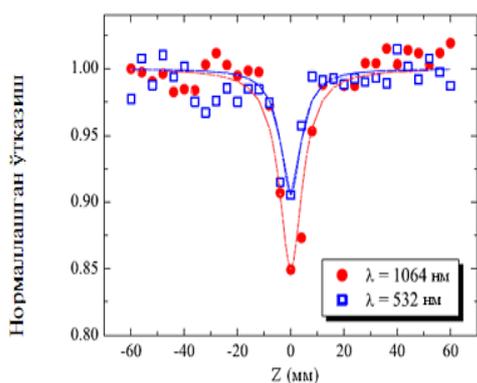


**6 - расм. Палладий нанозарралари эритмалари солинган кювета ҳолати ва нормаллашган ўтказиши орасидаги боғланиш**

расмда палладий нанозарралари эритмалари солинган кювета ҳолати ва нормаллашган ўтказиши орасидаги боғланиш келтирилган.

Ау нанозарралари учун юзавий плазмон резонанслар тўлқин узунлиги ( $\lambda_p \sim 530$  нм) Nd:YAG лазери иккинчи гармоникаси тўлқин узунлиги ( $\lambda_{2\omega} = 532$  нм) билан деярли мос келиши, бу намунада етарли даражада юқори ночизиқли жавобининг вужудга келишига олиб келди. Ўлчашлар бу намунада тўйиниш интенсивлиги ва тўйиниш ютилиш коэффициенти  $9 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> ва  $8 \times 10^{-13}$  м·Вт<sup>-1</sup> га тенг эканлигини кўрсатди. Бу каби ночизиқли оптик жавоб-

нинг сезиларли ортишини Pd ва Ru нанозарраларида қисқа тўлқин узунликли спектрал соҳада рўй бериши мумкинлиги таъкидланди (масалан, Nd:YAG лазерининг тўртинчи гармоникаси генерацияси тўлқин узунлигида,  $\lambda_{4\omega} = 266$  нм). Шунини ҳам таъкидлаш жоизки, ушбу спектрал соҳада эритувчи сифатида ишлатилувчи этанол ёки мазкур юзавий-фаол моддаларда кучли чизикли ютилиш мавжуд. Pd ва Ru нанозарралари учун юзавий плазмон резонанслар таъсирининг пайдо бўлиши ультрабинафша соҳасидаги чизикли ютилиш билан қопланиши мумкин. Шунингдек, тажрибада паст энергетик (1,17 эВ энергияли) зондловчи фотонлар билан ўрганилган Pd ва Ru нанозарралари сезиларли ночизикли рефракция ( $\gamma_{Pd} = -1.2 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ , ва  $\gamma_{Ru} = -3 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) ва ночизикли ютилиш коэффициентига ( $\beta_{Pd} = 4 \times 10^{-13} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$  ва



**7 - расм. Марганец нанозарралари эритмалари солинган кювета ҳолати ва нормаллашган ўтказиши орасидаги боғланиш**

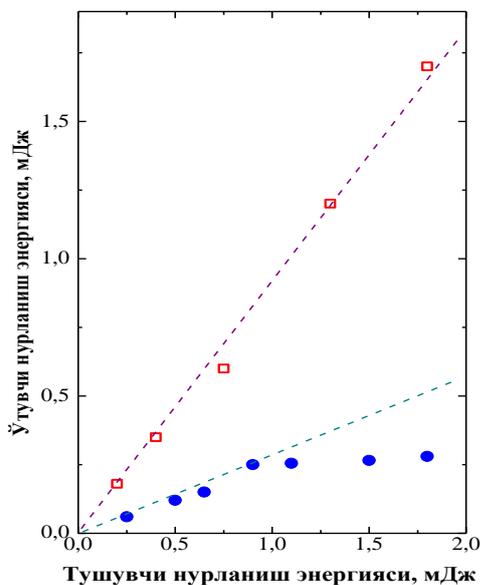
$\beta_{Ru} = 8 \times 10^{-14} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) эга эканлигини таъкидлаш лозим. Марганец нанозарраларининг спиртдаги эритмасининг ночизикли оптик параметрлари муҳитларни Z-сканлаш усули ёрдамида тадқиқ қилинган.

Марганец нанозарралари эритмаларида лазер нурланишининг 1064 ва 532 нм тўлқин узунликларида юзага келувчи ўз-ўзини фокуслаш жараёни оптик Керр эффекти натижаси ҳисобланади, бу вақтда кузатилувчи ночизикли ютилиш эффекти эса иккифотонли ютилиш

ва тескари тўйиниш ютилиши билан боғлиги тажрибаларда кўрсатилди (7-расмга қаранг). Марганец нанозарралари эритмаларида ночизикли жараёнларни ўрганиш асосида қуйидаги параметрлар аниқланди: тўлқин узунлиги 1064 нм бўлган лазер нурланиши учун ночизикли синдириш коэффициенти ( $\gamma = 8 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) ва ночизикли ютилиш коэффициенти ( $\beta = 2 \times 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) ва тўлқин узунлиги 532 нм бўлган лазер нурланиши учун ночизикли синдириш коэффициенти ( $\gamma = 2 \times 10^{-18} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) ва ночизикли ютилиш коэффициенти ( $\beta = 4 \times 10^{-13} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ). Тадқиқ этилган намуналарда қувватли электромагнит тўлқинларнинг тарқалишида юзага келувчи жараёнларининг муҳимлари, бу муҳит синдириш кўрсаткичининг ночизикли ўзгариши ва нурланишининг ночизикли ютилиш жараёнлари эканлиги таъкидланди.

Диссертациянинг тўртинчи боби «Углерод таркибли материалларнинг ночизикли оптик характеристикалари»да таркибида фуллерен ( $C_{60}$ ) мавжуд муҳитларнинг ночизикли оптик характеристикаларини аниқлаш бўйича олинган натижалар қаралган,  $C_{60}$  фуллеренлар толуолдаги эритмаларининг ночизикли ютилиш коэффициентини Nd:YAG лазерининг 1064 нм ва 532 нм тўлқин узунликдаги нурланишидан фойдаланган ҳолда ўлчанган натижалари муҳокама қилинган. Бу тажрибаларда давомийлиги 50 пс, тўлқин узунлиги 532 нм бўлган лазер нурланиши таъсирида ночизикли ютилиш

коэффициентининг тўлқин узунлиги 1064 нм бўлган нурланиш таъсирига нисбатан 25 баробар ошиши кўрсатилди.



● - C<sub>60</sub> фуллереннинг толуолдаги эритмаси,  
 □ - соф толуол

**8 - расм. Эритмадан ўтувчи нурланиш энергиясининг тушувчи нурланиш энергиясига нисбатан ўзгариши**

кейинги оширилган қийматларда эса ўзгармасдан қолиши кўрсатилган. Эритмада кузатилаётган ёруғлик нурланишининг оптик чекланиши кучли лазер нурланиши таъсирида юзага келувчи ночизикли ютилиш билан мос эканлиги кўрсатилди. Турли органик материалларнинг ночизикли оптик хусусиятлари инфрақизил ва кўзга кўринувчи нурланиш соҳаларида муҳитларни Z-сканлаш усули билан амалга оширилди. Тажрибаларда ўрганилган кўпгина намуналар ночизикли ютилишга эга эканлиги ва айна пайтда, баъзи бир намуналарда эса кучли тўйинган ютилиш ва ночизикли рефракция эффектлари намоён бўлиши билан боғлиқ эффектлар кўрсатилди. Намуналар ичида глицерин моддасида тушувчи лазер нурланиши интенсивлиги ва намунанинг қалинлиги ортиши билан ночизикли ютилиш коэффициенти ишорасининг ўзгариши (мусбат ва манфий) кузатилди (9-расмга қаранг).

Умумий ҳолатда ютилиш коэффициенти билан лазер нурланиш интенсивлиги орасида қуйидагича боғланиш келтирилади:

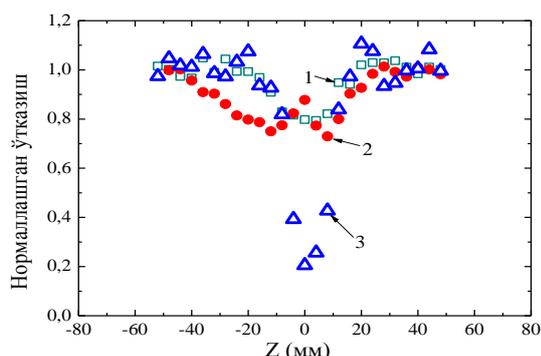
$$\alpha(I) = \alpha_0 + \beta \cdot I \quad (1)$$

бу ерда  $\alpha_0$  – чизикли ютилиш коэффициенти;  $\beta$  – ночизикли ютилиш коэффициенти, у муҳитнинг тўйинган ютилиш ҳолатида манфий қийматга эга бўлади. Тўйинган ютилишни тушунтиришда турли моделлар мавжуд. Бир жинсли бўлмаган кенгайиш ҳолатларига эга икки энергетик сатҳли системалар учун ютилиш коэффициентини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{\text{тўйин}}]^{-0,5}, \quad (2)$$

Ушбу параметрнинг тўлқин узунлиги 532 нм лазер нурланиши таъсирида ошиши текширилаётган намуналарда кузатиловчи тескари тўйинган ютилиш ва икки фотонли ютилиш натижаси сифатида қараш мумкин.

8-расмда тўлқин узунлиги 532 нм бўлган лазер нурланишининг C<sub>60</sub> фуллерен толуолдаги эритмасида оптик чекланиши бўйича олинган тажриба натижалари келтирилган. Бунда эритма орқали ўтувчи пикосекунд давомийликка эга лазер нурланиш энергиясининг тушувчи лазер нурланиш энергияси (E) га нисбатан ўзгариши кўрсатилган. Эритманинг лазер нурланишини ўтказиш коэффициенти тушувчи нурланиш энергиясининг E = 0.85 мДж гача (ёруғлик оқими 0.1 Дж·см<sup>-2</sup> га тенг) бўлган қийматларида чизикли ўзгариши ва



- 1 –  $\lambda = 1064$  нм,  $I = 3 \times 10^{10}$  Вт·см<sup>-2</sup>;
- 2 –  $\lambda = 1064$  нм,  $I = 8 \times 10^{10}$  Вт·см<sup>-2</sup>;
- 3 –  $\lambda = 532$  нм,  $I = 2 \times 10^{10}$  Вт·см<sup>-2</sup>

**9 - расм. Лазер нурланишининг турли тўлқин узунликлари ва интенсивлигида глицерин солинган кювета ҳолати ва нормаллашган ўтказиши орасидаги боғлиқлиги**

бу ерда  $I(z)$  – намуна орқали ўтувчи нурланиш интенсивлиги;  $I_{тўйин}$  – муҳитнинг тўйиниш интенсивлиги. Қуйидаги (“кинетик”) модель асосий ҳолатдаги атомлар сонининг камайишида тўйинган ютилишни таърифлаш учун ишлатилади:

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{тўйин}]^{-1}. \quad (3)$$

Ўрганилган намуналарда аниқланган ночизикли рефракция ва ночизикли ютилиш коэффициентлари қийматлари катталиги бўйича ноорганик материаллар параметрларидан ошмаслиги кўрсатилади. 1-жадвалда бу намуналарнинг тажрибада аниқланган ночизикли оптик ютилиш коэффициенти ( $\beta_{ню}$ ), тўйинган ютилиш коэффициенти ( $\beta_{тўйин}$ ) ва ночизикли синдириш кўрсаткичларининг қийматлари келтирилган.

**1-жадвал**

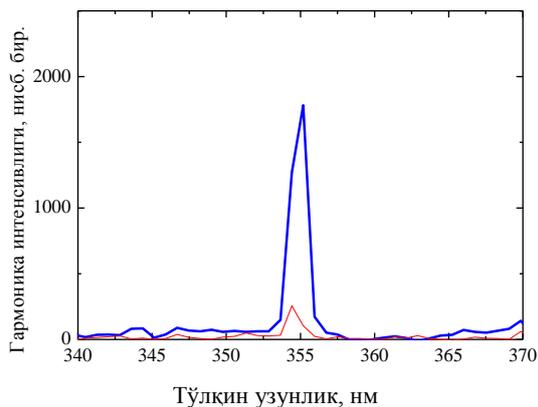
**Органик материаллар учун тажрибада аниқланган ночизикли ютилиш коэффициенти ва ночизикли синдириш кўрсаткичининг қийматлари келтирилган**

№	Намуналар	$\gamma, \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$		$\beta, \text{м} \cdot \text{Вт}^{-1}$	
		$\lambda = 1064$ нм	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 1064$ нм	$\lambda = 532$ нм
1	Бензин	$1 \times 10^{-18}$	$2 \times 10^{-18}$	$3 \times 10^{-14}$	$4 \times 10^{-14}$
2	Соат ёғи	$2 \times 10^{-19}$	$7 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-13}$
3	Глицерин			$\beta_{тўйин} = -2 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$
				$\beta_{ню} = +6 \times 10^{-14}$	
4	Полифенил эфири	$1 \times 10^{-18}$	$6 \times 10^{-19}$	$4 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$

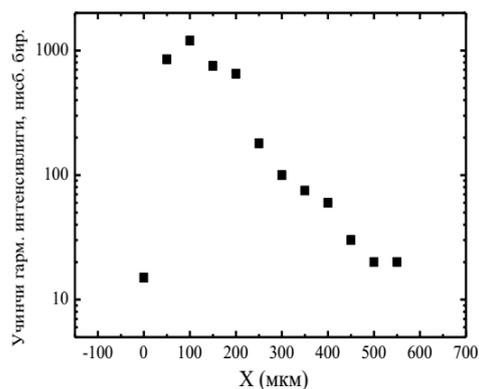
Диссертациянинг бешинчи боби «Плазма ҳолатидаги муҳитларда турли тартибли гармоникалар генерациялари» қаттиқ жисм намуналари юзасига қиздирувчи лазер нурланиши таъсирида ҳосил қилинган лазер плазмасида турли хил шароитларда оптик гармоникалар генерацияси тажрибаларида олинган натижаларни таҳлил қилишга бағишланган.

Турли металл намуналари лазер плазмаларида учинчи ва юқори гармоникалар генерациялари ўрганилган ва бунда нишон материаллар сифатида турли металллардан (бор, титан, марганец, мис, молибден, кумуш ва

олтин) фойдаланилди. Лазер нурланиши манбаи сифатида пассив синхронизацияси режимида ишловчи, давомийлиги 38 пс бўлган импульслар тўпламини генерацияловчи 1,5 Гц частота режимида ишловчи Nd:YAG лазеридан ( $\lambda=1064$  нм) фойдаланилди. Тажрибалар вакуум ва нормал атмосфера шароитида олиб борилди (10-расм). Учинчи гармоника генерациясини оптималлаштиришда лазер абляцияси жараёнида ҳосил қилинган плазма хоссалари таҳлили олиб борилди. Учинчи гармоника генерациясини оптималлаштиришда муҳим параметр бўлиб, плазма ҳосил қилувчи ва плазма билан таъсирлашувчи импульс орасидаги вақт кечикиши ҳисобланади. Учинчи гармоника генерацияси учун оптимал вақт кечикиши қиймати  $25\div 40$  нс га тенг. Таъсирлашувчи нурланиш оптик ўқи ва нишон орасидаги масофанинг учинчи гармоника генерацияси самарадорлигига таъсири тадқиқ этилди. Ушбу масофа тажрибалар олиб бориш давомида нишон ҳолатини манипулятор ёрдамида бошқариш орқали алмашинувчи нурланиш оптик ўқиға нисбатан ўзгартирилди. 11-расмда ушбу параметрнинг учинчи гармоника генерацияси самарадорлигига таъсири келтирилган, бу таъсирлашув соҳасида плазма параметрларини (плазма зичлиги ва зарралар уйғотилиш даражаси) оптималлаштириш билан боғлиқ. Импульслар орасида вақт кечикиши 30 нс бўлган ҳолда нишон юзаси ва алмашинувчи нурланиш оптик ўқи орасидаги оптимал масофа (100 мкм) аниқланди.



**10 - расм. Бор плазмасида (йўғон чизик) ва нормал шароитда (нозик чизик) генерацияланувчи учинчи гармоника интенсивлиги**

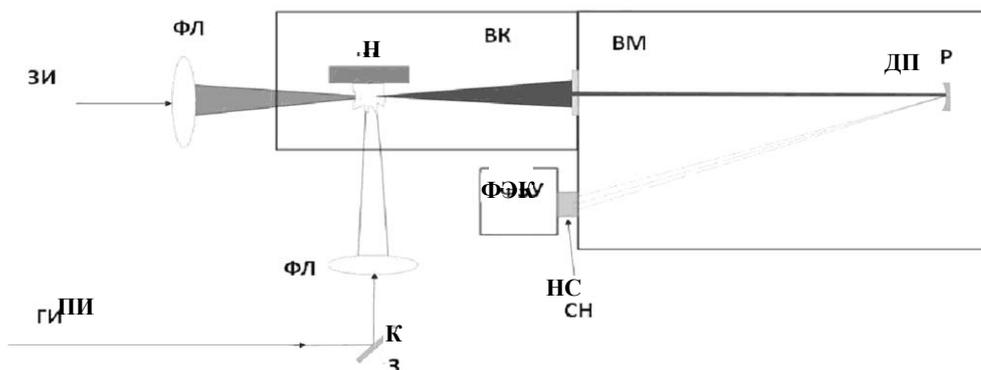


**11 - расм. Учинчи гармоника интенсивлигининг тағлиқ юзаси билан плазмаға тушувчи нурланиш ўқи орасидаги масофаға боғлиқлик графиги**

Текис ва даврий нишонлар юзасида ҳосил қилинган узун ва даврий плазма дасталарида пикосекунд лазер нурланиши учинчи ва тўртинчи гармоника генерацияси ўрганилди. Турли металллар юзаларида узун лазер плазмасида тўртинчи гармоника генерацияси тадқиқи учун икки тўлқинли дамлаш схемасидан фойдаланилди. Бунда асосий нурланишнинг бир қисми нозикли кристалл (узунлиги 10 мм бўлган, I тип KDP кристали) ёрдамида частотаси иккинчи гармоника частотасига 6% самарадорлик билан алмаштирилди ва ушбу икки нурланиш плазмаға фокусланди. Тадқиқотларда асосий ўзига хосликлар плазма дастаси бўйлама узунлиги ( $d$ ) ошиши билан муҳитнинг интенсив нурланиш таъсирида юзаға келувчи нозикли

жавобининг кучайиши билан боғлиқ бўлди. Бунда эркин электронларнинг мавжудлиги асосий импульс ва гармоника нурланиши орасидаги фазавий мослашиш шартини ўзгартириши мумкин. Бир қатор ҳолатларда микрожараёнлар (хусусан, муҳитнинг алоҳида зарралари жавоблари) макрожараёнлардан (фаза мослашиши коллектив эффе́ктларига қарашли) устун келди, ва бу шартда учинчи гармоника интенсивлиги нозичли муҳит узунлигига квадратик ( $I_{3Г} \propto d^l$ , где  $l = 2$ ) боғланишда бўлди. Бундай боғланиш бир қатор плазма дасталари учун таҳлил қилинди ва учинчи гармоника алмаштириш самарадорлиги учун  $10^{-5} \div 10^{-3}$  атрофидаги қийматлар олинди.

12. расмда лазер плазмасида юқори тартибли гармоникалар учун тажрибавий қурилма оптик схемаси келтирилган. Нурланиш манбаи сифатида модаларнинг пассив синхронизацияси режимида ишловчи, давомийлиги 38 пс бўлган импульслар тўпламини генерацияловчи 1,5 Гц частота режимида ишловчи Nd:YAG лазеридан ( $\lambda=1064$  нм) фойдаланилди. Ажратиб олинган алоҳида импульс кетма-кет кучайтиргичда кучайтирилгандан кейин иккита қисмга ажратилди. Биринчи импульс (ПИ) энергияси  $\sim 5$  мДж вакуум камерада (ВК) жойлаштирилган намуна (Н) юзасига (ФЛ) фокусловчи линза орқали йўналтирилди ва қиздирувчи импульс сифатида фойдаланилди.



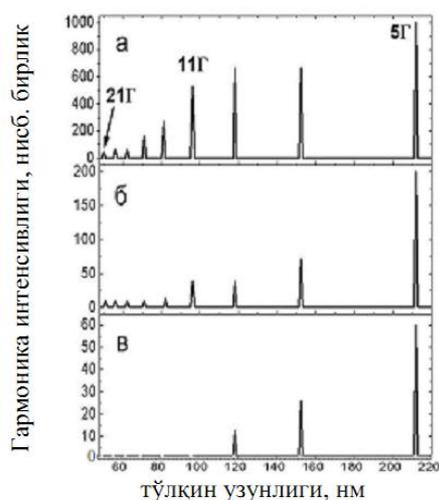
ЗИ – зондловчи пикосекунд импульс; ПИ – плазма ҳосил қилувчи пикосекунд импульс; К – кўзгу; ФЛ – фокусловчи линзалар; ВК – вакуум камера; Н – нишон; ВМ – вакуум монохроматор; ДП – дифракцион панжара; НС – натрий салицилат; ФЭУ – фотоэлектрон кучайтиргич

**12 - расм. Тажриба қурилмаси схемаси**

Бунда қиздирувчи импульснинг максимал интенсивлиги  $\sim 10^{11}$  Вт·см<sup>-2</sup> га тенг. Иккинчи импульс (ЗИ, импульс энергияси 28 мДж) биринчи импульсга нисбатан маълум вақтга кечиктирилиб, намуна юзасида биринчи импульс ёрдамида ҳосил қилинган лазер плазмасига намуна юзаси билан паралел равишда фокусланади. Бунда зондловчи импульснинг максимал интенсивлиги  $4 \times 10^{13}$  Вт·см<sup>-2</sup> га тенг. Импульслар орасидаги оптимал кечикиш вақтини аниқлаш учун плазмада юзага келувчи гармоникалар генерацияси самарадорлиги турли вақт кечикишлари  $5 \div 150$  нс вақт соҳасида ўлчанди. Зондловчи нурланиш ва юқори гармоникалар нурланишлари вакуум монохроматор (ВМ) ёрдамида таҳлил қилинди. Тўлқин узунлиги  $50 \div 300$  нм бўлган когерент гармоника нурланишлари сцинтиллятор (натрий салицилат (НС)) ва

фотоэлектрон кучайтиргичлар (ФЭК) ёрдамида қайд қилинди. Тажрибада фойдаланилган намуналар пластинка кўринишида бўлиб, ўлчамлари  $5 \times 5 \times 2$  мм<sup>3</sup> га тенг. Тагликлар сифатида турли металллар (мис, рух, хром, молибден, титан, қалай, қўрғошин, тантал, марганец, олтин кумуш, бор ва алюминий) ва углерод таркибли (графит, шишауглерод, пирографит, бор карбиди, кремний карбиди, грифель) материаллар ишлатилди. Зондловчи нурланиш билан плазма орасидаги таъсирлашувни бошқариш учун тагликларнинг ҳолати уч координатли манипулятор ёрдамида ўзгартирилди.

Олиб борилган тажрибалар нурланишнинг паст тартибли гармоникаларга (5-чи ва 7-чи) алмаштириш самарадорлиги етарлича юқори эканлигини кўрсатди. Бу тўлқин узунлиги  $100 \div 200$  нм оралиғида жойлашган пикосекунд давомийликдаги эффектив когерент манбаларини яратиш мумкинлигидан далолат беради. 13-расмда Sn, Cr ва Al материаллари плазмаларида олинган юқори гармоникалар генерацияларининг характерли спектрлари келтирилган. Юқори гармоникалар генерациялари самарадорлик қийматлари Sn ва Cr материали плазмасида гармоникалар тақсимоти, бутун спектрал соҳада бошқа материалларга нисбатан энг катта ва энг кичик қийматга эга эканлиги аниқланди (13а ва 13б - расм). Ўрганилган материаллар турли хил бўлишига қарамадан уларнинг плазмавий ҳолатларида кузатилаётган гармоникалар самарадорлиги бир-бирига яқин эканлигини таъкидлаш лозим. Бир қатор



а – қалай, б – хром, в – алюминий

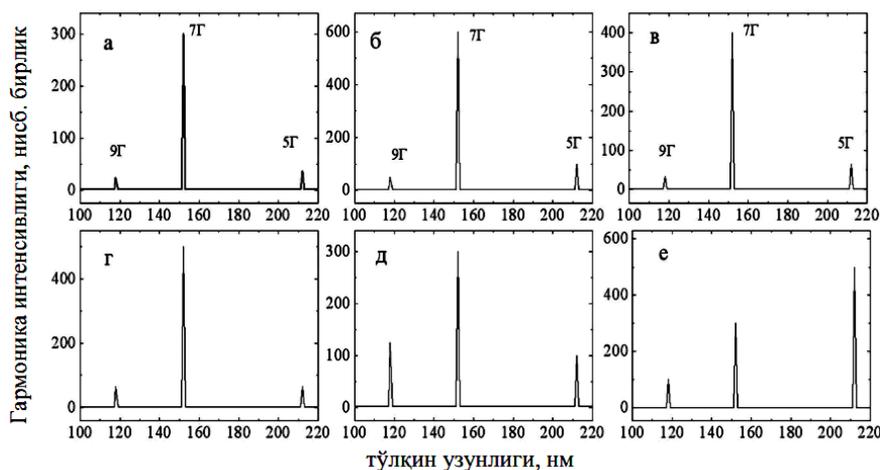
**13 - расм. Юқори гармоника генерациялари спектрал тақсимоти**

пикосекунд давомийликка эга лазер нурланишининг юқори гармоникалари генерациялари олиб борилди. Углерод атоми ва бир каррали зарядланган ионлари Плазма ҳосил қилувчи лазер нурланишининг оптимал қийматида углерод материаллари плазмавий ҳолатлари асосан нейтрал атомлар ва бир каррали зарядланган ионлардан ташкил топган. Тажрибада юқори гармоникалар генерациясининг 21-тартибгача олинди. Углеродли материаллар плазмаларида, юқори гармоникалар генерациялари бўйича

материаллар плазмаларида 7-чи гармоника генерацияси (тўлқин узунлиги 152 нм) самарадорлиги қиймати  $\sim 10^{-4}$  га тенг эканлиги аниқланди. Хусусан, қалай нишони плазмасида олинган 11-чи гармоника генерацияси (тўлқин узунлиги 97 нм) самарадорлиги 2 марта кичик бўлиб  $\sim 0,5 \times 10^{-4}$  га тенг. Бошқа материаллар плазмаларида 13- ва 21-гармоникалар соҳасидаги алмаштириш самарадорлиги қийматлари  $10^{-5} \div 10^{-6}$  ни ташкил қилди.

Ионизация потенциали, металллар ионизация потенциалидан катта бўлган углерод таркибли материаллар плазмаларида

Ўтказилган тажрибаларнинг ўзига хос ва муҳим жиҳати - бу кучайган 7-гармоника генерацияси кузатилди (14а-14д-расмлар).



а – графит; б – шиауглерод; в – грифель; г – пирографит; д – карбид кремний; е – карбид бор

**14 - расм. Углеродли плазмада генерацияланувчи 5, 7 ва 9 - гармоникалар интенсивликлари тақсимотлари**

Бунда 7-гармоника генерацияси самарадорлигининг 5-чи гармоника генерацияси самарадорлигига нисбатан 7 марта ошиши аниқланди. Шунинг таъкидлаш жоизки, ғалаёнлантириш назариясига асосан ҳар бир кузатиловчи гармоника интенсивлиги ундан олдинги тартибдаги гармоника интенсивлигига нисбатан 2 марта кам бўлиши лозим. Алмашинувчи нурланиш интенсивлигининг минимал  $7 \times 10^{12}$  Вт·см<sup>-2</sup> га тенг қийматидан максимал  $4 \times 10^{13}$  Вт·см<sup>-2</sup> қийматигача оралиқларда 7-чи гармоника самарадорлиги паст тартибли (5-чи) гармоника самарадорлигига нисбатан 6 мартаба ошиши аниқ қайд этилди. Пирографит плазмасида зондловчи нурланиш интенсивликлари  $1,2 \times 10^{13}$ ,  $2,5 \times 10^{13}$  ва  $3,7 \times 10^{13}$  Вт·см<sup>-2</sup> қийматларида 7-чи ва 5-чи гармоника интенсивликлари нисбатлари 5,5, 4,5 ва 8,3 га тенг қийматларга мос келди. Аниқланган частоталарда нозичли жавоб ўзгаришлари атомлар ва ионлардаги резонанс ўтишлар туфайли бўлиши мумкин. Углерод атомлари ва ионлари Nd:YAG лазери ( $\lambda = 152$  нм) нурланишининг 7-гармоника ( $\lambda = 152$  нм) генерацияси тўлқин узунлигига яқин тўлқин узунликларда бир қатор ўтишларга эга. .

Юқори гармоника генерациялари тадқиқотлари цилиндрик линза ёрдамида қиздирувчи импульсни нишон юзасига фокуслаш орқали юзага келувчи нисбатан узун бўлган лазер плазмаси факелидан фойдаланиш орқали давом эттирилди. Тажрибаларда юқори гармоникалар характеристикалари 4 мм узунликдаги ва нисбатан қисқа бўлган 0,5 мм узунликдаги плазмаларда таҳлил қилинди ва нисбатан узун плазма дастасида 5-чи гармоника самарадорлиги ошиши ва платосимон тақсимот интенсивлигининг кучайиши кузатилди. Узун плазма дастасида олиб борилган тадқиқотлар шунинг кўрсатдики, бу каби муҳитлар бир қатор афзалликларга эга бўлиб, келгусида бундай муҳитларда генерацияланувчи гармоникалар учун квазисинхронизм шароит-

ларини амалга оширишда фойдаланиш мумкинлиги таҳлил қилинди. Бунинг учун эса узун плазма дастасини бир неча гуруҳ кичик дасталар ҳолида қўллаш ва генерацияланувчи гармоникалар когерентлик узунликлари билан мос келувчи ўлчамларини олиш кераклиги тажрибаларда кўрсатилди.

Олиб борилган тажрибалар натижалари шуни кўрсатдики, тўлқин узунлиги 100÷200 нм бўлган спектрал соҳаларда кузатиловчи муҳим ўзига хослик, яъни яккаланган гармоникалар интенсивлигининг ошиши углеродли материаллар плазмавий ҳолатларида 7-чи гармоника генерациясига мос келувчи нейтрал углерод атомлари мажбурий-резонанс ўтишларидаги ( $S(I)$ ,  $\lambda = 148$  нм ва  $S(I)$ ,  $\lambda = 156$  нм) ночизикли оптик жавобларнинг ошиши ҳисобланади. Углерод плазмасида фазаларнинг ночизикли мос келмасликлари 5-гармоника интенсивлигининг тўйинишига ва лазер нурланиши интенсивликлари ва плазма концентрацияларининг кенг ўзгариш оралиқларида кузатиловчи 5-гармоникага нисбатан 7-гармониканинг кучайишига олиб келиши кўрсатилди.

## ХУЛОСА

1. Турли шароитларда, нанозарралар шаклланиши қаттиқ нишонлар юзасига пикосекунд импульслар таъсири натижасида ҳосил бўлган плазма заррачаларининг тўқнашиш механизмларининг муҳим роль эгаллаши тушунтирилган.

2. Тўлқин узунлиги 532 нм бўлган нурланишнинг ночизикли ютилиш коэффиценти, тўлқин узунлиги 1064 нм бўлган нурланишникига нисбатан 25 баробар ошиши, тадқиқ қилинаётган намуналарда ютилиш коэффицентининг тўйинишига ва икки фотонли ютилишга асосланганлиги кўрсатилган.  $S_{60}$  эритмасида тўлқин узунлиги 532 нм бўлган нурланишдаги оптик чекланиш ушбу тўлқин узунликдаги ночизикли ютилиш тадқиқотлари натижаларига мувофиқлиги кўрсатилган.

3. Суюқ ҳолатдаги турли органик моддаларнинг ночизикли синдириш кўрсаткичи ва ночизикли ютилиш коэффиценти тажрибада ўлчанди. Глицерин моддасида лазер нурланиш интенсивлиги ортиши билан ночизикли ютилиш коэффицентининг ишораси ўзгариши аниқланган.

4. Илк бор учинчи ва тўртинчи гармоникалар самарадор генерациялари учун бир жинсли плазмаларга нисбатан даврий плазмалардан фойдаланиш афзалликлари кўрсатилган. Бир жинсли лазер плазмаларига нисбатан даври 0,15 мм бўлган структуравий плазмаларда учинчи гармоника генерацияларининг самарадорликлари 8 марта ортиши топилган.

5. Металл плазмасида пикосекунд давомийликка эга лазер нурланиши частотасининг тўлқин узунлиги 50÷220 нм бўлган спектрал соҳадаги, юқори гармоникаларга самарали алмаштириш кўрсатилган.

6. Қалай плазмасида 11-чи гармоника (тўлқин узунлиги 97 нм) генерацияси учун алмаштириш самарадорлигининг  $\sim 5 \times 10^{-4}$  га тенг қиймати олинган. Аксарият материаллар плазмаларида 13 ва 21-чи гармоникалар соҳасида алмаштириш самарадорлиги қийматлари  $10^{-5} \div 10^{-6}$  ни ташкил

қилган.

7. Илк бор углеродли материаллар плазмаларида еттинчи гармоника генерацияси интенсивлиги бешинчи гармоника интенсивлигига нисбатан 7 маротаба ошиши билан боғлиқ муҳим ўзига хослик аниқланган.

8. Углерод плазмасида лазер нурланиши интенсивлиги ва плазма концентрациясининг кенг соҳасида 7-чи гармоника интенсивлигининг 5-чи гармоника интенсивлигига нисбатан ошиши Керр нозизиқлилигига асосланган.



**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 при ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ  
ИНСТИТУТЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ  
«ФИЗИКА-СОЛНЦЕ», ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И  
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И САМАРКАНДСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**БОЛТАЕВ ГАНЖАБОЙ САПАЕВИЧ**

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ,  
ОРГАНИЧЕСКИХ И КЛАСТЕРНЫХ СРЕД**

**01.04.11 – Лазерная физика (физико-математические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**Ташкент – 2016 год**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 12.05.2015/В2015.1.FM200 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.**

Докторская диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу ([www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

<b>Научный консультант:</b>	<b>Ганеев Рашид Аширович</b> доктор физико-математических наук
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Азаматов Закиржан Тахирович</b> доктор физико-математических наук
	<b>Юсупов Джавдат Бакиджанович</b> доктор физико-математических наук
	<b>Низамов Немат Низамович</b> доктор физико-математических наук, профессор
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Национальный университет Узбекистана</b>

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_ часов на заседании Научного совета 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули – 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № \_\_\_\_\_) (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули – 2б. Тел.: (+99871) 235-30-41).к

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016г.).

**С.Л. Лутпуллаев**

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

**А.В. Каримов**

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

**С.А. Бахрамов**

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

## **Введение (аннотация докторской диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В связи с продолжающимся развитием лазерных технологий и нелинейной оптики в настоящее время в мире чрезвычайно актуальна проблема исследования оптических нелинейностей различного порядка и процессов, протекающих при распространении интенсивных ультракоротких лазерных импульсов в плазменных, органических и кластерных средах. Данные исследования связаны с применением новых материалов и новых устройств, основанных на нелинейно-оптических эффектах, для различных областей науки и техники, таких как обработка и создание новых материалов, телекоммуникация и информатика, метрология, передача и обработка сигнала, медицина, генная инженерия и многих других.

Применение наноматериалов требует изучения оптических и нелинейно-оптических параметров и механизмов их формирования в различных спектральных и временных диапазонах. Среди наиболее интересных нелинейно-оптических процессов в средах, содержащих наночастицы, а также в углеродсодержащих материалах, привлекает внимание нелинейное изменение показателя преломления, обусловленное оптическим эффектом Керра, нелинейное поглощение в результате многофотонных переходов, либо обратного насыщенного поглощения и насыщенное поглощение. Последнее, в зависимости от его времени релаксации, играет решающую роль в одном из важнейших применений подобных наночастиц в лазерной физике – использовании их в качестве сред для пассивной синхронизации мод при генерации ультракоротких световых импульсов. Важным также является исследование процессов преобразования частоты ультракоротких лазерных импульсов в данных средах в области ультрафиолета и мягкого рентгена, т.е. в таких спектральных диапазонах, где отсутствует прямая лазерная генерация.

Востребованность темы диссертации обусловлена необходимостью развития методики лазерной абляции для получения наноструктурированных материалов и методики генерации высших гармоник в плазменных образованиях, а также повышения эффективности преобразования энергии в материалах с высокой нелинейностью. Кроме того экспериментальные результаты по анализу нелинейностей наноматериалов, крайне востребованы для одной из важных проблем лазерной физики и нелинейной оптики – создание высокоэффективных нелинейных элементов на основе наноструктур металлов.

Комплексные меры, предпринимаемые в развитых странах по развитию систем регионально-территориального автоматизированного управления и создания единого информационного пространства, направлены на широкое внедрение информационных систем на основе современных информационных коммуникационных технологий. В связи с этим определены и анализ нелинейно-оптических параметров и процессов, протекающих при распространении ультракоротких лазерных импульсов в

плазменных, органических и кластерных средах, продолжают оставаться одним из приоритетных направлений лазерной физики и нелинейной оптики, обеспечивающих также развитие смежных областей науки и техники.

Настоящая диссертация, в определенной степени, посвящена решению задач, указанных в Постановлении Президента Республики Узбекистан ПП-1442 “О приоритетах развития промышленности Республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах” от 15 декабря 2010 года.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий: ПФИ-2 – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Международный обзор научных исследований по теме диссертации.** Исследования нелинейно-оптических процессов, проявляющихся при распространении ультракоротких лазерных импульсов в плазменных, органических и кластерных средах, проводятся в научных центрах Университета Вильгельм Вестфалише (Мюнстер, Германия), Института физики твердого тела Токийского университета (Кашива, Япония), Центра передовых технологий им. Раджа Рамана (Индор, Индия), Имперского Колледжа (Лондон, Великобритания), Института общей физики (Москва, Россия), Физико-химического института Рокасолано (Мадрид, Испания), Национального института научных исследований (Монреаль, Канада) и ряда других научных центрах мира.

На мировом уровне ряд актуальных задач решены, в том числе получены следующие научные результаты: при формировании наноструктур серебра, олова и золота в условиях вакуума с помощью лазерной абляции получены наночастицы этих материалов размерами 30÷300 нм; предлагалось использование раствора наночастиц платины в качестве пассивного модулятора лазерного излучения на длине волны 1054 нм; проведены исследования нелинейностей различного порядка наночастиц золота, палладия, рутения и платины на длине волны 792 нм.

В настоящее время наночастицы, углеродсодержащие материалы и лазерная плазма, созданные на поверхности твердотельных мишеней, широко используются в нелинейной оптике и лазерной физике. В связи с этим, проводятся научно-исследовательские работы по исследованию нелинейно-оптических свойств материалов в поле ультракоротких импульсов.

**Степень изученности проблемы.** Mehendale S.C., Mishra S.R., и другие ученые из Индии проводили анализ нелинейно-оптических параметров суспензий наночастиц металлов в поле наносекундного излучения маломощной световой волны. При этом нелинейно-оптический отклик обусловлен тепловой нелинейностью коллоидного раствора наночастиц.

А.Б. Федотов, С.М. Гладков и другие российские ученые в ряде своих работ исследовали генерацию низших и высших гармоник при распространении лазерного излучения в плазменных средах. В этих работах говорится о необходимости проведения оптимизации параметров плазмы для улуч-

шения условий генерации высших гармоник в плазме, созданной в процессе лазерной абляции на поверхности твердых материалов. Однако, ожидаемые эффективности преобразования энергии лазерного излучения в гармоники не были получены. При использовании сильновозбужденной и высокотемпературной плазмы происходит ухудшение условий эффективного преобразования частоты излучения, что не позволяет получать гармоники высших порядков.

Ученые из Узбекистана, в частности, Р.А. Ганеев, И.А. Кулагин, Т.Б. Усманов провели анализ нелинейно-оптических свойств наночастиц металлов, введенных ионной имплантацией в стекло и в виде пленок, а также проведены исследования генерации высших гармоник в сильноионизированной плазме. В результате исследований получены низкие эффективности преобразования энергии лазерного излучения в высшие гармоники. Не исследовалось повышение эффективности преобразования энергии, при использовании слабоионизированной плазмы и повышение эффективности одиночных гармоник в резонансных условиях.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ.** Научно-исследовательские работы включались в состав следующих исследований Института ионно-плазменных и лазерных технологий: ФА-Ф2-Ф049 «Исследование генерации высших гармоник в области вакуумного ультрафиолета и нелинейно-оптических параметров материалов» (2007-2011гг.) и Ф2-ФА-Ф160 «Исследование оптического параметрического усиления чирпированных лазерных импульсов и нелинейного взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом» (2012-2016гг.), программы Международных проектов Мировой академии наук по продвижению науки в развивающихся странах (TWAS Research Grants) (09-113 RG/PHYS/AS\_G – UNESCO FR:3240232129) «High order harmonic generation of laser radiation in plasma using picosecond laser pulses» (2010-2012гг.) и 12-040 RG/PHYS/AS\_G – UNESCO FR:3240271323) «High-order harmonic generation of picosecond radiation in laser-produced plasma in the extreme ultraviolet range» (2012-2014гг.); а также Государственного комитета по координации развития науки и технологии при КМ РУз М/РУ-ФРГ - 69/2013 «Генерация высших гармоник лазерного излучения в плазменных периодических структурах» (2013-2015гг.).

**Целью исследования** является изучение закономерностей нелинейно-оптических процессов проявляющихся при распространении пикосекундных импульсов в плазменных органических и кластерных средах.

Для достижения этой цели были определены следующие **задачи исследования:**

изучить закономерности формирования кластеров металлов в процессе лазерной абляции в жидкости и вакууме, а также при различных давлениях буферных инертных газов;

исследовать влияние параметров пикосекундного лазерного излучения на эффективность нелинейно-оптических процессов в суспензиях кластеров металлов;

экспериментально определить нелинейно-оптические параметры фуллеренов и осуществить анализ оптического ограничения в растворе  $C_{60}$  в толуоле;

исследовать двухфотонное поглощение и влияние керровских нелинейностей на процессы распространения мощного лазерного излучения в органических материалах;

определить оптимальные условия генерации оптических гармоник в плазменных средах, образованных на поверхности твердотельных мишеней в процессе лазерной абляции;

развить методику создания мультиструйной лазерной плазмы для повышения эффективности генерации высших гармоник в условиях квазисинхронизма.

**Объект исследования** – наночастицы неорганических и органических веществ, плазменные среды.

**Предмет исследования** – взаимодействие ультракороткого лазерного излучения с веществом.

**Методы исследования:** метод Z-сканирования, генерация гармоник лазерного излучения, метод лазерной абляции и метод электронной микроскопии.

**Научная новизна исследования** заключается в следующих результатах:

изучено формирование кластеров металлов в процессах лазерной абляции при различных давлениях буферных инертных газов и найдены пороговые значения давлений различных газов, при которых образуются наночастицы;

найлены закономерности по зависимости процессов формирования наночастиц металлов от длительности и интенсивности лазерных импульсов в процессе лазерной абляции. Созданы наноматериалы из наночастиц серебра и меди размерами 20 и 60 нм соответственно;

определены значения коэффициента нелинейного поглощения и нелинейной рефракции в суспензии наночастиц Pd, Ru, Au и Mn в диапазоне интенсивностей  $I = 9 \times 10^9 \div 1,7 \times 10^{10}$  Вт·см<sup>-2</sup> на длинах волн 1064 и 532 нм при длительности импульса 50 пс. Обнаружено, что совпадение частоты второй гармоники Nd:YAG лазера (длина волны  $\lambda_{2\omega} = 532$  нм) с частотой поверхностного плазмонного резонанса (длина волны  $\lambda_p \sim 530$  нм) для наночастиц Au приводит к возрастанию коэффициента насыщенного поглощения;

показаны возможности создания защитных устройств для сенсоров на основе оптического ограничения мощных лазерных импульсов в растворе  $C_{60}$  в толуоле. Показана динамика изменения знака коэффициента нелинейного поглощения глицерина с ростом интенсивности лазерного излучения,

которая обусловлена влиянием двухфотонного поглощения и насыщенного поглощения;

обнаружено превышение эффективности генерации 7-й гармоники относительно 5-й гармоники за счет влияния керровских нелинейностей в плазме углеродсодержащих материалов;

разработана методика создания мультиструйной приповерхностной лазерной плазмы для квазисинхронной генерации высших гармоник лазерного излучения на основе перфорирования поверхности алюминиевых мишеней; показаны возможности получения периодической структурированной плазмы с периодом от 0,15 до 0,5 мкм. Обнаружено восьмикратное увеличение интенсивности третьей гармоники в структурированной плазме с периодом 0,15 мкм по сравнению со сплошной плазмой.

**Практические результаты исследований.** Получены наночастицы ряда металлов в виде пленок и растворов путем лазерной абляции в вакууме и в жидкостях. Измерены коэффициенты нелинейного поглощения и рефракции суспензий наночастиц металлов, ряда органических материалов и фуллеренов методом Z-сканирования. Продемонстрированы возможности эффективной генерации высших гармоник излучения пикосекундного лазера в факеле лазерной плазмы, что расширяет спектральный диапазон получения когерентных источников в области вакуумного ультрафиолета.

**Достоверность результатов исследований.** Калибровка автоматизированной системы Z-сканирования сред подтверждается непротиворечивостью с результатами измерения нелинейно-оптических параметров другими авторами, в том числе с основными теоретическими положениями.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Теоретическая значимость результатов исследований позволяет синтезировать нелинейно-оптические материалы на основе наночастиц серебра, меди и марганца с высокими значениями нелинейно-оптических параметров с использованием метода лазерной абляции в поле импульсов пикосекундной длительности.

Практическая значимость результатов исследований диссертации заключается в том, что наличие двухфотонного поглощения в растворах фуллеренов может быть использовано для создания эффективных оптических ограничителей лазерного излучения и создания резонансных условий, обеспечивающих возрастание эффективности отдельно генерируемых гармоник, что позволяет в значительной степени улучшать энергетические характеристики когерентных импульсов в области вакуумного ультрафиолета.

**Внедрение результатов исследований.** Развита в диссертации методика создания мультиструйной приповерхностной лазерной плазмы обеспечивающая десятикратное увеличение эффективности диагностики нелинейных оптических параметров органических и неорганических материалов использовалась при выполнении научно-исследовательских работ в

рамках проекта «Нелинейно-оптическое применение различных материалов и методов в биомедицине», инициированного Японским обществом содействия развитию науки (грант JSPS KAKENHI, № 24760048, письмо от Центра офтальмологии и передовых лазеров при Медицинском Университете Сайтама, 17.04.2015, Япония).

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: Конференция «Развитие инновационных технологий на взгляд молодых учёных», (Ташкент, 2010); Международная конференция по лазерной оптике «Laser Optics» (Санкт-Петербург, Россия, 2012); Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (Казань 2010 и Москва 2013); Республиканская научно-практическая конференция «Нанотехнология, использование возобновляемых источников энергии: проблемы и решения» (Карши, 2012); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2012» (Москва, 2012); Международная конференция «Актуальные проблемы физической электроники» (Ташкент, 2012); Республиканская научно-практическая конференция «Научный прогресс и инновационное развитие экономики» (Академия Наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2012); Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред» (Самарканд, 2013); II Международная конференция «ОПТИКА И ФОТОНИКА-2013» (Самарканд, 2013); Международная конференция «IPEC-6» (Ташкент, 2013); TWAS-ROCASA Regional conference for young scientists on «Nanoscience & Nanomaterials» (Бангалор, Индия, 2015); а также на объединённом семинаре Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (15.04.2015) и в одноразовом Научном семинаре (19.01.2016) при Научном совете 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте АН РУз, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз и Самаркандском государственном университете по присуждению ученой степени доктора наук.

**Опубликованность результатов.** Полученные результаты по теме диссертации изложены в 29 научных трудах, которые полностью отражают ее содержание; из них 14 статей опубликованы в реферируемых международных журналах, 15 тезисы докладов опубликованы в трудах международных и республиканских конференций.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 191 страницы машинописного текста, включая 67 рисунков и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

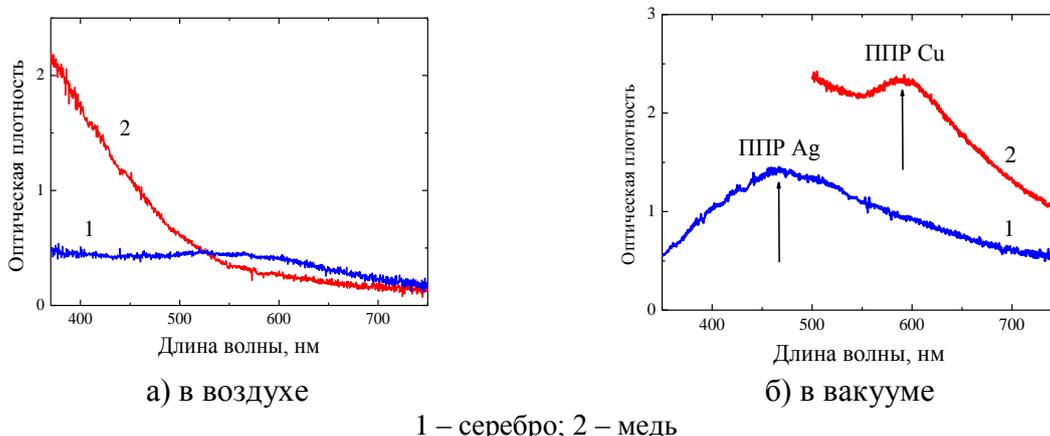
**Во введении** обосновывается актуальность и востребованность темы диссертации, формулируются цель и задачи, а также объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, излагаются

научная новизна и практические результаты исследования, обосновывается достоверность полученных результатов, раскрывается научная и практическая значимость полученных результатов, приведена информация о внедрении в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе «**Обзор и состояние исследований по нелинейности плазменных, органических и кластерных сред**» приведен анализ литературных данных по состоянию проблемы нелинейно-оптических свойств плазменных органических и кластерных сред, а также по исследованиям нелинейно-оптических свойств плазменных образований, кластеров металлов и органических материалов.

Во второй главе «**Методы приготовления и основные свойства наночастиц**» диссертации изложены результаты исследования зависимости формирования наночастиц металлов от концентрации буферных инертных газов в процессе лазерной абляции металлов импульсами пикосекундной длительности. Проанализированы размерные характеристики наночастиц с использованием электронного микроскопа. Формирование наночастиц может быть представлено как процесс быстрого возбуждения электронного газа и перенос энергии возбуждения к атомной ячейке с дальнейшим процессом агрегации, который продолжается в течение абляции, разлета продуктов испарения и напыления материала.

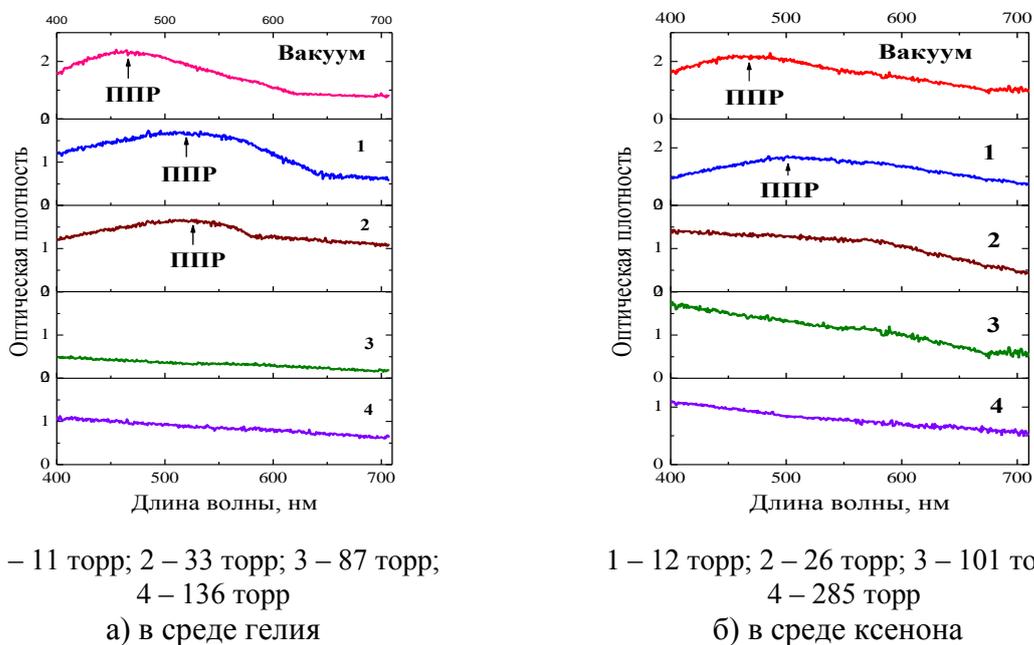
На основе спектральных измерений показано наличие поверхностного плазмонного резонанса в спектре поглощения образцов (рис. 1), напыленных на поверхности стеклянных подложек.



**Рис. 1. Спектры поглощения напыленных пленок при различных условиях**

Формирование наночастиц металлов в условиях вакуума, как показывают микрофотографии образцов, сопровождается появлением сравнительно равномерного распределения кластеров на поверхности стеклянных подложек. Их появление подтверждается наличием поверхностного плазмонного резонанса в спектрах поглощения напыленных образцов. В конце главы показано, что вероятности образования кластеров серебра сильно зависят от концентрации буферных инертных газов.

Впервые проанализировано формирование кластеров металлов при разных давлениях буферных инертных газов и найдены пороги давлений гелия ( $P \approx 33$  торр) и ксенона ( $P \approx 12$  торр), выше которых процесс агрегации наночастиц становится маловероятным и в спектрах поглощения образцов не появляются пики поверхностного плазмонного резонанса (рис. 2).

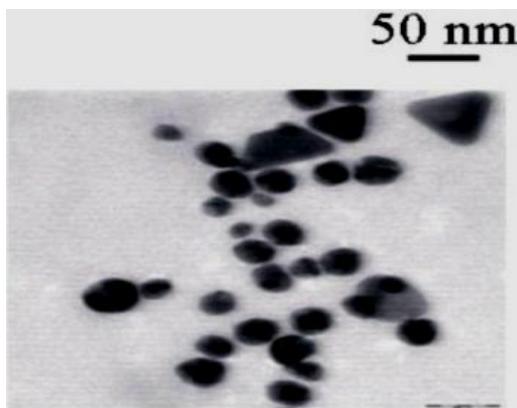


**Рис. 2. Спектры поглощения пленок серебра, напыленных в условиях вакуума и при разных давлениях**

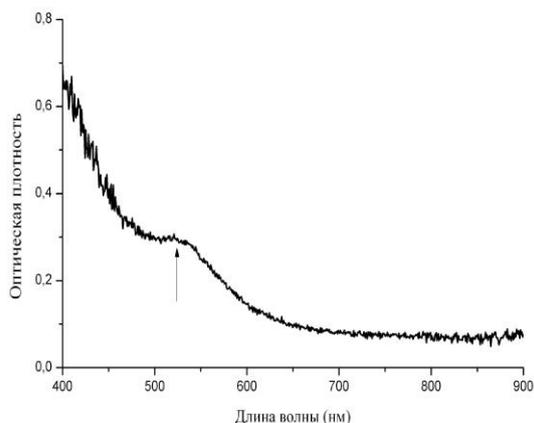
В третьей главе «**Особенности нелинейно-оптических характеристик наночастиц различных металлов**» изложены результаты измерения нелинейно-оптических характеристик суспензий наночастиц рутения, палладия, золота и марганца методом Z-сканирования.

Начальная концентрация суспензий наночастиц металлов была равна 10 ммоль в случае золота и 20 ммоль в случае рутения и палладия. В эксперименте использованы суспензии с весовой долей наночастиц палладия –  $2 \times 10^{-4}$ , рутения –  $4 \times 10^{-4}$  и золота –  $2 \times 10^{-4}$ . При такой концентрации в спектре линейного поглощения наблюдались значительные пики поверхностного плазмонного резонанса. Для определения размеров и морфологии наночастиц использовалась методика электронной микроскопии. Спектральные измерения проводились с использованием спектрометра USB-2000. Образцы помещались в кварцевую кювету толщиной 3 мм. В некоторых случаях к суспензиям добавлялись поливинил пирролидон и полиэтиленмин, препятствующие агрегации наночастиц. В качестве растворителей этих суспензий использовались дистиллированная вода, этанол и *n*-пропанол. На рис. 3 представлены микрофотографии наночастиц золота. Наночастицы золота, рутения и палладия имели размеры соответственно  $15 \div 30$ , 3,4 и 2,5 нм. Установлено, что наночастицы золота в растворе имеют, в основном, сферическую форму и в некоторых случаях – треугольную форму. На рис. 4 представлены спектры поглощения суспензии наночастиц

золота. Пик поверхностного плазмонного резонанса находился в области 530 нм, что характерно для наночастиц золота размером 30 нм. Поверхностные плазмонные резонансы суспензий наночастиц палладия и рутения находились в области 305 нм и 240 нм.

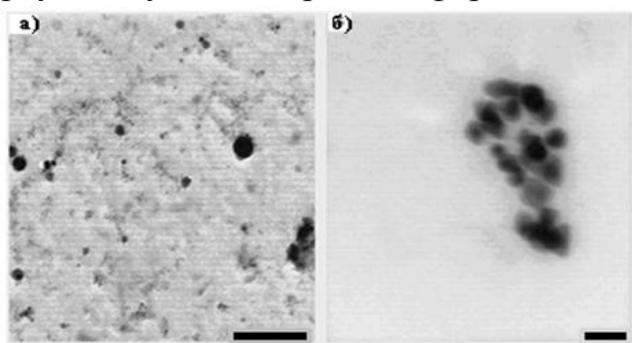


**Рис. 3. Микрофотография наночастиц золота**



**Рис. 4. Спектр поглощения суспензии наночастиц золота в кварцевой кювете толщиной 3 мм**

Раствор наночастиц марганца был приготовлен в процессе лазерной абляции марганца в жидкости. В качестве источника излучения для приготовления растворов наночастиц марганца использовался Nd:YAG лазер с пассивной синхронизацией продольных мод. Длительность импульсов, следующих с частотой 2 Гц, составляла 50 пс. Образцы помещались в кварцевую кювету с этанолом либо с другими органическими растворителями. Лазерное излучение ( $E=3\text{мДж}$ ) фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 8 см на поверхность образца, помещенного вблизи задней стенки кюветы для предотвращения оптического пробоя передней стенки. Облучение образца производилось в течение 30 мин. В результате лазерной абляции наночастицы марганца распылялись в жидкой среде. Весовая доля наночастиц марганца при данной процедуре приготовления составляла  $2 \times 10^{-4}$ . На рис. 5 приведены микрофотографии наночастиц марганца, которые первоначально имели, в основном, сферическую форму, а затем со временем приобретали треугольную и квадратные формы.



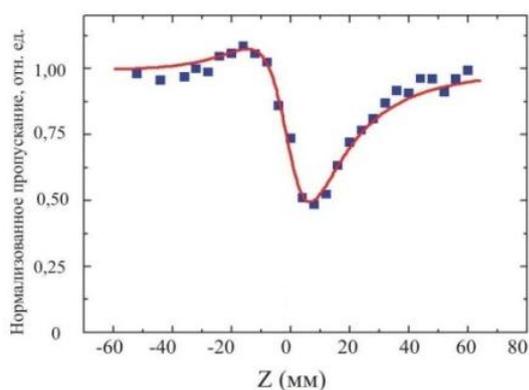
а – сразу после лазерной абляции;  
 б – после двух недель.  
 Маркеры на изображениях соответствуют:  
 а – 200 нм; б – 50 нм

**Рис. 5. Микрофотографии наночастиц марганца**

В приготовленных растворах размеры наночастиц изменялись в пределах от 6 до 50 нм (рис. 5а). Спустя 15 дней это распределение было в пределах от 7 до 14 нм (рис. 5б). Через некоторое время после абляции более

тяжелые наночастицы оседали под действием гравитационных сил и в растворе оставались лишь наночастицы малых размеров, которые не оседают на дно кюветы из-за того, что силы поверхностного натяжения препятствуют их оседанию.

На основе систематических исследований нелинейно-оптических параметров суспензий наночастиц палладия, рутения, золота и марганца с использованием методики Z-сканирования этих сред в поле пикосекундных импульсов с использованием двух длин волн показано, что для наночастиц Pd и Ru квантовый размерный эффект не играет существенной роли в определении их нелинейно-оптических свойств третьего порядка в ближней инфракрасной области ( $\lambda = 1064$  нм).



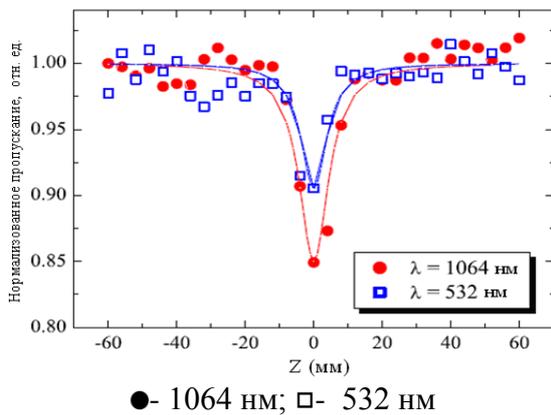
**Рис. 6. Зависимость нормализованного пропускания от положения кюветы с суспензией наночастиц палладия в схеме с ограничивающей диафрагмой**

Для наночастиц Au длина волны поверхностного плазмонного резонанса ( $\lambda_p \sim 530$  нм) почти совпадает с длиной волны излучения второй гармоники Nd:YAG лазера ( $\lambda_{2\omega} = 532$  нм). В данном случае наблюдался значительно более высокий нелинейно-оптический отклик, проявляющийся в виде насыщенного поглощения. Измерения показали, что интенсивность насыщения и коэффициент насыщенного поглощения этой суспензии были равны  $9 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и  $-8 \times 10^{-13}$  м·Вт<sup>-1</sup>. В то же время существенного увеличения нелинейно-оптического отклика наночастиц Pd и Ru можно ожидать в коротковолновой области спектра (например, на длине волны излучения четвертой гармоники Nd:YAG лазера,  $\lambda_{4\omega} = 266$  нм). Необходимо отметить, что в этом спектральном диапазоне присутствует сильное линейное поглощение как в этаноле, используемом в качестве растворителя, так и в самих поверхностно-активных веществах.

Проявление влияния поверхностного плазмонного резонанса для Pd и Ru в этом случае может маскироваться линейным поглощением в УФ области. Исследования также показали, что даже для низкоэнергетичных зондирующих фотонов (с энергией 1,17 эВ) изученные наночастицы Pd и Ru обладают значительной нелинейной рефракцией ( $\gamma_{Pd} = -1.2 \times 10^{-19}$  м<sup>2</sup>·Вт<sup>-1</sup>,  $\gamma_{Ru} =$

Этот результат объясняется тем, что частоты поверхностного плазмонного резонанса этих образцов значительно отстают от частоты излучения Nd:YAG лазера (поверхностный плазмонный резонанс наночастиц Pd и Ru находятся в диапазоне длин волн соответственно  $\lambda_p = 240$  и 305 нм). Зависимость нормализованного пропускания от положения кюветы с суспензией наночастиц палладия в схеме с ограничивающей диафрагмой приведена на рис. 6.

$-3 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) и нелинейным поглощением ( $\beta_{\text{Pd}} = 4 \times 10^{-13} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и  $\beta_{\text{Ru}} = 8 \times 10^{-16} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ).



**Рис. 7. Зависимость нормализованного пропускания от положения кюветы с суспензией наночастиц марганца в этаноле в схеме с открытой диафрагмой**

На основе изучения нелинейно-оптических процессов в суспензии наночастиц марганца определены следующие основные параметры: коэффициент нелинейного преломления ( $\gamma = 8 \times 10^{-19} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) и коэффициент нелинейного поглощения ( $\beta = 2 \times 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ) на длине волны 1064 нм и соответствующие параметры на длине волны 532 нм ( $\gamma = 2 \times 10^{-18} \text{ м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$  и  $\beta = 4 \times 10^{-13} \text{ м} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ). Отмечено что, наиболее важными процессами в исследованных средах при распространении мощных электромагнитных волн являются нелинейное изменение показателя преломления среды и нелинейное поглощение излучения.

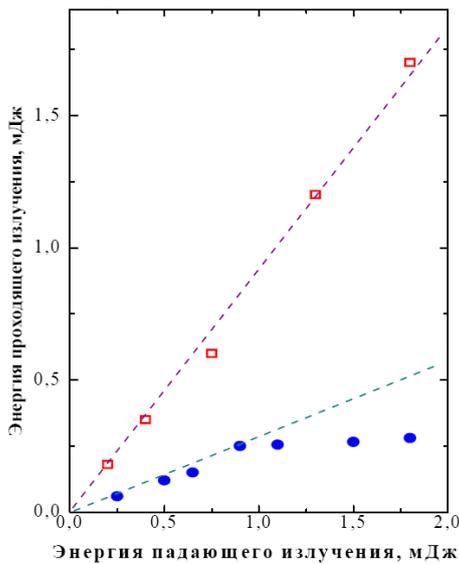
В четвертой главе «**Нелинейно-оптические характеристики углеродсодержащих материалов**» диссертации рассмотрены результаты определения нелинейно-оптических характеристик в случае сред, содержащих  $\text{C}_{60}$ , представлены результаты измерения нелинейного коэффициента поглощения в растворе  $\text{C}_{60}$  в толуоле с использованием излучения Nd:YAG лазера на длинах волн 1064 и 532 нм.

Экспериментально показано, что в случае 50 пс излучения на длине волны 532 нм нелинейное поглощение в 25 раз превышает аналогичный параметр для случая излучения с длиной волны 1064 нм. Превышение этого параметра на длине волны 532 нм объясняется наличием, как обратного насыщенного поглощения, так и двухфотонного поглощения исследуемых образцов на данной длине волны.

Результаты экспериментов по оптическому ограничению, как показано на рис. 8, имеют характерную зависимость энергии излучения, прошедшего через раствор  $\text{C}_{60}$ , от энергии (E) падающего излучения на длине волны  $\lambda = 532 \text{ нм}$ . Установлено, что коэффициент пропускания раствора был приблизительно постоянным до  $E = 0.85 \text{ мДж}$  (при световом потоке  $0.1 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-1}$ ). Дальнейшее увеличение энергии импульса приводило к снижению энергии излучения, прошедшего через раствор фуллеренов. Оптическое

Нелинейно - оптические параметры раствора наночастиц марганца определяли в этаноле методикой Z-сканирования. Экспериментально показано, что физическим механизмом, определяющим процесс самофокусировки в суспензии наночастиц марганца на длинах волн 1064 нм и 532 нм, является оптический эффект Керра, в то время как нелинейное поглощение обусловлено двухфотонным поглощением или обратным насыщенным поглощением (рис. 7).

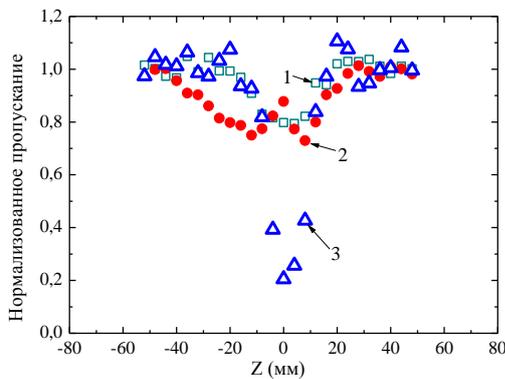
ограничение раствора фуллерена имеет хорошее соответствие с данными по нелинейному поглощению.



● - раствора C<sub>60</sub> в толуоле; □ - толуола

**Рис. 8. Энергия проходящего излучения как функция энергии падающего излучения**

Исследование оптических нелинейностей в жидких различных органических материалах проводилось методом Z-сканирования в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Показано, что большинство образцов обладает нелинейным поглощением, в то время как некоторые из исследованных материалов продемонстрировали сильное насыщенное поглощение и нелинейную рефракцию. Наиболее интересным материалом оказался глицерин (рис. 9), продемонстрировавший конкуренцию между положительным и отрицательным нелинейным поглощением с ростом лазерной интенсивности и толщины образца.



1 – λ = 1064 нм, I = 3×10<sup>10</sup> Вт·см<sup>-2</sup>;  
 2 – λ = 1064 нм, I = 8×10<sup>10</sup> Вт·см<sup>-2</sup>;  
 3 – λ = 532 нм, I = 2×10<sup>10</sup> Вт·см<sup>-2</sup>

**Рис. 9. Зависимости нормализованного пропускания глицерина от положения кюветы для различных интенсивностей и длин волн лазерного излучения**

В общем случае зависимость коэффициента поглощения от интенсивности лазерного излучения имеет вид:

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \beta \cdot I, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – линейный коэффициент поглощения;  $\beta$  – нелинейный коэффициент поглощения, являющийся отрицательным в случае насыщенного поглощения. Существуют различные модели, описывающие насыщенное поглощение. Коэффициент поглощения в случае системы с двумя уровнями, обладающей неоднородно уширенными состояниями, можно записать в виде

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{\text{нас}}]^{-0.5}, \quad (2)$$

где  $I(z)$  – интенсивность излучения, проходящего через образец;  $I_{нас}$  – интенсивность насыщения. Следующая ("кинетическая") модель используется для описания насыщенного поглощения в случае уменьшения населенности основного состояния:

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{нас}]^{-1}. \quad (3)$$

Показано, что коэффициенты нелинейной рефракции и нелинейного поглощения исследованных органических сред по величине не превосходили соответствующие параметры неорганических материалов. Значения нелинейных показателей преломления и параметров оптического нелинейного поглощения этих образцов (коэффициентов насыщенного поглощения  $\beta_{нас}$  и коэффициентов нелинейного поглощения  $\beta_{нп}$ ) представлены в **таблице 1**.

**Таблица 1.**

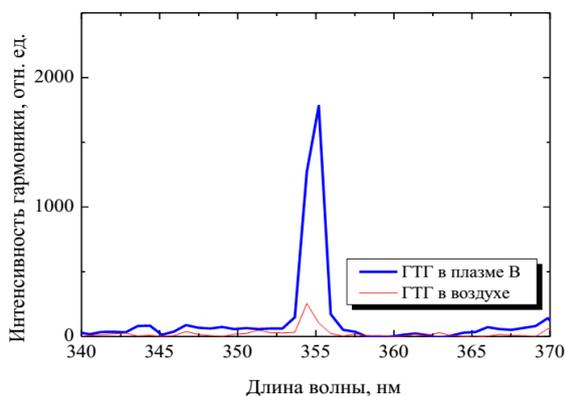
**Результаты измерений нелинейных показателей преломления и коэффициентов нелинейного поглощения органических материалов**

№	Образцы	$\gamma, \text{м}^2 \cdot \text{Вт}^{-1}$		$\beta, \text{м} \cdot \text{Вт}^{-1}$	
		$\lambda = 1064 \text{ нм}$	$\lambda = 532 \text{ нм}$	$\lambda = 1064 \text{ нм}$	$\lambda = 532 \text{ нм}$
1	Бензин	$1 \times 10^{-18}$	$2 \times 10^{-18}$	$3 \times 10^{-14}$	$4 \times 10^{-14}$
2	Часовое масло	$2 \times 10^{-19}$	$7 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-13}$
3	Глицерин			$\beta_{нас} = -2 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$
				$\beta_{нп} = +6 \times 10^{-14}$	
4	Полифениловый эфир	$1 \times 10^{-18}$	$6 \times 10^{-19}$	$4 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$

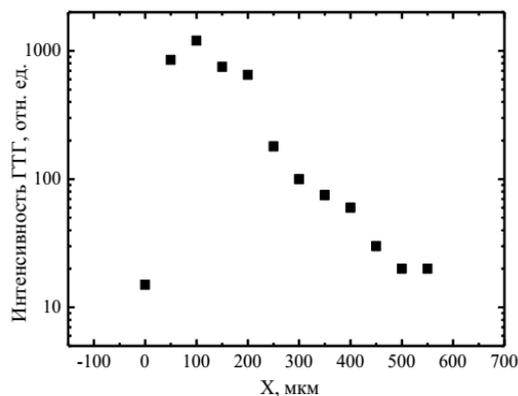
Пятая глава «Генерация гармоник различного порядка в плазменных средах» диссертации посвящена анализу результатов исследования генерации гармоник в лазерной плазме в различных экспериментальных условиях при прохождении лазерных импульсов через плазму, приготовленную на поверхности различных твердотельных мишеней, в результате воздействия на них греющего импульса.

При изучении генерации третьей и более высоких гармоник в плазменных образованиях различных мишеней в качестве материалов мишени использовались различные металлы (бор, титан, марганец, медь, молибден, серебро и золото). В качестве источника излучения использовался Nd:YAG лазер ( $\lambda=1064 \text{ нм}$ ) с пассивной синхронизацией мод, генерирующий цуг импульсов с длительностью отдельного импульса 38 пс и работающий с частотой повторения импульсов 1,5 Гц. Эксперименты проведены в условиях вакуума и в условиях нормальной атмосферы (рис. 10). Для оптимизации генерации третьей гармоники был проведен анализ свойства плазмы, созданной в процессе лазерной абляции. Установлено, что важным параметром оптимизации генерации третьей гармоники является значение времени задержки между греющим и зондирующим импульсами. Оптимальное время задержки для генерации третьей гармоники в этих

экспериментах составило  $25 \div 40$  нс. А также исследовано влияние расстояния между мишенью и оптической осью распространения преобразуемого излучения на эффективность генерации третьей гармоники. Это расстояние изменялось в ходе экспериментов с помощью манипулятора, который управлял положением мишени относительно положения оптической оси распространения одиночного преобразуемого импульса. На рис. 11 приведен пример влияния этого параметра на эффективность преобразования в третью гармонику, что было связано с оптимизацией плазменных параметров (плотности плазмы и степени возбуждения частиц) в зоне взаимодействия. Определено оптимальное расстояние (100 мкм) между зондирующим лазерным пучком и поверхностью мишени при использовавшейся задержке между импульсами, равной 30 нс.



**Рис. 10.** Спектр третьей гармоники, генерируемой в плазме бора (толстая кривая) и воздухе (тонкая кривая) в случае преобразования 50 пс импульса

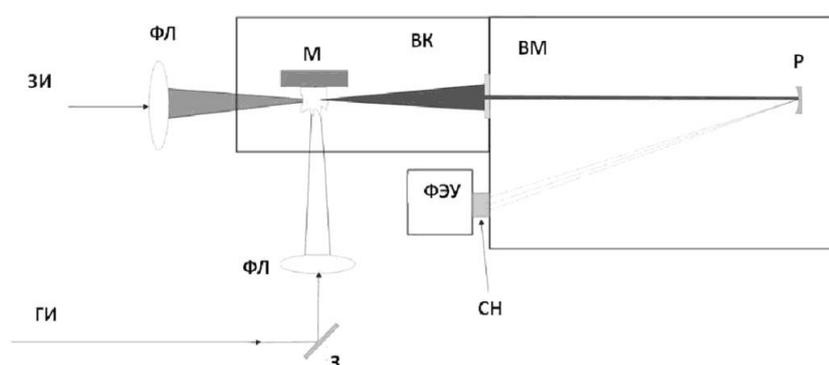


**Рис. 11.** Зависимость между интенсивностью третьей гармоники и расстоянием между осью преобразуемого излучения и поверхностью мишени

Генерации третьей и четвертой гармоник излучения пикосекундного лазера изучались в факеле длинной и периодической плазмы, созданной на поверхности сплошных и перфорированных мишеней. При этом использовалась схема двухцветной накачки в протяженной лазерной плазме на поверхности различных металлов, где часть зондирующего импульса преобразовывалась во вторую гармонику с помощью нелинейного кристалла (KDP, первого типа взаимодействия, длина кристалла 10 мм). Эффективность преобразования во вторую гармонику была равна 6%. Важной особенностью этих исследований является анализ влияния длины ( $d$ ) факелов лазерной плазмы на увеличение нелинейного отклика среды. Присутствие свободных электронов может изменить условия фазового согласования между волнами основного импульса и излучения гармоник. В ряде случаев микропроцессы (в частности, отклик отдельных частиц) становятся преобладающими по сравнению с макропроцессами (к которым относятся коллективные эффекты фазового согласования), и в этих условиях интенсивность третьей гармоники будет квадратично зависеть от длины нелинейной среды ( $I_{3Г} \propto d^l$ , где  $l = 2$ ). Эта зависимость была проанализирована в нескольких плазменных факелах и

получена максимальная эффективность преобразования в третью гармонику в пределах  $10^{-5} \div 10^{-3}$ .

Схема экспериментальной установки использованной для генерации высших гармоник в лазерной плазме приведена на рис. 12. В качестве источника излучения также использовался Nd:YAG лазер ( $\lambda=1064$  нм) с пассивной синхронизацией мод, генерирующий цуг импульсов с длительностью отдельного импульса 38 пс и работающий с частотой повторения импульсов 1,5 Гц. После выделения одиночного импульса и его усиления в двух усилителях излучение разделялось на две части. Первая часть излучения (энергия в импульсе  $\sim 5$  мДж) использовалась в качестве греющего импульса (ГИ) и направлялась через фокусирующую линзу (ФЛ) на поверхность мишени (М), расположенной в вакуумной камере (ВК).



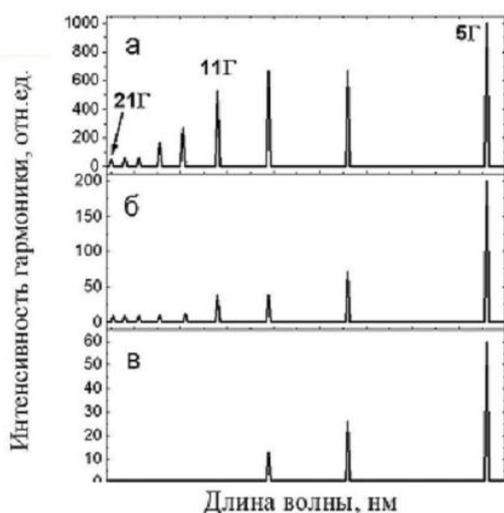
ЗИ – пикосекундное зондирующее излучение; ГИ – пикосекундное греющее излучение; З – зеркало; ФЛ – фокусирующие линзы; ВК – вакуумная камера; М – мишень; ВМ – вакуумный монохроматор; Р – дифракционная решетка; СН – салицилат натрия; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

**Рис. 12. Схема экспериментальной установки**

Максимальная использовавшаяся интенсивность греющего импульса была  $\sim 10^{11}$  Вт·см<sup>-2</sup>. Вторая часть лазерного импульса – зондирующий импульс, (ЗИ); энергия в импульсе – 28 мДж после определенной временной задержки фокусировалась параллельно поверхности мишени в область плазменного факела. Максимальная интенсивность зондирующего импульса составляла  $4 \times 10^{13}$  Вт·см<sup>-2</sup>. Для определения оптимальной временной задержки между импульсами в диапазоне 5÷150 нс проводилось исследование эффективности ГВГ для разных задержек. Излучение зондирующего импульса и высших гармоник анализировалось в вакуумном монохроматоре (ВМ) ВМР-2. Излучение гармоник в диапазоне 50÷300 нм детектировалось с помощью сцинтиллятора (салицилат натрия, СН) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Мишени представляли собой пластины размерами 5×5×2 мм<sup>3</sup>. В качестве материалов мишени использовались различные металлы (медь, хром, цинк, молибден, титан, олово, свинец, тантал, марганец, золото, серебро, бор, алюминий), а также углеродосодержащие материалы (графит, стеклоуглерод, пирографит, карбид бора,

карбид кремния, стержень карандаша). Для изменения положения мишени и, соответственно, области взаимодействия плазмы с зондирующим излучением относительно плоскости мишени использовался трехкоординатный манипулятор.

Проведенные эксперименты продемонстрировали высокие значения эффективности преобразования излучения в генерации пятой и седьмой гармоники, что служит предпосылкой для создания эффективного источника когерентного излучения пикосекундных импульсов в диапазоне 100÷200 нм. На рис. 13 представлены спектры высших гармоник, полученные в плазме



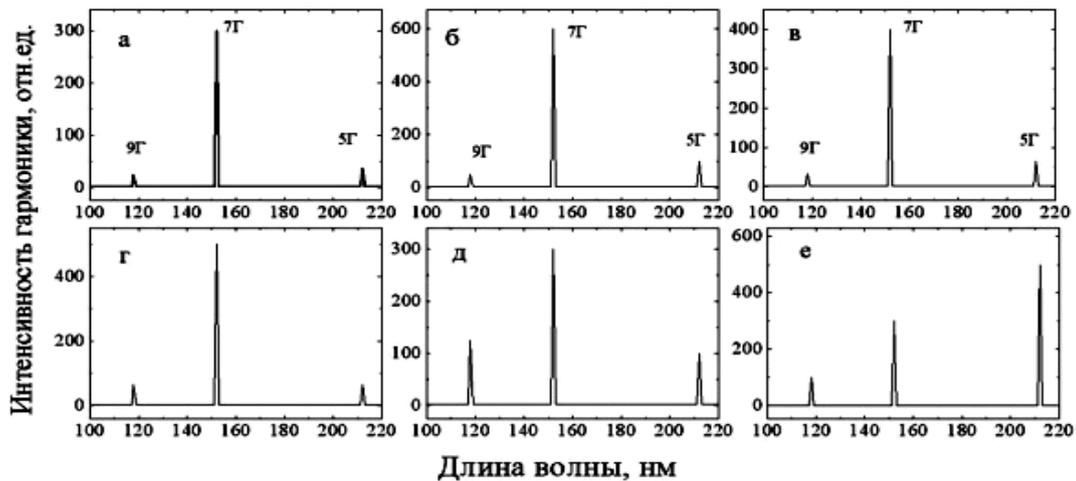
а – олово; б – хром; в – алюминий

**Рис. 13. Спектральное распределение высших гармоник в плазме**

Sn, Cr и Al. Значения эффективности генерации высших гармоник в плазме Sn и Cr, соответственно самые высокие и самые низкие во всем спектральном диапазоне распределения гармоник (рис. 13а и 13б) по сравнению с другими материалами. Следует отметить, что, несмотря на существенное различие материалов, большинство исследованных плазменных образований обладало сравнимыми значениями эффективности. Измеренные значения эффективности генерации седьмой гармоники (152 нм) в ряде материалов достигали  $\sim 10^{-4}$ .

В плазме олова эффективность преобразования в 11-ю гармонику (97 нм) была всего в 2 раза меньше и составила  $\sim 0,5 \times 10^{-4}$ . Отметим, что и в остальных материалах эффективность преобразования в диапазоне между 13 и 21-й гармониками составила  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ .

Генерация высших гармоник излучения пикосекундного лазера проводилась в плазме углеродсодержащих материалов с потенциалом ионизации атомов и однократно заряженных ионов углерода выше потенциалов ионизации металлов. При оптимальной абляции графита плазма практически полностью состоит из нейтральных атомов и однократно заряженных ионов. В экспериментах были получены высшие гармоники вплоть до 21-го порядка. Важной особенностью приведенных экспериментов по ГВГ в большинстве углеродсодержащих плазменных формирований было наблюдение усиленной 7-й гармоники (рис. 14а-14д). Обнаружено 7 кратное превышение эффективности 7-й гармоники по сравнению с эффективностью 5-й гармоники. Отметим, что в соответствие с теорией возмущения интенсивность каждой последующей гармоники должна быть, как правило, в 2 раз меньше интенсивности гармоники предыдущего порядка.



а – графит; б – стеклоуглерод; в – грифель; г – пирографит;  
 д – карбид кремния; е – карбид бора

**Рис. 14. Распределение интенсивностей 5, 7 и 9-й гармоник в плазме углеродсодержащих мишеней**

Значение эффективности в 6 раз превосходило эффективность генерации более низкой (5-й) гармоники, начиная с минимальной интенсивности зондирующего излучения  $7 \times 10^{12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ , при которой уверенно регистрировался сигнал гармоник, и заканчивая максимальной интенсивностью ( $4 \times 10^{13} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ ). В плазме пирографита при интенсивности зондирующего излучения  $1,2 \times 10^{13}$ ,  $2,5 \times 10^{13}$  и  $3,7 \times 10^{13} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  соотношение интенсивности седьмой и пятой гармоник составило 5,5, 4,5 и 8,3, соответственно. Изменение нелинейного отклика на определенных частотах излучения возможно благодаря резонансным переходам в атомах и ионах. Атомы и ионы углерода имеют ряд переходов с длиной волны, близкой к длине волны 7-й гармоники излучения Nd:YAG лазера ( $\lambda = 152 \text{ нм}$ ).

Исследования генерации высших гармоник были продолжены в протяженных лазерных факелах, созданных с использованием цилиндрической фокусировки греющего излучения на поверхности ряда металлических мишеней. В ходе этих экспериментов были проанализированы характеристики высших гармоник, генерируемых в длинных плазменных факелах и сравнены со случаем относительно короткой плазмы. Установлено повышение эффективности гармоник низшего порядка и увеличение области платообразного распределения гармоник в случае 4-мм плазмы по сравнению с 0,5-мм средой. Согласно результатам исследований использование протяженных факелов лазерной плазмы для генерации высших гармоник имеет ряд преимуществ. Применение длинных факелов лазерной плазмы может быть использовано для квазисинхронизма между основной волной и волнами гармоник. Для этого следует осуществить модификацию протяженных плазменных сред и использовать группы плазменных факелов с размерами, равными длине когерентности генерируемых гармоник. На основе анализа особенностей по усилению интенсивности одиночных гармоник в области

100÷200 нм, установлено следующее. Усиление интенсивности одиночных гармоник проявляется в виде роста нелинейно-оптического отклика плазменного факела углеродсодержащих мишеней на длине волны 7-й гармоники вследствие близости сильного резонансного перехода нейтральных атомов углерода ( $\text{C I}, \lambda = 148 \text{ нм}$  и  $\text{C I}, \lambda = 156 \text{ нм}$ ). Показано, что в плазме углерода нелинейное фазовое рассогласование приводит к насыщению интенсивности 5-й гармоники и наблюдаемому превышению 7-й гармоники над 5-й в широком диапазоне интенсивностей лазерного излучения и концентрации плазмы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что для формирования наночастиц в вакууме и окружающих газах существенную роль играют процессы столкновения частиц плазмы, образованной после воздействия пикосекундных импульсов на поверхности мишени в различных условиях.

2. Показано, что коэффициент нелинейного поглощения излучения на длине волны 532 нм в 25 раз превышает аналогичный параметр для длины волны 1064 нм, что обусловлено наличием как насыщенного поглощения, так и двухфотонного поглощения исследуемых образцов. Оптическое ограничение в растворе  $\text{C}_{60}$  на длине волны 532 нм соответствует с результатами исследований нелинейного поглощения.

3. Экспериментально измерены нелинейный показатель преломления и коэффициент нелинейное поглощение жидких органических материалов. Обнаружено изменение знака нелинейного поглощения с ростом интенсивности лазерного излучения в глицерине.

4. Впервые продемонстрированы преимущества использования периодической плазмы по сравнению со сплошной плазмой для эффективной генерации третьей и четвертой гармоники. Обнаружено 8-кратное повышение эффективности генерации третьей гармоники в случае структурированной плазмы с периодом 0,15 мм по сравнению со сплошной лазерной плазмой.

5. Продемонстрировано эффективное преобразование частоты пикосекундного излучения в высшие гармоники в плазме металлов в спектральном диапазоне 50÷220 нм.

6. Получена эффективность преобразования в 11-ю гармонику ( $\lambda = 97 \text{ нм}$ )  $\sim 0,5 \times 10^{-4}$  в плазме олова. Эффективность преобразования в диапазоне между 13 и 21-й гармониками для большинства плазменных образований составила  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ .

7. Впервые обнаружена особенность генерации 7-й гармоники в плазме углеродсодержащих материалов, интенсивность которой превышала в 7 раз интенсивность 5-й гармоники.

8. Получено, что превышение 7-й гармоники над пятой в широком диапазоне интенсивностей лазерного излучения и концентрации плазмы обусловлено влиянием керровских нелинейностей.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF  
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.FM/T.12.01 at THE PHYSICAL-  
TECHNICAL INSTITUTE OF SCIENTIFIC-PRODUCTION  
ASSOCIATION «PHYSICS-SUN», INSTITUTE OF ION-PLASMA AND  
LASER TECHNOLOGIES AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

**INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES**

**BOLTAEV GANJABOY SAPAEVICH**

**NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF PLASMA, ORGANIC AND  
CLUSTER MEDIA**

**01.04.11 – Laser physics (physical and mathematical sciences)**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Tashkent – 2016**

**The subject of doctoral dissertation is registered at Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number 12.05.2015/B2015.1.FM200.**

Doctoral dissertation is carried out at the Institute of Ion-plasma and laser technologies Uzbekistan Academy of Sciences.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, and English) is placed on web page to address ([www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz)) and on Information-educational portal «Ziyonet» to address ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific consultant:**

**Ganeev Rashid Ashirovich**

doctor of sciences in physics and mathematics

**Official opponents:**

**Azamatov Zakirjon Taxirovich**

doctor of sciences in physics and mathematics

**Yusupov Djavdat Bakidjanovich**

doctor of sciences in physics and mathematics

**Nizamov Nemat Nizamovich**

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**Leading organization:**

**National University of Uzbekistan**

Defense will take place on «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 at \_\_\_\_\_ at the meeting of scientific council 16.07.2013.FM/T.12.01 at Physical Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University.(Adress: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor street, phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

Doctoral dissertation is registered in Library at Physical Technical Institute № \_\_\_\_, it is possible to review it in Library (100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor Street. Phone: (+99871) 235-30-41).

Abstract of dissertation sent out on «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 year.

(mailing report № \_\_\_\_\_ dated \_\_\_\_\_ 2016 year).

**S.L. Lutpullayev**

Chairman of Scientific council

on award of scientific degree of doctor of sciences

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

**A.V. Karimov**

Scientific secretary of Scientific Council

on award of scientific degree of doctor of sciences doctor

of sciences in physics and mathematics, professor

**S.A. Bakhramov**

Chairman of disposable Scientific seminar at Scientific council

on award of scientific degree of doctor of sciences

doctor of sciences in physics and mathematics, professor

## **Introduction (Annotation of doctoral dissertation)**

**Topicality and demand of the subject of dissertation.** Currently, in the world ongoing development of laser technologies and nonlinear optics, the problem connected with research of optical nonlinearities of various orders and processes which take place during propagation of ultrashort laser pulses in plasma, organic and cluster media is extremely actual one. The present researches are connected with application of new materials and new devices based on nonlinear optical effects for various areas of science and technique such as processing and creation of new materials, telecommunication and computer science, metrology, transfer and processing of signals, medicine, gene engineering and many others.

The application of nanomaterials requires study of optical and nonlinear-optical parameters and mechanisms of their formation in various spectral and temporal ranges. Among the most interesting nonlinear optical processes in the media containing nanoparticles as well as in carbon-containing materials, attention is drawn by nonlinear change of the refraction index, determined by optical Kerr effect, nonlinear absorption as a result of multiphoton absorption or reverse saturated absorption and saturated absorption. The last, depending on its relaxation time, plays the decisive role in one of the most important applications of such nanoparticles in laser physics - their usage as media for passive mode locking at generation of ultrashort light pulses. The research of frequency conversion of ultrashort laser pulses in such media in ultraviolet and soft X-ray spectral ranges, i.e. in such spectral ranges, where there is no direct laser generation, is also important.

Demand of the subject of the dissertation is determined by the need for the development of a technique of laser ablation for preparation of nanostructured materials and technique of high order harmonic generation in plasma formations, and also increases of conversion efficiency of energy in materials with high nonlinearity. Besides, the experimental results on nonlinearities of nanomaterials are extremely claimed for one of major problems of laser physics and nonlinear optics, namely development of highly effective nonlinear elements on base of nanostuctured metals.

The complex of measures taken by the development country on development of systems of regional and territorial automated control and creation of united information space are directed on broad introduction of information systems based on modern information communication technologies. In this connection, the definition and analysis of nonlinear-optical parameters and processes proceeding at propagation of ultrashort laser pulses in plasma, organic, and cluster media, continues to remain one of the priorities of laser physics and nonlinear optics ensuring of development of adjoining areas of a science and technique.

This thesis is devoted to solving in a certain the problems noted in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan DP-1442 «On the priorities of industrial development of Uzbekistan in 2011 – 2015» of 15 December, 2010.

**Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan.** The dissertation is carried out

according to priority directions of science and technology development: F2 “Physics, astronomy, power engineering and engineering industry”.

**International review of scientific researches on the theme of dissertation.** Investigation of nonlinear optical processes, which appear at propagation of ultrashort laser pulses in plasma, organic and cluster media, are performed in scientific centers of Wilhelm Westfalische University (Munster, Germany), Institute for Solid State Physics of University of Tokyo (Kashiva, Japan), Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (Indore, India), Imperial College (London, United Kingdom), Institute for General Physics (Moscow, Russia), Rokasolano Institute for Physical Chemistry (Madrid, Spain), National Institute for Scientific Research (Montreal, Canada) and many other scientific centers of the World.

A number of actual problems are solved in the world, there are received the following scientific results. During formation of nanostructures of silver, tin and gold in vacuum conditions under laser ablation, 30÷300 nm-sized nanoparticles of these materials were obtained. The saturated absorption at wavelength of 1054 nm was found during investigation of nonlinear optical parameters of solution of platinum nanoparticles. Usage of solution of platinum nanoparticles as passive modulator of laser radiation at the wavelength of 1054 nm was suggested. Research of various order nonlinearities of nanoparticles of gold, palladium, ruthenium and platinum was made at wavelength of 792 nm.

Currently, nanoparticles, carbon-containing materials and the laser plasma media which created on a surface of solid targets are widely used in nonlinear optics and laser physics. In connection with the scientific research works on investigation of nonlinear optical properties of materials in the field of ultrashort pulses are carried out.

**Degree of study of the problem.** In works of Mehendale S. C., Mishra S. R. et al. (India) the analysis of nonlinear optical parameters of suspension of metal nanoparticles in the field of low-power light wave with nanosecond pulses was carried out. Besides, the nonlinear optical response is caused by thermal nonlinearity of colloid solution of nanoparticles.

Russian authors Fedotov A. B., Gladkov S. M., et. al. investigated the low and high-order harmonics generation at propagation of laser radiation in plasma media. In these works necessity of optimization of plasma parameters for improvement of conditions for high order harmonics generation in plasma created on the surface of solid materials during laser ablation is discussed. However, expected conversion efficiency of energy of laser radiation to energy of harmonics are not received. There is a deterioration of conditions of effective conversion of frequency of radiation in strongly excited and high-temperature plasma that does not allow receiving the high orders harmonics generation.

Uzbek scientists, in particular, Ganeev R. A., Kulagin I. A., and Usmanov T. B. were analyzed nonlinear optical properties of glasses and films doped by metal nanoparticles, and also studied the high harmonic generation using high ionized plasmas. But, in these studies, the energy conversion efficiency of laser radiation

into high harmonics was low. However have not information about investigation by increase conversion efficiency energy using weak ionized plasmas and increase of efficiency of single harmonics in resonant conditions.

**Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works.** Dissertational research has been carried out in the frame of following projects of Institute Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences. topic FA-F2-F049 - Investigation of high-order harmonic generation in vacuum ultraviolet spectral range and nonlinear optical properties of materials (2007-2011), and F2-FA-F160 - Investigation of optical parametric enhancement of chirped laser pulses and nonlinear interaction of femtosecond radiation with matter (2012-2016), International research grants of TWAS (09-113 RG/PHYS/AS\_G - UNESCO FR:3240232129) «High order harmonic generation of laser radiation in plasma using picosecond laser pulses» (2010-2012) and (12-040 RG/PHYS/AS\_G - UNESCO FR:3240271323) «High-order harmonic generation of picosecond radiation in laser-produced plasma in the extreme ultraviolet range» (2012-2014); as well as program of Committee for coordination science and technology development under the Cabinet Ministers of Uzbekistan (M/RUz-FRG-69/2013) «High-order harmonic generation of laser radiation in periodical plasma structures» (2013-2015).

**Purpose of research** is studying regularity of nonlinear optical processes at propagation ultrashort pulses in plasma, organic and cluster media.

To achieve this goal the following **tasks of research** were formulated:

to determine the regularities of formation of metal clusters during process of laser ablation in a liquid and in vacuum as well as under different pressures of buffer inert gases;

to investigate the influence of parameters of picosecond laser radiation on the efficiency of nonlinear optical processes in suspensions of clusters of metals;

to determine experimentally nonlinear optical parameters of fullerenes and to perform the analysis of optical limiting in colloid solution of C<sub>60</sub> in toluene;

to investigate two-photon absorption and influence of Kerr nonlinearities on the processes of propagation of powerful laser radiation in organic materials;

to define optimal conditions of generation of optical harmonics in the plasma media created on surfaces of solid-state targets during laser ablation process;

to develop the methodology of creation of multijet laser plasma for enhancement of efficiency of generation of high harmonics in conditions of quasi phase matching.

**Objects of research** of dissertation were the nanoparticles of organic and inorganic materials, plasma media.

**Subject of research** was the interaction of ultrashort laser radiation with matter.

**Methods of research.** Z-scan method, harmonic generation of laser radiation, method of laser ablation and method of electronic microscopy.

**Scientific novelty of dissertational research** consists in the following results:

formation of metal clusters in the process of laser ablation at various pressures of buffer inert gases was studied and threshold values of pressures of various gases has been found at which nanoparticles have formed;

regularities in the dependence of formation of metal nanoparticles on duration and intensity of laser pulses during laser ablation were established. Nanomaterials were created from nanoparticles of silver and copper with the sizes of 20 and 60 nm correspondingly;

values of nonlinear absorption coefficients and nonlinear refraction indices in suspensions of Pd, Ru, Au and Mn nanoparticles have been measured in the intensity range  $I = 9 \times 10^9 \div 1,7 \times 10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  at the wavelengths 1064 and 532 nm with pulse duration of 50 picoseconds. It was found that coincidence of frequency of the second harmonic of Nd:YAG laser (wavelength  $\lambda_{2\omega} = 532 \text{ nm}$ ) with the frequency of surface plasmon resonance (wavelength  $\lambda_p \sim 530 \text{ nm}$ ) for Au nanoparticles led to growth of nonlinear absorption coefficient;

possibilities of creation of protective devices for sensors based on optical limiting of powerful laser pulses in colloid solution of  $C_{60}$  in toluene were founded. Dynamics of change of the sign of nonlinear absorption coefficient was demonstrated in glycerin with the growth of laser radiation intensity which is determined by the influence of two photon absorption and saturated absorption;

increasing efficiency of the 7<sup>th</sup> harmonic relative to 5<sup>th</sup> harmonic due to influence of Kerr nonlinearities in plasmas of carbon-containing materials was found;

a technique for creation of multijet near-surface laser plasma was suggested for quasi-phase matching generation of high harmonics of laser radiation on the base of perforation of the surface of aluminum targets. Possibilities for production of periodically structured plasma with the period from 0.15 to 0.5 mm. Eightfold enhancement of intensity of the third harmonic in structured plasma with the period of 0.15 mm compared with extended plasma.

**Practical results of research.** Nanoparticles of some metals were obtained as a films and suspension by means of the laser ablation at vacuum conditions and in liquids. Indices of nonlinear absorption and refraction in the suspensions of metal nanoparticles, organic materials and fullerenes have been measured using the Z-scan technique. Possibilities of efficient high harmonic generation of picosecond laser radiation in laser plasma plumes were demonstrated. This extends the spectral range for production of coherent light in vacuum ultraviolet spectral range.

**Reliability of obtained results.** The automated system of the measurements of the nonlinear optical parameters of different media, which is based on the Z-scan method, was calibrated by means of the measurement of nonlinear optical parameters are confirmed by their consistency with the results of other authors including basic theoretical points.

**Scientific and practical value of the results of the research.** The scientific and practical value of research results consist in following. The advanced technique allows synthesize nonlinear-optical materials on a base of nanoparticle of silver, copper, and manganese with high values of nonlinear-optical parameters

using method of laser ablation in a field of picoseconds pulses. The presence of two-photon absorption in the solutions of fullerenes can be used for creation of the efficient optical limiters of picosecond radiation and creation of resonant conditions, which provide the growth of conversion efficiency of single harmonic, allows the improvement of the energy characteristics of coherent pulses in the vacuum ultraviolet spectra to substantial extent.

**Application of the work.** The technique of creation of near-surface multijet laser plasma developed in the dissertation which provides tenfold increase of efficiency of diagnostics of nonlinear optical parameters of organic and inorganic materials was used at completion of scientific research in the frame of the research project "Nonlinear optical applications of various materials and techniques in biomedicine" initiated by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS KAKENHI Grant No. 24760048. letter from the Center for Ophthalmology and Advanced Lasers of the Saitama Medical University on 17.04.2015).

**Approbation of work.** The main results of dissertation were reported on the following conferences and symposiums: «Development of innovational technologies on the views of young scientists» conference, Tashkent, 2010; International conference «Laser Optics» (St. Petersburg, Russia, 2012); International conference for coherent and nonlinear optics (Kazan and Moscow, Russia, 2010 and 2013); Republican theoretical and practical conference «Nanotechnology, usage of renewable power sources: problems and solutions» (Karshi, 2012); International scientific conference of students, aspirants and young scientists «Lomonosov-2012» (Moscow, 2012); International conference «Actual problems of physical electronics» (Tashkent, 2012); II International conference «OPTICS AND PHOTONICS-2013» (Samarkand, 2013); International conference «IPEC-6» (Tashkent, 2013); TWASROCASA, Regional conference for young scientist on the «Nanoscience & Nanomaterials» (Bangalore, India, 2015); as well as seminars at the joint seminar of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies Uzbekistan Academy of Sciences (15.04.2015) and at the seminar of Scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical-Technical Institute of Scientific-Production Association «Physics-Sun», Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University (19.01.16).

**Publication of results.** Results obtained on the topic of the dissertation are represented in 29 scientific works, which fully reflect its content. 14 of them are scientific articles in peer-reviewed international journals, 15 these were published in the proceedings of international and republican conferences.

**Structure and volume of dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion and list of references. The work contains 191 pages of main text, including 67 figures and 3 tables.

## MAIN CONTENT OF DISSERTATION

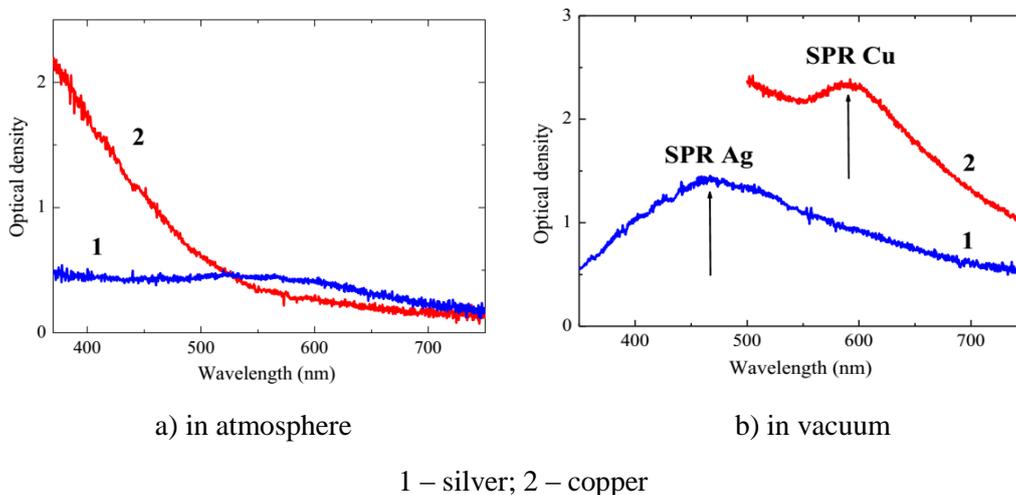
**In the introduction** a topicality, actuality and demand of the theme of dissertation is proved, the purpose and problems, and also object and an object of

research are formulated, conformity of research to priority directions of development of science and technologies in the Republic of Uzbekistan is stated, scientific novelty and practical results of research are stated, reliability of obtained results is proved, the scientific and practical importance of obtained results is revealed, the list of introductions in practice of research results, data on published works and dissertation structure are given.

The first chapter «**A review of references and conditions on investigation of the nonlinearity of plasma, organic, and clusters media**» a review of references on investigation of the nonlinear optical properties of plasma formations, metal clusters, and organic materials are analyzed.

In the second chapter «**Methods of preparation and main properties of nanoparticles**» of the dissertation, the results of investigation of the dependence of formation of metal nanoparticles on the concentration of buffer gases in the process of laser ablation of metals by pulses of picosecond duration are presented. The dimensionally characteristics of nanoparticles are analyzed by using electron microscope. Formation of nanoparticles can be described as a process of fast excitation of electron gas and transfer of excitation energy to an atomic cell with further process of aggregation, which goes on during ablation, recession of products of evaporation and material sputtering.

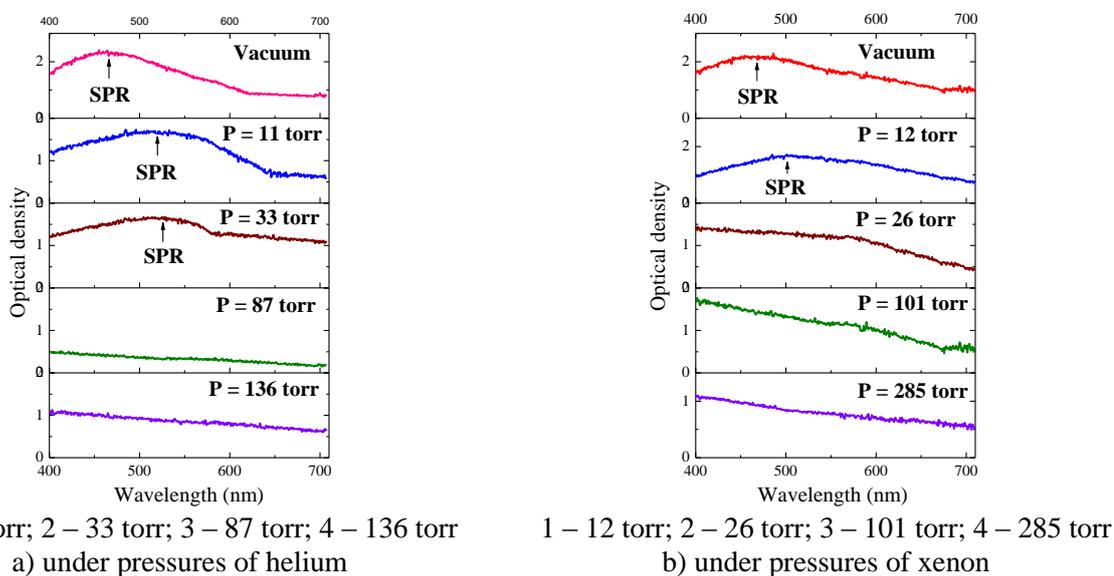
Spectral measurements show the presence of surface plasmon resonance in the transmission spectra of the samples (Fig. 1), which were deposited on the surfaces of glass substrate.



**Fig. 1. Absorption spectra of deposited films in various conditions**

As the microphotography of the samples show, the formation of metal nanoparticles in vacuum conditions is accompanied by the appearance of comparatively uniform distribution of clusters on the surface of glass substrates. Their appearance is confirmed by the presence of surface plasmon resonance in the absorption spectra of sputtered samples. In the end of the chapter it is shown that the probabilities of formation of silver clusters depend strongly on the concentration of buffer inert gases.

For the first time the formation of metal clusters under different pressures of buffer inert gases was analyzed and the thresholds for pressure of helium ( $P \approx 33$  torr) and xenon ( $P \approx 12$  torr) were found, above which the process of nanoparticle aggregation became hardly probable, and no surface plasmon resonance peaks appeared in absorption spectra of the samples (Fig. 2).

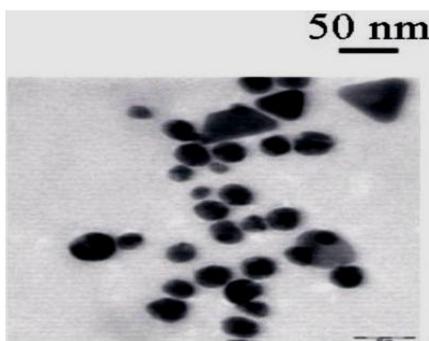


**Fig. 3. Absorption spectra of silver films, which were deposited in vacuum conditions and under various pressures of noble gases**

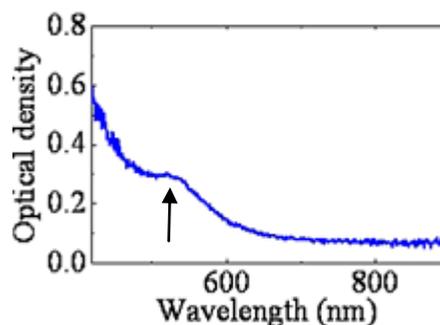
In the third chapter «**Features of nonlinear optical characteristics of metallic nanoparticles**» of the dissertation, the results of measurement of the nonlinear optical characteristics of suspensions of nanoparticles of ruthenium, palladium, gold and manganese by Z-scan method are shown.

The initial concentration of these suspensions was equal to 10 mM in the case of gold and 20 mM in the case of ruthenium and palladium. In the experiment, the suspensions with weight fraction of nanoparticles of palladium  $2 \times 10^{-4}$ , ruthenium  $4 \times 10^{-4}$ , and gold  $2 \times 10^{-4}$  were used. At such concentrations, significant surface plasmon resonance peaks were observed in the linear absorption spectra. To determine the size and morphology of the nanoparticles the method of electron microscopy was used. Spectral measurements were made using the USB-2000 spectrometer. The samples were placed in a quartz cell with thickness of 3 mm. In some cases polyvinyl pyrrolidone and polyetylenimin, which prevent nanoparticle aggregation, were added to the suspensions. As the solvents for these suspensions, distilled water, ethanol, and n-propanol were used. In Fig. 3 the images of gold nanoparticles are shown. Nanoparticles of gold, ruthenium, and palladium had the sizes of  $15 \div 30$  nm, 3.4 nm and 2.5 nm. In the solution the nanoparticles generally had the spherical and in some cases trigonal form. In fig. 4 the absorption spectra of the Au nanoparticles suspension is presented. The peak of surface plasmon resonance was in the range of 530 nm that is characteristic for the Au nanoparticles

with sizes of 30 nm. Surface plasmon resonance of the suspensions of nanoparticles of palladium and ruthenium were in the range of 305 nm and 240 nm.



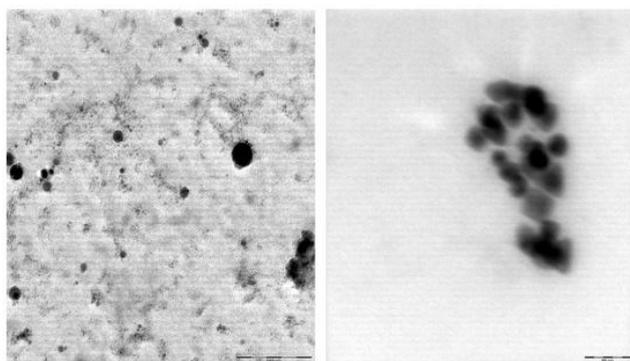
**Fig. 3. Microphotography of gold nanoparticles**



**Fig. 4. The absorption spectrum of the Au nanoparticle suspension in the 3-mm thick quartz cell**

The solution of manganese nanoparticles was prepared during laser ablation of manganese in a liquid. As a source of radiation for preparation of the solutions of manganese nanoparticles the Nd:YAG laser with passive mode locking of linear modes was used. The duration of the pulses, which followed at 2 Hz frequency, was 50 ps. The samples were placed in a quartz cell with ethanol or other organic solvents. Laser radiation ( $E=3$  mJ) was focused by the lens with 8 cm focal length on the surface of the sample, which was placed near the rear wall of the cell to prevent the optical breakdown of the front wall. The sample was irradiated for 30 min. As a result of laser ablation the manganese nanoparticles were deposited in the liquid medium. Weight fraction of manganese nanoparticles during this

procedure of production was  $2 \times 10^{-4}$ . In Fig. 5 the microphotography of manganese nanoparticles is presented.



a – immediately after laser ablation; b – after two weeks. The markers on the pictures correspond to:  
a – 200nm; b – 50 nm

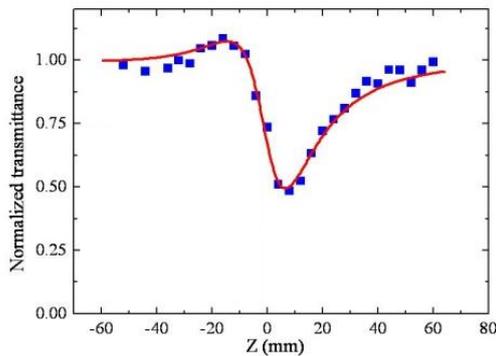
**Fig. 5. Microphotography of manganese nanoparticles**

The prepared nanoparticles originally had mainly spherical shape, but after sometime, the nanoparticles of trigonal and square shape were appeared. In the prepared solutions, the sizes of nanoparticles were in the range of 6÷50 nm (Fig. 5a). After 15 days, this distribution was narrowed to 7÷14 nm (Fig. 5b). After ablation the heavier nanoparticles sank under the

influence of gravitational forces and only nanoparticles of small sizes remained in the solution, which do not sink due to the surface tension.

The results of systematic investigation of the nonlinear optical parameters of suspensions of the nanoparticles of palladium, ruthenium, gold and manganese using Z-scan method in the field of picosecond pulses were investigated at two wavelengths. The investigations of nonlinearities of nanoparticles have shown that,

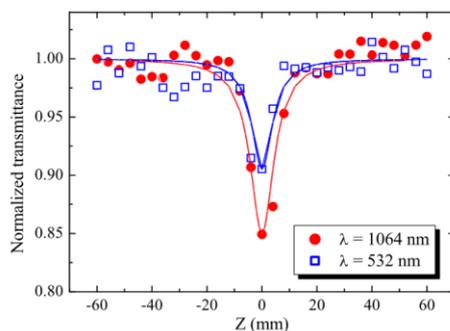
for Pd and Ru nanoparticles, the quantum size effect does not play an important role in the variation of their nonlinear optical properties in the near infrared ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) (Fig. 6).



**Fig. 6. The dependence of normalized transmission on the position of the cell with the suspension of palladium nanoparticles in the scheme with limiting aperture**

length of the second harmonic of Nd:YAG laser radiation ( $\lambda_{2\omega} = 532 \text{ nm}$ ) and in this case the high nonlinear optical response was observed. The measurements have shown that the saturation intensity and saturated absorption index of this suspension were equal to  $9 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  and  $-8 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ . At the same time the substantial increase of the nonlinear optical response of Pd and Ru nanoparticles can be expected in the short-wavelength spectral range (for example, at the wavelength of the fourth harmonic of Nd:YAG laser,  $\lambda_{4\omega} = 266 \text{ nm}$ ). However, it must be noted that in this spectral range the strong linear absorption is presented both in the ethanol, which was used as solvent, and in the surfactant species.

The influence of the surface plasmon resonance on the nonlinearities of Pd and Ru clusters in this case could be masked by the linear absorption in the ultraviolet range. One can also note that the investigations have shown that even for low-energy probe photons (with 1.17 eV energy) the examined nanoparticles of Pd and Ru have insignificant nonlinear refraction ( $\chi_{\text{Pd}} = -1.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ,  $\chi_{\text{Ru}} = -3 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ) and nonlinear absorption ( $\beta_{\text{Pd}} = 4 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$  and  $\beta_{\text{Ru}} = 8 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ ).



**Fig. 7. The dependence of normalized transmission on the position of the cell with the suspension of manganese nanoparticles in ethanol in the scheme without aperture at the wavelengths of 1064 nm (round points) and 532 nm (squares)**

This observation was explained by the fact that the surface plasmon resonance frequencies of these samples are very distant from the frequency of Nd:YAG laser radiation (surface plasmon resonances of Pd and Ru nanoparticles are in the ranges of the wavelengths  $\lambda_p = 240$  and  $305 \text{ nm}$  respectively). For Au nanoparticles the wavelength of surface plasmon resonance ( $\lambda_p \sim 530 \text{ nm}$ ) almost matches with the wave-

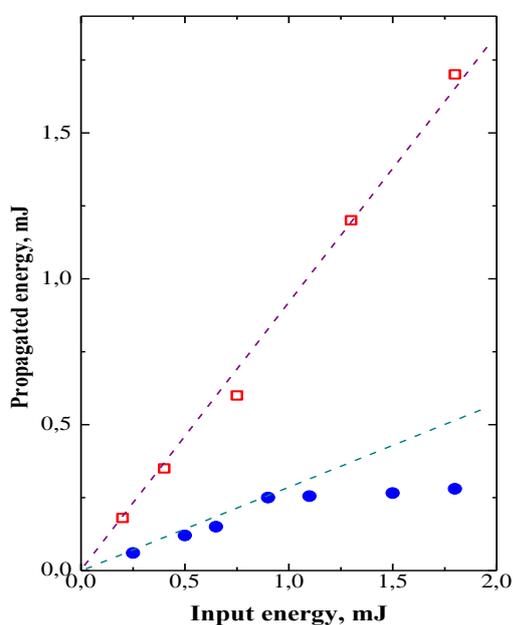
length of the second harmonic of Nd:YAG laser radiation ( $\lambda_{2\omega} = 532 \text{ nm}$ ) and in this case the high nonlinear optical response was observed. The measurements have shown that the saturation intensity and saturated absorption index of this suspension were equal to  $9 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  and  $-8 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ . At the same time the substantial increase of the nonlinear optical response of Pd and Ru nanoparticles can be expected in the short-wavelength spectral range (for example, at the wavelength of the fourth harmonic of Nd:YAG laser,  $\lambda_{4\omega} = 266 \text{ nm}$ ). However, it must be noted that in this spectral range the strong linear absorption is presented both in the ethanol, which was used as solvent, and in the surfactant species.

The influence of the surface plasmon resonance on the nonlinearities of Pd and Ru clusters in this case could be masked by the linear absorption in the ultraviolet range. One can also note that the investigations have shown that even for low-energy probe photons (with 1.17 eV energy) the examined nanoparticles of Pd and Ru have insignificant nonlinear refraction ( $\chi_{\text{Pd}} = -1.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ,  $\chi_{\text{Ru}} = -3 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ) and nonlinear absorption ( $\beta_{\text{Pd}} = 4 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$  and  $\beta_{\text{Ru}} = 8 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$ ). Then the nonlinear optical parameters of the solution of manganese nanoparticles in ethanol were investigated using the Z-scan method. It was presented here that the physical mechanism determining the self-defocusing process in the suspension of manganese nanoparticles at the wavelengths of 1064 nm and 532 nm is the optical Kerr effect, while the nonlinear absorption is determined by two-photon absorption or inverse saturated absorption

(Fig.7). Nonlinear optical parameters of the suspension of manganese nanoparticles were measured to be as follows: nonlinear refraction index  $\gamma = 8 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  and nonlinear absorption index  $\beta = 2 \times 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$  at the wavelength of 1064 nm and the corresponding parameters  $\gamma = 2 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  and  $\beta = 4 \times 10^{-13} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$  at the wavelength of 532 nm. The most important processes in the medium during propagation of powerful electromagnetic waves are the nonlinear change of the refraction index and nonlinear absorption of radiation.

In the fourth chapter «**Nonlinear optical characteristics of carbon-containing materials**» of the dissertation, the results of determination of nonlinear optical parameters in case of fullerene-containing media are presented. The results of measurements of the nonlinear absorption index of solution of  $\text{C}_{60}$  in toluene using Nd:YAG laser radiation at wavelengths of 1064 and 532 nm are discussed.

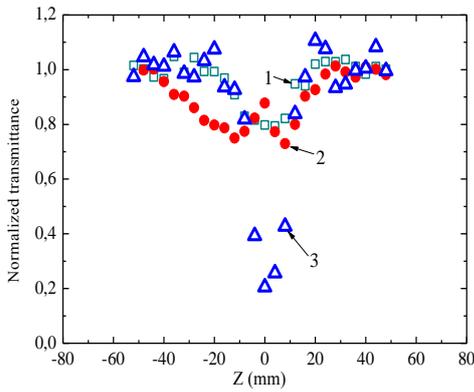
It was shown that in case of 50-ps radiation at the wavelength of 532 nm the nonlinear absorption 25 times exceeded analogous parameter for the case of 1064 nm radiation. Excess of this parameter at the wavelength of 532 nm is explained by the presence of both inverse saturated absorption and two-photon absorption of the given samples at the given wavelength.



**Fig. 8. The energy of the propagated radiation as a function of the energy of the original radiation for toluene (squares) and solution of  $\text{C}_{60}$  in toluene (circles)**

In Fig. 8 the results of experiments of the optical limiting are presented and the characteristic dependence of the energy of the radiation, which passed through the solution of  $\text{C}_{60}$ , on the energy ( $E$ ) of radiation at the wavelength  $\lambda = 532 \text{ nm}$  is shown. The transmission coefficient of solution was approximately constant up to  $E=0.85 \text{ mJ}$  (at the fluence of  $0.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Further increase of the pulse

energy led to a decrease of the energy of radiation, which had passed the solution of fullerenes. The investigation of optical limiting has shown a good correspondence with the data on nonlinear absorption. The results of experimental investigation of the nonlinear optical parameters of various liquid organic materials are presented. Investigation of the nonlinearities was carried out using the Z-scan in the near infrared and visible spectral ranges. It was shown that most of samples had a nonlinear absorption while some of the examined materials demonstrated strong nonlinear absorption and nonlinear refraction. The most interesting material was the glycerin (Fig.9), which demonstrated the competition between positive and negative nonlinear absorption with the growth of laser intensity and thickness of the sample.



- 1 –  $\lambda = 1064$  nm,  $I = 3 \times 10^{10}$  W·cm<sup>-2</sup>;  
 2 –  $\lambda = 1064$  nm,  $I = 8 \times 10^{10}$  W·cm<sup>-2</sup>;  
 3 –  $\lambda = 532$  nm,  $I = 2 \times 10^{10}$  W·cm<sup>-2</sup>

**Fig. 9. The dependences of the normalized absorption of the glycerin on the position of the cell for various intensities and wavelengths of laser radiation**

In general case, the dependence of absorption index on the intensity of laser radiation has the form:

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \beta \cdot I \quad (1)$$

where  $\alpha_0$  – is the linear absorption index;  $\beta$  – is the coefficient of nonlinear absorption, which is negative in case of saturated absorption. There are various models describing the saturated absorption. The absorption index in case of a system with two levels, which have the non-uniformly broadened states, can be written in the following way:

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{SA}]^{-0.5}. \quad (2)$$

where  $I(z)$  – is the intensity of the radiation passing through the sample;  $I_{SA}$  – is the saturation intensity. The following (“kinetic”) model is used for description of the nonlinear absorption in case of reduction of the population of the ground state:

$$\alpha(z) = \alpha_0 [1 + I(z)/I_{SA}]^{-1}. \quad (3)$$

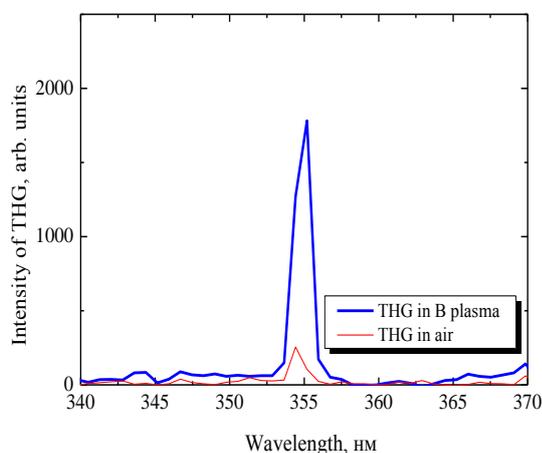
It is shown that the indices of nonlinear refraction and nonlinear absorption of the investigated organic media did not exceed the corresponding parameters for inorganic materials. The values of nonlinear refraction and nonlinear absorption of these samples (coefficients of saturated absorption  $\beta_{SA}$  and nonlinear absorption  $\beta_{NA}$ ) are presented in **Table 1**.

**Table 1**  
**The results of measurements of the nonlinear refraction indices and coefficients of nonlinear absorption of organic materials**

№	Samples	$\gamma, \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$		$\beta, \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$	
		$\lambda = 1064$ nm	$\lambda = 532$ nm	$\lambda = 1064$ nm	$\lambda = 532$ nm
1	Gasoline	$1 \times 10^{-18}$	$2 \times 10^{-18}$	$3 \times 10^{-14}$	$4 \times 10^{-14}$
2	Clock oil	$2 \times 10^{-19}$	$7 \times 10^{-19}$	$2 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-13}$
3	Glycerin			$\beta_{SA} = -2 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$
				$\beta_{NA} = +6 \times 10^{-14}$	
4	Polyphenyle ether	$1 \times 10^{-18}$	$6 \times 10^{-19}$	$4 \times 10^{-14}$	$3 \times 10^{-13}$

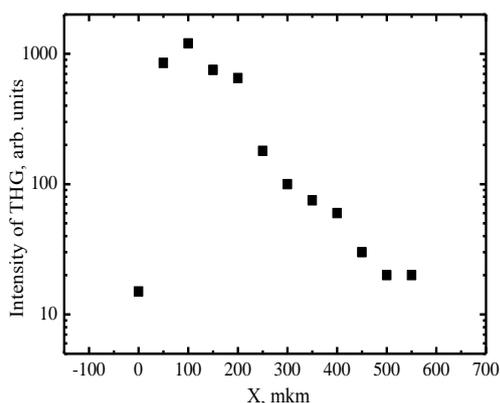
In the fifth chapter «**Harmonic generation of various order in plasma media**» of the dissertation is devoted to analysis of the results of investigation of the harmonic generation in laser plasma at various experimental conditions during propagation of laser pulses through the plasma prepared on the surfaces of various solid-state targets as a result of ablation using the heating pulses.

Further, the results for generation of the third and higher harmonics in



**Fig. 10. The spectrum of the third harmonic generated in boron plasma (thick curve) and air (thin curve) in case of the 50 ps pulse**

plasma formations of various targets are given. As the materials for ablation different metals (boron, titanium manganese copper, molybdenum, silver, and gold) were used. As the source of radiation the Nd:YAG laser ( $\lambda = 1064$  nm) with passive mode locking was used, which generated the pulse train with the duration of a single pulse of 38 ps and operating at the pulse repetition rate of 1.5 Hz. The experiments were made at the vacuum conditions and at the conditions of normal pressure of air (Fig. 10). For optimization of third harmonic generation the analysis of properties of the harmonics produced during laser ablation of targets and plasma formation was made. An important parameter of third harmonic generation optimization is the delay time between the heating and driving pulses.



**Fig. 11. The dependence between the intensity of third harmonic and the distance between the axis of propagation of the laser pulse and the surface of target**

Fig. 11 and is connected with the optimization of plasma parameters (the density of plasma and electrons and the degree of excitation of the particles) in the interaction region. An optimal distance has been determined to be 100  $\mu\text{m}$  between

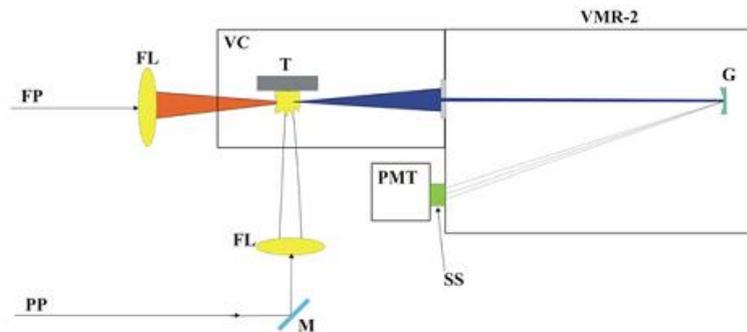
plasma formations of various targets are given. As the materials for ablation different metals (boron, titanium manganese copper, molybdenum, silver, and gold) were used. As the source of radiation the Nd:YAG laser ( $\lambda = 1064$  nm) with passive mode locking was used, which generated the pulse train with the duration of a single pulse of 38 ps and operating at the pulse repetition rate of 1.5 Hz. The experiments were made at the vacuum conditions and at the conditions of normal pressure of air (Fig. 10). For optimization of third harmonic generation the analysis of properties of the harmonics produced during laser ablation of targets and plasma formation was made. An important parameter of third harmonic generation optimization is the delay time between the heating and driving pulses.

The optimal time of delay for the third harmonic generation in these experiments was equal 25÷40 ns. The influence of the distance between the target and the optical axis of propagation of the driving radiation on the third harmonic generation efficiency has also been studied. This distance was changed during the experiments using the manipulator, which controlled the position of the target relative to the position of the optical axis of propagation of a driving pulse. The example of this dependence is presented in

the laser beam and the target at the delay time 30 ns.

Below we present the studies of low (third and fourth) order harmonic generation of picosecond laser radiation in the perforated plasma jets. The studies of the fourth harmonic generation using two-color pump of the long plasmas produced on various metal surfaces are presented. Part of the driving pulse was converted to the second harmonic in the nonlinear crystal (KDP, type I, crystal length 10 mm). The conversion efficiency of second harmonic was 6%. The important issue of these studies is the role of the length of plasma jet ( $d$ ) in variation of the nonlinear optical response of this medium. One can expect various scenarios in the case of presence of the free electrons, which can drastically change the phase matching conditions between the driving and harmonic waves. Once I assume that only microprocesses (related with single particle response) rather than macroprocesses (related with collective propagation effects, etc.) govern the yield of harmonic emission then the third harmonic intensity should follow the quadratic dependence on the length of nonlinear medium ( $I_{3H} \propto d^l$ , where  $l=2$ ). We analyzed these dependences in a few plasma plumes. The maximal conversion efficiency of the third harmonic was obtained to be  $10^{-5} \div 10^{-3}$  depending on the used plasma formations.

Below we describe the scheme of experimental set-up for the high-order harmonic generation in the laser-produced plasmas. The Nd:YAG laser ( $\lambda = 1064$  nm,  $t = 38$  ps, 1.5 Hz pulse repetition rate) was used as in previous studies. After the extraction of a single pulse and its enhancement in two amplifiers the radiation was split into two parts. This radiation (pulse energy  $\sim 5$  mJ) was used as a heating pulse (PP) (Fig. 12) and was directed through the focusing lens (FL) on the surface of the target (M), which was placed in the vacuum chamber (VC).

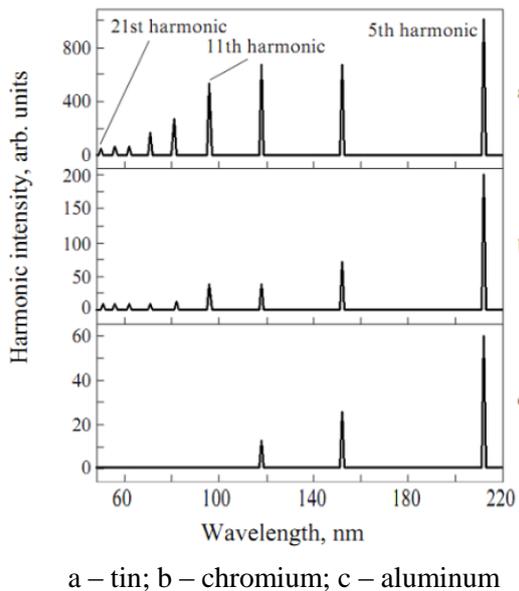


FP – fundamental picosecond pulse; PP – heating picosecond pulse; M – mirror;  
 FL – focusing lenses; VC – vacuum chamber; T – target; VMR-2 – vacuum monochromator; G –  
 grating; SS – sodium salicylate; PMT – photomultiplier tube

**Fig. 12. The scheme of the experimental setup**

The maximally used intensity of the heating pulse was  $10^{11}$  W·cm<sup>-2</sup>. The second part of laser radiation (fundamental pulse, FP, pulse energy  $\sim 28$  mJ) after a certain temporary delay was focused parallel to the surface of the target in the region of plasma jets. The maximal intensity of the fundamental pulse was  $4 \times 10^{13}$  W·cm<sup>-2</sup>. For definition of the optimal temporary delay between pulses in the range of 5 ÷ 150 ns the investigation of harmonic generation at different delays was

performed. The radiation of the probe pulse and the high harmonics was analyzed in the vacuum monochromator (VMR-2). The radiation of the harmonics in the range of 50÷300 nm was detected using the sodium salicylate (SS) and photomultiplier tube (PMT). The targets were as the 5×5×2 mm<sup>3</sup> sized plates. Various metals (copper, chromium, zinc, molybdenum, titanium, tin, lead, tantalum, manganese, gold, silver, boron and aluminum) and carbon-containing materials (graphite, glass-carbon, pyrographite, boron carbide, silicon carbide, and pencil lead) were used as the target materials.



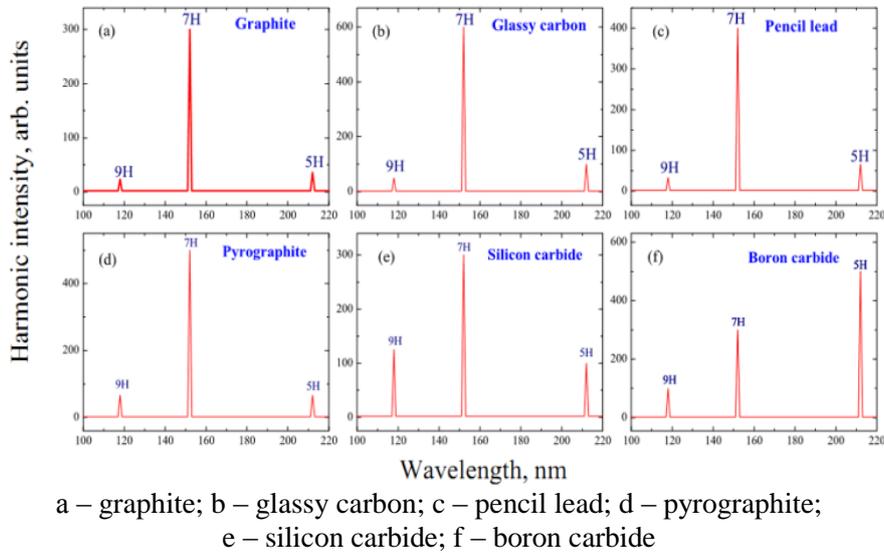
**Fig.13. Spectral distribution of high-order harmonics in the plasmas**

order harmonic generation efficiency in the Sn and Cr plasmas were correspondingly the highest and the lowest in the whole spectral range of generated harmonics (Figs. 13a and 13c) compared to other materials. One should note that despite a substantial difference of materials, most of the studied plasma formations allowed the comparable values of high-order harmonic generation efficiency. The measured values of efficiency of the seventh harmonic (152 nm) generation in a series of materials reached  $\sim 10^{-4}$ . The conversion efficiency of 11<sup>th</sup> harmonic (97 nm) in the tin plasma was only 2 times smaller ( $\sim 0.5 \times 10^{-4}$ ). Notice that in other materials the conversion efficiency in the range between the 13<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> harmonics was  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ . Below the results of the high-order harmonic generation of picosecond radiation in the carbon-containing plasmas are presented. The ionization potentials of atoms and singly charged ions of carbon are higher than the ionization potentials of metals. During the optimal ablation of graphite the plasma consists almost entirely of neutral atoms and singly charged ions. High-order harmonics up to the 21<sup>st</sup> order were obtained in the experiments. An important feature of these experiments of the high-order harmonic generation in most carbon-containing plasmas was the observation of enhanced 7<sup>th</sup> harmonic (Figs. 14a-14e). The 7 times enhancement of the efficiency of 7<sup>th</sup> harmonic

The three-coordinate manipulator was used to change the position of the target and, correspondingly, the area of plasma interaction with fundamental radiation relative to the plane of the target.

The experiments have demonstrated the high values of conversion efficiency into the 5<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> harmonics that create the prerequisite for the development of the efficient source of coherent radiation of picosecond pulses in the range of 100÷200 nm. In Fig. 13 the characteristic high-order harmonic generation spectra, obtained in Sn, Cr and Al plasmas are presented. The values of high-

compared to the efficiency of 5<sup>th</sup> harmonic was observed, while in accordance with perturbation theory of harmonic generation the intensity of each next harmonic should be 2 times weaker than the intensity of the harmonic of the lower order.



**Fig. 14. Distribution of intensities of the 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> harmonics generated in the plasma of carbon-containing targets**

The efficiency of 7<sup>th</sup> harmonic substantially exceeded the efficiency of generation of the lower (fifth) harmonic starting from the minimal intensity of laser radiation ( $7 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) up to the maximal intensity ( $4 \times 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) in many carbon-containing plasmas. Particularly in pyrographite plasma at the intensities of fundamental radiation of  $1.2 \cdot 10^{13}$ ,  $2.5 \cdot 10^{13}$ , and  $3.7 \cdot 10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  the ratios of intensities of the seventh and the fifth harmonics were 5.5, 4.5, and 8.3 respectively. The change of the nonlinear response at certain wavelengths is possible due to the resonant transitions of atoms and ions. Atoms and ions of carbon have a series of transitions with the wavelength close to the wavelength of the 7<sup>th</sup> harmonic of Nd:YAG laser ( $\lambda = 152 \text{ nm}$ ).

The studies of high-order harmonic generation have been continued in the long laser plasma plumes created using the cylindrical focusing of heating pulse on the surface of some metallic targets. We have analyzed the characteristics of the high-order harmonics generated in the long plasmas and compared these results with those obtained using relatively short plasma plumes. During these experiments we have demonstrated the growth of harmonic generation efficiency in the case of the lowest orders and the extension of the plateau-like distribution of harmonics in the case of 4-mm long plasmas compared with the 0.5-mm long medium. These studies have shown that use of extended plasmas for high-order harmonic generation has a number of advantages. The use of long plasmas can give the opportunity in observation of the quasi-phase-matching between the waves of driving and harmonic pulses. For this purpose one has to modify the long plasma media and to use the groups of plasma jets with the sizes equal to the coherence length of generated harmonics.

In this chapter, the important peculiarities of the enhancement of the intensity of single harmonic in the region of 100÷200 nm were demonstrated. The enhancement of the intensity of single harmonic is attributed to the growth of nonlinear optical response of carbon-containing plasma at the wavelength of the 7<sup>th</sup> harmonic due to the proximity of the strong resonant transitions of neutral carbon atoms (CI,  $\lambda = 148$  nm and CI,  $\lambda = 156$  nm). It was shown that a nonlinear phase mismatch in the carbon plasma is responsible for the saturation of harmonic signals and makes the 7<sup>th</sup> harmonic stronger than the 5<sup>th</sup> one over a broad range of laser radiation intensities, plasma densities, and plasma compositions.

## CONCLUSION

1. It was revealed that at formation of nanoparticles in vacuum and surrounding gases, the collision of plasma particles generated after irradiation of picosecond laser pulses on target surface plays an important role.

2. It was shown that the value of index of nonlinear absorption at the wavelength of 532 nm exceeds the corresponding parameter at the wavelength of 1064 nm in 25 times. This was induced by the presence of both saturated absorption and two-photon absorption in the studied samples. Optical limiting for the colloid solution of C<sub>60</sub> at the wavelength of 532 nm corresponds to research results on nonlinear absorption.

3. The nonlinear refraction and coefficient nonlinear absorption of liquid organic materials were experimentally investigated. A change of the sign of nonlinear absorption with the growth of intensity of laser radiation in glycerin has been observed.

4. For the first time, the advantages of using of periodical plasma compared with continuous one for efficient generation of the third and the fourth harmonics were shown. Eight fold enhancement of the third harmonic generation were obtained in the case of the structured plasma with period of 0.15 mm compared with the extended laser plasma.

5. An efficient frequency conversion of picosecond radiation into high harmonics in the metal plasma has been demonstrated in the 50÷220 nm spectral range.

6. At the 11<sup>th</sup> harmonic generation ( $\lambda = 97$  nm) in the tin plasma the conversion efficiency of  $\sim 0.5 \times 10^{-4}$  has been obtained. For most plasma formations generated on the target surface of various materials in the range between the 13<sup>th</sup> and 21<sup>th</sup> harmonics the conversion efficiency was  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ .

7. For the first time, the peculiarity of the 7<sup>th</sup> harmonic generation has been discovered in the plasma jet of carbon-containing materials. The intensity of this harmonic exceeded the intensity of the 5<sup>th</sup> harmonic in 7 times.

8. It was shown that excess of the 7<sup>th</sup> harmonic intensity over the 5<sup>th</sup> harmonic signal was caused by the influence of Kerr nonlinearities in a broad range of the intensities of laser radiation and plasma concentrations.

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

**I бўлим (I часть, part I)**

1. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T.. Nonlinear optical absorption and refraction in Ru, Pd and Au nanoparticle suspensions // Applied Physics B (Lasers and Optics), Springer, – USA, 2010. – Vol. 100, – No.3. – pp. 571 – 576 (No.1. Web of Science; IF=1,782).

2. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T., Baba M., Kuroda H.. Third harmonic generation in plasma plumes using picosecond and femtosecond laser pulses // Journal of Optics, – Printed in the UK and the USA, – 2010. – Vol. –23,– No.5. – pp. 055202 (No.40. ResearchGate; IF=2,01).

3. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T.. Nanoparticle formation during laser ablation of metals at different pressures of surrounding noble gases // Applied Physics A (Materials Science & Processing). Springer, – USA, 2010. – V.100, – No.1. – pp. 119 – 123 (No.40. ResearchGate; IF=1,69).

4. Ganeev R. A., Zakirov A. S., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T., Khabibullaev P. K., Kang T. W., Saidov A. A.. Structural, optical, and nonlinear optical absorption/refraction studies of the manganese nanoparticles prepared by laser ablation in ethanol // Optical Materials, Elsevier, – Netherlands, 2011. – Vol. 33, – No.3. – pp. 419 – 423 (No.40. ResearchGate; IF=2,08).

5. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T., Baba M., Kuroda H.. Low – and high-order nonlinear optical characterization of C<sub>60</sub>-containing media // European Physical Journal D. Springer, – Germany, 2011. – Vol. 64. – pp. 109 – 114 (No.1 Web of Science; IF=1,513).

6. López-Arias M., Oujja M., Sanz M., Ganeev R. A., Boltaev G. S., Satlikov N. Kh., Tugushev R. I., Usmanov T., and Castillejo M.. Low-order harmonic generation in metal ablation plasmas in nanosecond and picosecond laser regimes // Journal of Applied Physics. American Institute of Physics, – USA, 2012. – V. 111, – No.4. – pp. 043111 (No.1 Web of Science; IF=2,21).

7. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Satlikov N. K., and Usmanov T.. Harmonic generation of picosecond Nd:YAG laser radiation in ablation-produced plasmas // Journal of Optics, – Printed in the UK and the USA, 2012. – Vol. 14, – No.9. – pp. 095202 (No.40. ResearchGate; IF=2,01).

8. Ганеев Р. А., Болтаев Г. С., Тугушев Р.И., Усманов Т.. Исследование нелинейно-оптических свойств различных органических материалов методом Z–сканирования // Оптика и Спектроскопия, – С.-Петербург, 2012. – Т. 112, – № 6. – стр. 978 – 986 (No.40. ResearchGate; IF=0,67).

9. Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Сатликов Н. Х., Кулагин И. А., Усманов Т.. Генерация высших гармоник пикосекундного излучения умеренной

интенсивности в лазерной плазме // Квантовая Электроника, – Москва, 2012. –Т. 42, – № 10. – стр. 899 – 906 (No.1.Web of Science; IF=0,86).

10. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Satlikov N. Kh., Kulagin I. A., Tugushev R. I., Usmanov T.. High-order harmonic generation of picosecond laser radiation in carbon-containing plasmas // Journal of Optical Society of America B, – USA, 2012. – V. 29., – №12. – pp. 3286 – 3292 (No.1. Web of Science; IF=2,21).

11. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Satlikov N. Kh., Tugushev R. I., Usmanov T.. Low-order harmonic generation of 1064 nm radiation in long plasma plumes // Photonics and Optoelectronics, – USA, 2013. – Vol. 2, No.4. – pp. 96 – 104 (No.43. Universal Impact Factor; IF=0,146).

12. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Kulagin I. A., and Usmanov T.. Resonance enhancement of the 11<sup>th</sup> harmonic of 1064 nm picosecond radiation generating in lead plasma // Journal of Optical Society of America B, – USA, 2014. – Vol. 31, – No.3. – pp. 436 – 442 (No.1. Web of Science; IF=2,21).

13. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Usmanov T.. Third and fourth harmonics generation in laser-induced periodic plasmas // Optics Communications, Elsevier, – Netherlands, 2014. – Vol. 324. – pp. 114 – 119 (No.40. ResearchGate; IF=1,54).

14. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Reyimbaev Sh., Sherniyozov Kh., Usmanov T.. Use of extended laser plasma for generation of high-order harmonics of picosecond duration // Quantum Electronics, – Moscow, 2015. – V.45, – No.7. – pp. 648 – 653 (No.1. Web of Science; IF=0,86).

## II бўлим (II часть, part II)

15. Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Тугушев Р. И.. Нелинейное оптическое поглощение и рефракция в суспензиях наночастиц Ru, Pd и Au / “Ўзбекистоннинг инновацион тараққиёти – ёшлар нигоҳида” Физика фанинг бугунги ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни. Ташкент, 2010 йил 8 – 9 апрель, 58 – 59 бетлар.

16. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Tugushev R. I., Usmanov T., Baba M., Kuroda H.. Third harmonic generation in plasma plumes using picosecond and femtosecond laser pulses / International Conference on Coherent and Nonlinear Optics ICONO/LAT 2010 Kazan, Russia, August 2010-ITuI3. – pp. 52.

17. Satlikov N. Kh., Boltaev G. S.. High order harmonic generation of picoseconds laser radiation from the low-excited laser plasma produced on the surfaces of various targets / XIX Международной молодежной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЛОМОНОСОВ-2012» Москва, апрель 2012г.– стр. 174 – 176.

18. Болтаев Г. С., Сатликов Н. Х.. Получение наночастиц металлов на поверхности стеклянных подложек и в жидкостях методом лазерной абляции / Республика илмий-амалий анжуман “Нанотехнология ва қайта тикланадиган энергия манбалари муаммолар ва ечимлар” Қарши 2012, апрель, 58 – 59 бетлар.

19. Ganeev R. A., Boltaev G. S., Satlikov N. Kh., Kulagin I. A., Usmanov T.. High-order harmonic generation of picosecond laser radiation from laser plasma

plumes / 15<sup>th</sup> International Conference on “Laser Optics 2012”, St. Petersburg, Russia, June, 2012. – R8–21.

20. Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Усманов Т.. Исследование нелинейно-оптических параметров наночастиц марганца, полученных методом лазерной абляции / Международная конференция «Актуальные проблемы физической электроники», Ташкент, ноябрь, 2012г. – стр. 116.

21. Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Усманов Т.. Генерация высших гармоник в лазерной плазме / Международная конференция «Актуальные проблемы физической электроники», Ташкент, ноябрь, 2012г. – стр. 117.

22. Болтаев Г. С.. Генерация высших гармоник излучения пикосекундного лазера в плазме углеродсодержащих мишеней / Республиканская научно-практическая конференция «Научный прогресс и инновационное развитие экономики» АН РУз, Ташкент, декабрь, 2012г., – стр.21 – 23.

23. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Usmanov T.. Low-order harmonic generation of 1064 nm radiation in long plasma plumes / IV International conference «Actual problems of molecular spectroscopy condensed matter», Samarqand, Uzbekistan, May, 2013г. – стр.67.

24. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Kulagin I. A., Usmanov T.. Resonance enhancement of harmonic generation of 1064 nm picoseconds radiation in lead plasma / IV International conference «Actual problems of molecular spectroscopy condensed matter», Samarqand, Uzbekistan, May, 2013г. – стр. 68.

25. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Kulagin I. A., Usmanov T.. Peculiarities of high-order harmonic generation of picosecond Nd:YAG laser radiation in lead plasma / International Conference Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), Moscow, Russia, June 2013. - IWA6. – pp. 46.

26. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Kim V. V., Kulagin I. A., Sherniyozov H.O., Usmanov T.. Generation and saturation of high harmonic in metal laser plasma / II International conference «OPTICS and PHOTONICS-2013», Samarqand, Uzbekistan, September 2013, – стр. 118 – 122.

27. Кулагин И. А., Ким В. В., Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Усманов Т.. Механизмы повышения эффективности генерации одиночной гармоники в лазерной плазме / Международная конференция по физической электронике «ИРЕС-6», Ташкент, октябрь, 2013, – стр. 156 – 159.

28. Болтаев Г. С., Ганеев Р. А., Тугушев Р. И., Усманов Т.. Нелинейно-оптические процессы и оптическое ограничение раствора C<sub>60</sub> в толуоле / Международная конференция по физической электронике «ИРЕС-6», Ташкент, октябрь 2013, – стр.152 – 154.

29. Boltaev G. S., Ganeev R. A., Usmanov T.. Nonlinear absorption and refraction in various nanoparticles / TWASROCASA Regional Conference for young scientist on «Nanoscience & Nanomaterials». Bangalore, February, 2015, – SP01.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририясида таҳрирдан  
ўтказилди (19.01.2016 йил)

Босишга рухсат этилди: 22.01.2016  
Ҳажми: 4,5. Адади: 100. Буюртма: № 67  
“Top Image Media” босмахонасида босилди.  
Тошкент шаҳри, Я.Ғуломов кўчаси, 74-уй



