

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМЙ КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

РЕДЬКИН ПАВЕЛ ВИТАЛЬЕВИЧ

**КОГЕРЕНТ НУРЛАНИШНИНГ ЮҚОРИ ГАРМОНИКАЛАРИ
РЕЗОНАНС ГЕНЕРАЦИЯСИГА КЎПЭЛЕКТРОНЛИ ЭФФЕКТЛАР ВА
ЗАРРАЧАЛАР КОНЦЕНТРАЦИЯСИНинГ ТАЪСИРИ**

01.04.11 – Лазер физикаси (физика-математика фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2016

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

Редькин Павел Витальевич Когерент нурланишнинг юқори гармоникалари резонанс генерациясига кўпэлектронли эффектлар ва заррачалар концентрациясининг таъсири	3
Редькин Павел Витальевич Влияние многоэлектронных эффектов и концентрации частиц на резонансную генерацию высших гармоник когерентного излучения	28
Redkin Pavel Vitalevich Influence of multielectron effects and concentration of particles on resonant high-harmonic generation of coherent radiation	53
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	76

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМЙ КЕНГАШ**

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

РЕДЬКИН ПАВЕЛ ВИТАЛЬЕВИЧ

**КОГЕРЕНТ НУРЛАНИШНИНГ ЮҚОРИ ГАРМОНИКАЛАРИ
РЕЗОНАНС ГЕНЕРАЦИЯСИГА КЎПЭЛЕКТРОНЛИ ЭФФЕКТЛАР ВА
ЗАРРАЧАЛАР КОНЦЕНТРАЦИЯСИНинГ ТАЪСИРИ**

01.04.11 – Лазер физикаси (физика-математика фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2016

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.3-4.FM117 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгаш веб-саҳифасига (www.fti-kengash.uz) ва «Ziyonet» ахборот таълим тармоғига (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Ганеев Рашид Аширович, физика-математика фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	Усманов Тимур Бекмурадович, физика-математика фанлари доктори, профессор Юсупов Джавдат Бакиджанович, физика-математика фанлари доктори Азаматов Закир Тахирович, физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	Ўзбекистон Миллий университети

Диссертация химояси 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, 2 б-уй. Тел./факс: (+99871) 235-42-91, email: lutp@uzsci.net).

Докторлик диссертацияси Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида _____ рақами билан рўйхатга олинган (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 2 б-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 марталиқ илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (Докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда илм-фан соҳасида лазер физикаси ва ночизикли оптика йўналишларининг тезкор ривожланаётгани ультрабинафша ва рентген нурлари соҳаларида ҳам кенг тадқиқот олиб боришни тақозо этмоқда. Бунда когерент манбалар ҳосил қилишда юқори гармоника генерациясига кўпэлектронли жараёнлар ва заррачаларнинг концентрациялари таъсири лазер физикасининг устувор йўналишларидан биридир. Мазкур йўналишда асосий эътибор резонанс ва ўзаро таъсирлашувчи тўлқинлар фазалари квазисинхронизм шартларида генерацияланувчи гармоникалар самарадорлигини оширишга қаратилган. Ушбу изланишлар лазер физикаси, ночизикли оптика, фемтосекундли голография, аттосекунд давомийликда импульслар генерациялари, ўта тезкор жараёнлар спектроскопияси йўналишларини ҳаётга жорий қилишда муҳим аҳамият касб этади.

Дамловчи нурланиш сифатида фойдаланиш интенсивлиги $10^{14} \div 10^{15}$ Вт/см² бўлган фемтосекунд давомийликдаги импульслар энергиясини юқори гармоникаларга алмаштириш самарадорлигини ошириш учун юқори гармоника резонанс генерациялари ва дамловчи нурланиш билан гармоника нурланишлари фазаларининг квази мослашиши шартларининг бажарилишини талаб қилади. Шу сабабли, юқори гармоника генерацияларида мураккаб структурага эга бўлган ҳамда эндоэдрал фуллеренлар сингари сунъий наноматериаллардан амалиётда фойдаланиш имкониятлари жуда кам ўрганилган.

Плазма ҳолатидаги муҳитларда юқори гармоникалар генерациялари усулини ривожлантириш, резонанс гармоникалар генерацияларида частоталарни ночизикли усуллар ёрдамида ўзгартириш самарадорлигини орттириш, лазер абляцияси жараёнида шаклланган нанозаррачалар тадқиқотлари диссертация мавзусининг заруратини кўрсатади. Бундан ташқари, лазер абляцияси усули асосида юқори самарадор ночизикли элементлар яратиш лазер физикаси ва ночизикли оптиканинг муҳим муаммосини ечишда алоҳида аҳамият касб этиб, лазер плазмаси концентрацияси таҳлили бўйича назарий натижалар олиш имконини беради.

Эркин электронлар концентрацияларининг юқори гармоника самарадорлигига ва заррачалар концентрациясининг юқори гармоника генерацияларига таъсири ханузгача ўрганилмай қолмоқда. Мазкур масалаларнинг ечими вакуум ультрабинафша соҳасида юқори самарадорлик когерент манбалар яратиш учун реал системаларда юқори гармоникалар резонанс генерацияларининг ўзига хослиги ва асосий қонуниятларини ўрнатишда муҳим илмий-амалий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442–сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти

муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Тадқиқот иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг ФП «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича ҳалқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. Резонанс генерациясининг кўп электронли эффектлари устида етакчи илмий марказлар ва университетлар томонидан, жумладан, Мария Кюри университети (Париж, Франция), Макс Планк номидаги комплекс системалар физикаси институти (Дрезден, Германия), Илмий тадқиқотлар миллий институти (Монреал, Канада), Пекин физика институти (Пекин, Хитой), Москва давлат университети (Москва, Россия), Сараево университети (Сараево, Босния ва Герцеговина), Россия фанлар академияси умумий физика институти (Москва, Россия), Воронеж давлат университети (Воронеж, Россия)да илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Жаҳон миқёсида қувватли ультрақисқа лазер импульслари частоталарини нозикли ўзгартиришни электрон ва лазер майдони билан ўзаро таъсирлашуви механизмларини тадқиқ қилишда қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: алоҳида фаол электронни аналитик яримклассик яқинлашиши бўйича назарий натижалар олинган (Мария Кюри ва Пиерре университети, Франция; Макс Борн институти, Германия); атом ва ион резонанслари иштирокида газ муҳитларида юқори гармоникалар кучайиши тасдиқланган (Сараево университети, Босния и Герцеговина; Умумий физика институти, Россия).

Бугунги кунда лазер физикаси ва нозикли оптика соҳаларида плазма ҳолатидаги муҳитларда юқори гармоника резонанс генерациялари бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: лазер плазмасида атомлар, ионлар ва эркин электронлар концентрациясини аниқлашнинг назарий ва амалий усулларини ривожлантириш; юқори гармоника резонанс генерацияларига заррачалар концентрацияси ва кўпэлектронли эффектларнинг таъсири физик механизмларини аниқлаш бўйича назарий ва амалий натижалар олинган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда норезонанс юқори гармоника генерациялари тажрибада ва назарий жиҳатдан етарлича тўлиқ ўрганилган. Юқори гармоника резонанс генерациялари тажрибаларда етарлича тадқиқ қилинган бироқ мазкур тадқиқотларгача тажриба натижалари билан мос келувчи модель яратилмаган. R. Taieb, V. Veniard, E.S. Toma, C. Figueira de Morisson Faria, D.B. Milosevic ва Европа Иттифоқининг бошқа олимлари томонидан бир қатор тажриба қонуниятларини ифодаловчи юқори гармоника резонанс генерациялари механизмлари таклиф этилган, бу механизмлар резонанс соҳага қўшни гармоникаларнинг кучайиши бўйича тажриба натижаларида тасдиқланмаган. Кўпэлектронли усуллар: кўп конфигурацияли вақтли Хартри-Фок усули ва вақтли зичлик функционал усуллари J. Zanghellini, D. Bauer ва Европа Иттифоқининг бошқа олимлари томонидан кўп электронли методлар ўзаро

таъсирлашувлар мавжудлиги шартда юқори гармоника генерацияларини моделлаштириш учун илгари қўлланилмаган.

Россия олимлари В. Стрелков, М. Иванов, С. Стремоухов бир электронли усулдан фойдаланиб, яхши натижаларга эришган, аммо қаралаётган тизимларда талаб қилинувчи потенциал ўралар ташқаридан киритилади, аналитик модел эса ҳисоблаш натижалари билан бевосита боғлиқ эмас ва бу юқори гармоника резонанс генерацияларининг фақат бошқа моделлари билан аниқ натижаларини бериши мумкин.

Ўзбекистонлик олимлар, хусусан, Р.А. Ганеев, И.А. Кулагин, Т.Б. Усмановлар томонидан суств ионлашган лазер плазмасида юқори гармоника генерациялари ва кўпоқимли лазер плазмасида юқори гармоника резонанс генерациялари тадқиқотлари олиб борилмоқда. Улар кучли ионлашган тизимларда тўлқин узунлиги $2\div 4$ нм бўлган гармоника нурланишлари самарадорлигининг нисбатан жуда паст ($10^{-8}\div 10^{-7}$) қийматлари олишган. Бундан ташқари, юқори гармоника резонанс генерациялари ва кўпоқимли лазер плазмаларда лазер нурланиши энергиясини гармоника энергиясига ўзгартириш самарадорлиги учун 10^{-4} ва 10^{-5} қийматлар олинган. Бироқ лазер плазмаси таркибига кирувчи ионлар, атомларнинг электрон структуралари ва дамлаш нурланиши спектрал хусусиятларининг юқори гармоника резонанс генерациялари ва фазалар квази мослашиши шартларига таъсири қаралмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация олиб борилаётган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Самарқанд давлат университети ОТ-Ф2-021 «Яримўтказгичларда ва металл наноматериалларида ўлчамли ходисалар физикаси» (2007-2011); Ф2-09 «Лазер нурланиши юқори тартибли генерацияси гармоникаларни резонанс кучайтириш механизмлари тадқиқоти» (2012-2016) мавзусидаги лойихалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади юқори гармоника резонанс генерацияларига заррачалар концентрацияси ва кўпэлектронли эффектларнинг таъсирини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

юқори гармоника генерацияси алмаштириш самарадорлигига ва маълум бир босқичда тизим билан резонанс ҳолатига ўтувчи дамлаш импулси таъсирини ўрганиш;

юқори гармоника резонанс генерацияларига заррачалар концентрацияси ва кўпэлектронли эффектларнинг таъсирини аниқлаш;

юқори гармоника резонанс генерациялари бўйича тадқиқот натижаларини тушунтирувчи юқори гармоника резонанс генерациялари механизмларини тушунтириш ва юқори гармоника резонанс генерациялари шароитларини оптималлаштириш;

юқори гармоника резонанс генерациялари учун истиқболли нишонлар, хусусан, эндоэдрал фуллерен, металл ва яримўтказгичлар турли даражада ионлашган лазер плазмаларини назарий тадқиқ қилиш;

лазер плазмасида атомлар, ионлар ва эркин электронлар концентрацияларини назарий ва амалий аниқлаш усулларини ҳамда қиздирувчи импульс параметрларини назорат қилиш орқали лазер плазмаси заррачалари концентрацияларини бошқариш усулини ишлаб чиқиш;

юқори гармоника резонанс генерацияларини моделлаштириш учун оптимал дастурий-назарий пакетини созлаш ва излаб топиш ҳамда кўпэлектронли тизимларнинг асосланган яқинлашишини яратиш;

текшириш гипотезалари натижаларини умумлаштириш ва юқори гармоника резонанс генерацияси механизмларини аниқлаш, юқори гармоника резонанс генерациясини оптималлаштириш имкониятларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида лазер абляция усули билан ҳосил қилинган плазмалар ва когерент нурланишининг юқори гармоникалари олинган.

Тадқиқотнинг предмети когерент нурланишнинг юқори резонанс гармоникаларда кўпэлектронли эффектлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари – кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усули, вақтли зичлик функционал усули, молекуляр динамик усул.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидаги натижалардан иборат:

кўпэлектронли эффектларнинг резонанс сатҳда ион электрони уйғотилиши билан ионда тезланиш билан ҳаракатланувчи электроннинг ноэластик сочилиши натижасида юқори резонанс гармоника генерацияларига олиб келиши кўрсатилган;

юқори гармоника резонанс генерацияси бўйича тажриба натижаларини тушунтириш ва оптимал дамлаш ҳамда қиздирувчи импульслари ҳисоби асосида юқори гармоника резонанс генерацияси жараёнини оптималлаштириш имконини берувчи юқори гармоника резонанс генерацияси механизми таклиф этилган;

бир каррала ионлашган муҳитларда ўтишларга асосланган юқори гармоника резонанс генерацияларини кузатиш учун ионлашмаган муҳитлардан истиқболли муҳит сифатида фойдаланиш таклиф этилган;

эндоэдрал фуллеренлар $C_{60}+In$ ва $C_{60}+Sb$ да C_{60} молекуласи қобиғи плазмон ютилиш максимумлари силжиши ва киритилган яримўтказгичлар ион резонансларига мувофиқ ва кучайувчи гуруҳ гармоника резонанс генерацияларининг янги плазмон ютилиш максимумларига силжишининг назарий ҳисоблаш натижасида эндоэдрал фуллеренлар аралашмасининг буғланиши орқали ҳосил қилинган лазер плазмасида гуруҳ гармоникаларини бир текис кучайтириш имконияти кўрсатилган;

давомийлиги катта бўлган қиздирувчи импульс ёрдамида, лазер абляцияси жараёнида олинган плазмада атомлар, ионлар ва эркин электронлар концентрациясини фазалар мувофиқлаштирилганда юқори гармоникалар гуруҳи кучайишини ҳисобга олишга асосланган назарий аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

10 ва 8 пикосекунд узунликга эга импульслар абляцияси ёрдамида углерод плазмасида зарралар концентрацияси ошиши билан частотани ўзгар-

тириш эффективлигини чекланиш механизми аниқланган;

резонанс ва фазалар квази мослашиши шароитларини мувофиқлаштириш плато соҳасида алоҳида гармоникалар самарадорлигини 1000 марта кучайтиришга олиб келувчи берилган концентрацияда ионлашиш даражаси ва қиздирувчи импульс давомийлиги ўртасидаги боғланиш қонуниятини аниқлаш усули таклиф этилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси:

юқори гармоника резонанс генерациясининг максимал самарадорлигига эришишда лазер абляцияси учун импульс параметрларини аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

оптик зичлиги фазовий модуляцияланган плазмаларда юқори гармоника генерациялари тажрибаси бўйича ва компьютерли моделлаштириш асосида лазер плазмасидаги атомлар, ионлар ва эркин электронлар концентрацияларини назарий аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

резонанс кучаювчи гуруҳ гармоникалар ҳолатини бошқариш учун яримўтказгичлар киритилган эндоэдрал фуллеренлар аралашмаларидан фойдаланиш схемалари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги қуйидагилардан иборат:

компьютерда моделлаштириш натижалари квант механикасининг бир хил масалаларни ечиш учун фойдаланилган дастурларнинг қўлланиш имкониятлари бошқа муаллифлар томонидан олинган юқори гармоника спектрларини аниқлаш бўйича тажриба натижалари билан зид келмаслиги ва норезонанс ҳолатлар учун тўғри келувчи назарий жараёнларга зид келмаслиги билан баҳоланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқотининг назарий аҳамияти шундаки, у юқори гармоника резонанс генера-цияларини ҳисоблаш бўйича таклиф қилинган яқинлашишлар тажриба натижалари билан юқори аниқликни таъминлаш ҳамда юқори гармоника резонанс генерациялари учун импульслар ва истиқболли материалларни излаб топишни соддалаштириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, у оптик зичлиги фазовий модуляцияланган плазмаларда фазалар квази мослашиши ва юқори гармоника резонанс генерациялари бўйича тажрибаларни оптималлаштириш учун кўпэлектронли резонанс рекомбинация усулидан фойдаланиш, фан ва техниканинг муҳим соҳаларида амалий қўлланилиши учун генерацияланувчи лазер импульслари интенсивликларини етарлича ошириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Диссертация ишида ишлаб чиқилган лазер абляцияси ёрдамида ҳосил қилинувчи плазмалар характеристикаларини аниқлаш методологияси ҳамда юқори гармоникалар резонанс генерациясини кучайтириш усули 14G0206 «Япония жамиятининг Ижодий илмий тадқиқотларга кўмаклашиш гранти»ни бажаришда индийнинг лазер плазмасида резонанс гармоникалари кучайишини тушунтириш учун ишлатилган (Саитама тиббиёт университети қошидаги Илфор тиббиёт лазерлар ва офтальмология маркази маълумотномаси, 26.02.2016, Япония). Илмий натижанинг қўлланиши маълум камёб материаллар ва энергия

сарфланганда резонанслар гармоникаси интенсивлигини 10 мартаба кучайишини таъминлаган.

Ишнинг апробацияси. Диссертация натижалари куйидаги халқаро ва республика миқёсидаги илмий анжуман ва симпозиумларда: «Физик электрониканинг долзарб муаммолари UzPES-5» халқаро анжуманида (Ташкент, 2009); «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» республика анжуманида (Самарқанд, 2010); «Оптика ва фотоника-2013» халқаро анжуманида (Самарқанд, 2013); Фундаментал атом спектроскопияси халқаро анжумани «ФАС-XX» (Россия, Воронеж, 2013); «Замонавий илм-фан: назарий ва амалий кўриниши» халқаро анжумани (Россия, Челябинск, 2015), ЎзР ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти қошидаги Махсус конструкторлик технологик бюроси илмий семинарида апробациядан ўтказилган (09.03.2016) ҳамда Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли Илмий кенгаш асосида 01.04.11 ихтисослиги бўйича тузилган бир марталик илмий кенгаш қошидаги илмий семинарда муҳокама қилинган (04.05.2016).

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш нашр эттирилган, жумладан 15 та илмий мақола нуфузли халқаро илмий журналларда ҳамда 5 та тезис халқаро ва республика конференциялар тўпламларида чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 198 саҳифадан иборат матн, 40 та расмдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида тадқиқотнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, мақсади ва вазифалари ҳамда тадқиқотнинг объект ва предмети тавсифланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, илмий янгилиги ва олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган.

Диссертациянинг «**Юқори гармоника резонанс генера-циялари бўйича назарий ва тажриба маълумотлари**» биринчи бобида юқори гармоника резонанс генерацияларига заррачалар концентрацияси ва кўпэлектронли эффектларнинг таъсири муаммоларининг ҳолати, юқори гармоника резонанс генерацияларининг назарий тадқиқоти ва уларнинг диссертация ишида таклиф қилаётган юқори гармоника резонанс генерацияси модел билан боғлиқлиги бўйича адабиётлар шаҳри келтирилган.

Диссертациянинг «**Юқори гармоника резонанс генерацияларига кўпэлектронли эффектларнинг таъсири**» иккинчи бобида кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усули асосида юқори гармоника резонанс генерацияларига электронлараро ўзаро таъсирлашувнинг турли ўзига хосликларининг таъсири ўрганилган.

Вақтга боғлиқ Шредингер тенгламасининг тўғри ечими билан таққосланган ҳисоблаш мураккаблиklarининг унча юқори бўлмаган қийматларида кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усули кучли корреляцияланган тизимларда аниқ натижаларни олиш имконини беради. Кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усулида тўлқин функция ҳақидаги фараз қуйидаги кўринишга эга:

$$\Psi(Q_1, \dots, Q_f, t) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_f=1}^{n_f} A_{j_1 \dots j_f}(t) \prod_{\kappa=1}^f \varphi_{j_\kappa}^{(\kappa)}(Q_\kappa, t). \quad (1)$$

Бу ерда Q_1, \dots, Q_f – заррача координаталари, $A_{j_1 \dots j_f}$ – кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усулида қатор коэффицентлари, $\varphi_{j_\kappa}^{(\kappa)} - n_\kappa$ ҳар бир κ эркинлик даражалари учун қаторнинг вақтли функция.

Кўпконфигурацияли вақтли Хартри-Фок усули вақтли гамильтониан аниқ алмаштириш симметрияси ва фазо ичида тўлиқ антисимметрик ечимларга чекловлар киритади. Бу эса барча зарраларнинг бошланғич тўлқин функциялари бир хил бўлишини таъминлайди, бошланғич А-вектор $A_{j_1 \dots j_f}$ эса ўзининг индексига нисбатан тўлиқ антисимметрик бўлиши лозим.

Юқори гармоника резонанс генерацияларини моделлаштириш учун дискрет ўзгарувчилар тушунчаси ва тезкор Фурье алмаштиришларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ. Синусоидал типли дискрет ўзгарувчилар тушунчаси электронлараро ўзаро таъсирлашув потенциалини яратишни соддалаштириш ва сеткани бир хил қийматли улушларга ажратиш, ва вақтга боғлиқ Шредингер тенгламаси ечимларининг бошқа дастурлар ёрдамида олинган натижалари бошқа натижалар билан солиштириш имконини беради.

Танланган функция қатори учун нисбий хатоликнинг камлиги (~40 миллиэлектрон-вольт) ҳисобга олган ҳолда, мазкур яқинлашишнинг аниқлиги ва тезкорлиги нуқтаи назаридан оптимал деб ҳисоблаш мумкин.

Сетка чегарасида тўлқин функцияси қайтиши олдини олиш ва бундан ташқари, сетканинг узунлигини камайтиришда керакли ютувчи чегарани ҳосил қилиш учун қуйидаги кўринишга эга комплекс ютувчи потенциаллардан фойдаланилди:

$$-iW(x) = -i\eta|x - x_c|^b \Theta(\pm(x - x_c)) \quad (2)$$

Бу ерда x_c , η ва b лар бошланғич нуқта, куч ва комплекс ютувчи потенциал тартибини ифодалайди. Θ поғонали Хэвисайд функцияси. x_c бошланғич нуқтанинг ўнг ва чап томонида комплекс ютувчи потенциал «+» ва «-» ишораси билан аниқланади. Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатдики, ютилиш чегараларининг мавжудлиги вақтли диполларни кучли ўзгаришга олиб келади, бироқ комплекс ютувчи потенциал тартибини вақтга боғлиқ бўлган диполларнинг сифатли таснифига ҳал қилувчи таъсир ўтказмайди, шунинг учун ҳар қандай фойдаланилган сетканинг чегарасидан 20 атом бирликлари масофасида жойлашган 0,2 атом бирликлари кучига ва 1-тартибли комплекс ютувчи потенциалдан фойдаланилди.

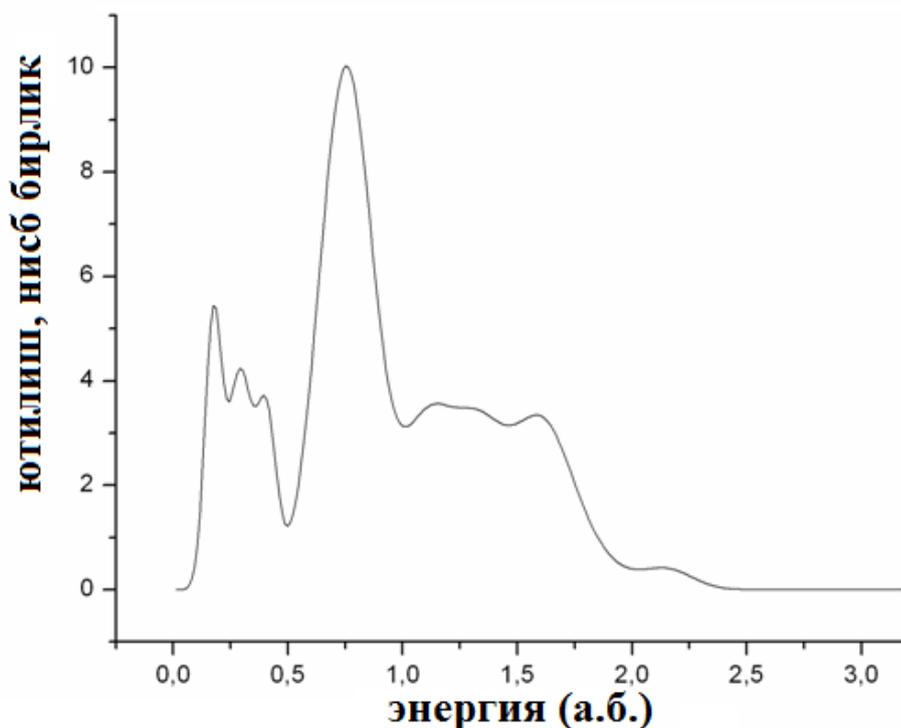
Уч ўлчамли фуллерен сифат тизимларда юқори гармоника резонанс генерацияларига кўпэлектронли эффектлар таъсири тадқиқ қилиниб, бунда иккита электрон фаол деб қаралди ва тизим электрон псевдопотенциали қуйидаги кўринишга эга:

$$V(r) = \begin{cases} -3 \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{R_0^2 - R_i^2}{2} \right), & r \leq R_i \\ - \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{3R_0^2}{2} - \left[\frac{r^2}{2} + \frac{R_i^3}{r} \right] \right) - v_0, & R_i < r < R_0, \quad r_n = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \\ -250/r, & r \geq R_0 \end{cases} \quad (3)$$

Икки электрон таъсирлашуви пасайтирилган потенциалли қуйидаги кўринишда:

$$V_{ee} = 1/\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 + 2} \quad (4)$$

1-расмда мазкур тизимнинг дельта импульсни татбиқ этиб, вақт бўйича тизим эркин эволюциясини ҳисоблашдан олинган ютилиш спектри келтирилган. Бунда 0.057 атом бирликлари учун ютилиш максимуми 13-гармоникага мос келиши аниқ кўринади. Моделлаштиришда лазер нурланиши магнит майдон ташкил этувчиси ҳисобга олинмайди, бунда қаралаётган лазер нурланиши интенсивлиги ($10^{13} \div 10^{16}$ Вт/см²) мос равишда, реал тизимларда фойдаланилувчи ва фаол электроннинг релятивистик ҳаракатига олиб келмайди.



1-расм. Икки актив электронли фуллеренли тизимнинг ютилиш спектри

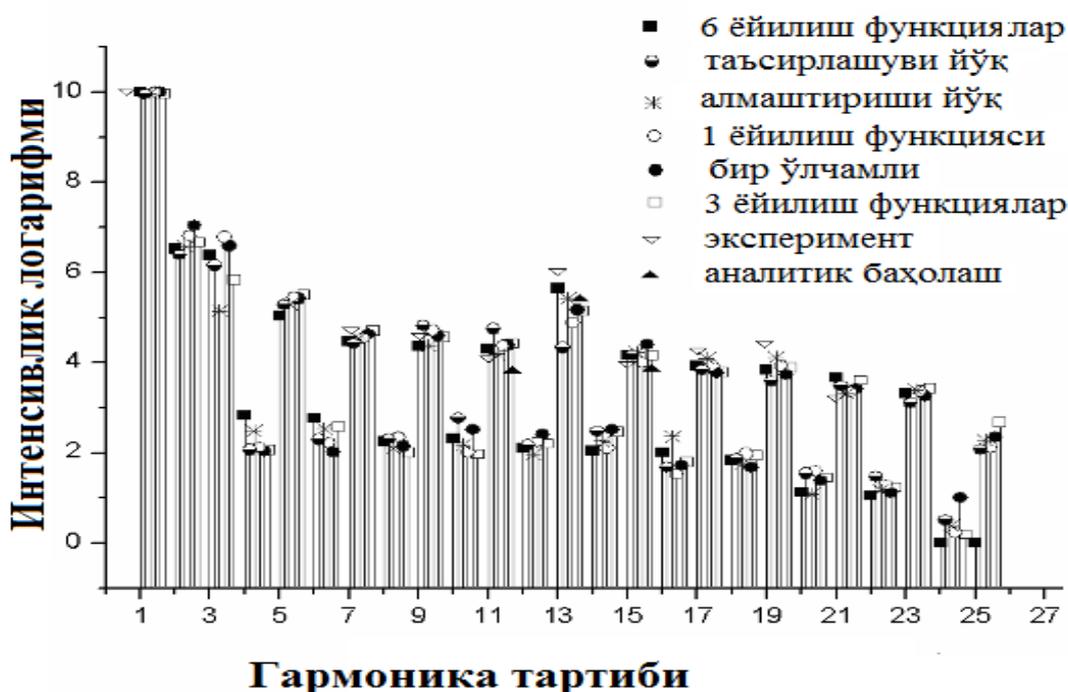
Юқори гармоника резонанс генерациясини лазер импульсининг ω частотасини моделлаштиришда давомийлиги 60 фс. бўлган дамлаш нурланиши частотаси 0.057 атом бирликларига тенг танлаб олинди.

Резонанс ҳолатларда четлашиш билан боғлиқ тадқиқотларда дамлаш нурланишининг частотаси 0.046 атом бирликларига тенг фойдаланилди. Шу билан бир қаторда, ясси монохроматик тўлқинлардан мос равишда четлашиш учун импульс интенсивлиги бўйича мувофиқ келувчи Гаусс кенгайиши киритилди. Шундай қилиб, фойдаланилувчи тўлқин куйидаги кўринишга келди:

$$E(t) = \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) E_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

Мазкур тизим билан ташувчи частотаси 0.057 атом бирликлари (2- расм) бўлган фемтосекунд импульслари таъсирлашувида юзага келувчи юқори гармоника резонанс генерациялари спектри ўрганиш электронлараро таъсирлашув ёйилиш функцияси миқдорига боғланиш турли аниқликлар билан кўрсатилди. Шунини таъкидлаш лозимки, конфигурациялар сонининг бир ёйилиш функцияси тақрибий қийматигача камайиши резонанс юқори гармоникалар генерацияларининг тўлиқ йўқолишига олиб келмади, аксинча кузатилаётган алмаштириш самарадорлиги камайди. Бир ўлчамли ҳолда алмаштириш самарадорлигининг камайиши кузатилди. Шунини таъкидлаш мумкинки, бир ўлчамли ҳолда юқори гармоника резонанс генерациясини кузатиш учун катта миқдорда конфигурацияларни киритиш кераклиги мазкур далиллар билан боғлиқ. Тажриба натижаларига кўра энг юқори

яқинлашиш олтига функциянинг ёйилиши билан кўпроқ аниқ яқинлашишни тахмин қилишга тўғри келди.



2-расм. Резонанс юқори гармоника генерациясининг самарадорлигига яқинлашиш таъсири

Қуйидаги муносабат бўйича алмаштириш самарадорлигини аналитик баҳолаш

$$\frac{I_{resonant}}{I_{nonresonant}} = \frac{2\pi\Omega^3 f_{osc}}{\omega p^3 [Z * M(p)]^2} \left[\frac{\Gamma^2}{4(\Omega - q\omega)^2 + \Gamma^2} \right] \quad (6)$$

электрон алмашинишини ҳисобламай олинган натижага яқин натижани берди, бунда аналитик модел кўпэлектронли эффектни ўз ичига олмайди. Шунини таъкидлаш лозимки, мазкур аналитик формула бўйича олинган тажриба натижаларининг четлашиш имкониятлари киритилган асосий ҳолатларда электрон ўтиш механизмлари билан боғлиқ. Шу боис тажриба билан микдорий мувофиқликка эришишда юқори гармоника резонанс генерацияси жараёнини моделлаштириш мақсадга мувофиқ бўлади.

Электронлараро таъсирлашув эътиборга олинмаса юқори гармоника резонанс генерациялари эффекти тўлиқ бузилишга учрайди. Шу билан бир қаторда фарқланувчи зарралар сингари «электронлар» акс эттирилиши юқори гармоника резонанс генерацияси самарадорлигини амалда камайтир-майди. Мазкур ҳодисанинг энг муҳим амалий татбиқи электронлараро итарилишни аниқ ҳисобга олиш керак, тажрибада максимал яқинлик талаб этилса, алмашиниш жараёнига катта эътибор қаратиш лозим эмас.

Мазкур тадқиқотлар натижалари, асосан, сушт корреляцияланган тизимларда электрон корреляциясини аниқ ҳисобга олмасдан амалга ошириш мумкинлигини кўрсатди. Ушбу жиҳат электрон корреляциясини

моделлаштиришга нисбатан электрон алмашинишни моделлатириш муносабатларини бир мунча содда масала деб ҳисобланади.

Юқори гармоника резонанс генерацияси бутунлигича бир атомли эффектлар билан тушунтирилиши, узун лазер плазмасида нурланиш тарқалишида гармоника ва дамлаш нурланиши фазаларининг мослашиши кўшилиши мумкинлиги илк бор кўрсатилди.

Диссертациянинг «**Юқори гармоника генерацияси учун ночизиқли тизимлар истиқболлари тадқиқотлари**» учинчи бобида вақтли зичлик функционал усули асосида юқори гармоника резонанс генерациясини моделлаштириш бўйича ҳисоблаш тажрибалари натижалари келтирилган.

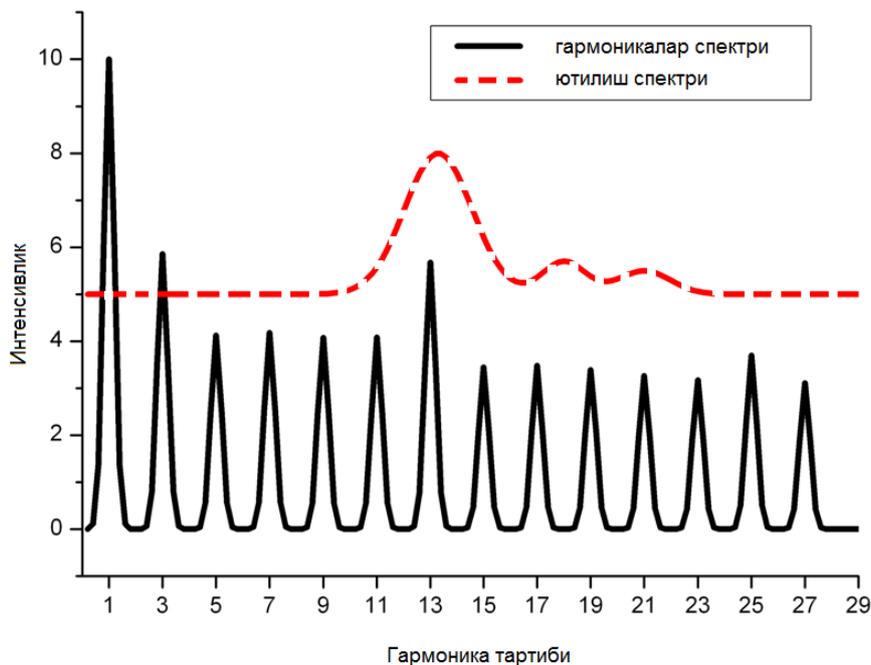
Вақтли зичлик функционал усулининг Шредингер тенгламалари ечимлари ўзаро таъсирлашмайдиган электронлар учун Коэн-Шам тенгламалари ечимлари билан алмаштирилади. Бунда фойдаланилувчи потенциал

$$V_{KS}(r, t) = V_{ext}(r, t) + V_{Hartree}(r, t) + V_{xc}(r, t) \quad (7)$$

ягона яқинлашиши ҳисобланади ва паст тартибли гармоникалар учун локал зичлик адиабатик яқинлашиши бўлиши мумкин.

$$V_{xc}^{adiabatic}(r, t) = \tilde{V}_{xc}[n](r)|_{n=n(t)}. \quad (8)$$

У ҳолда юқори тартибли гармоникалар учун аниқ алмашиниш потенциалидан фойдаланилади (3-расм).

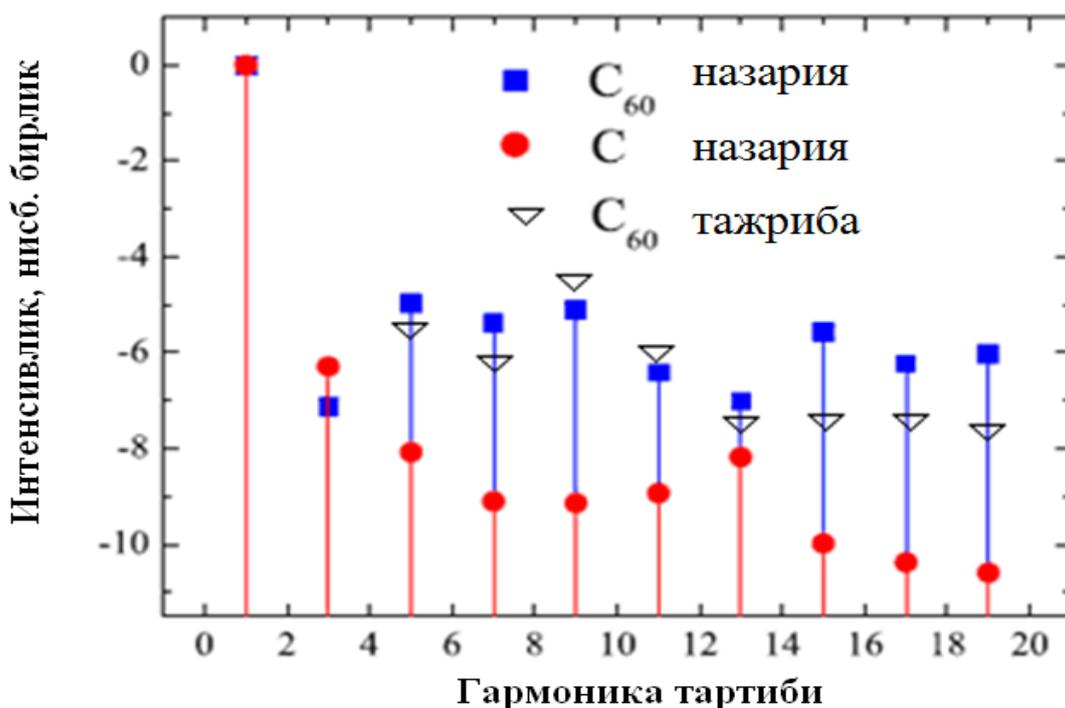


3-расм. Индий ионидан (In⁺) юқори гармоника резонанс генерациясини моделлаштириш натижалари

Индий плазмасида юқори гармоника резонанс генерациялари тадқиқ этилди. Буларни ҳисобга олган ҳолда, индий атоми учун жараёнини акс эттириш учун спектр дельта силжиш усули бўйича сохта потенциаллардан

фойдаланилди, бироқ ажратилган максимум 0.057 атом бирликлари частотали 13-гармоника соҳаси билан ифодаланди.

Молекуляр майдонда барча углерод атомлари хоссаларини моделлаштириш учун вақтли зичлик функционал назарияси усули билан C_{60} фуллерен плазмасида юқори гармоника генерацияларида илк бор назарий моделлаштириш олиб борилди. Углерод атомлари нормал сақланувчи нолокал Тройллер-Мартинс потенциали, алмашилиш Слэтер функционали, ва локал зичликлар адиабатик яқинлашиш ёрдамида моделлаштирилди. Ҳисоблаш натижаларининг тажриба натижалари билан таққослаш асосида C_{60} плазмасида юқори гармоника генерацияси самарадорликларининг ортиши тезланиш билан ҳаракатланаётган электрон энергиясининг плазмон тебранишлардаги бир неча электронларни уйғотишга узатилиши кўпэлектронли резонанс рекомбинация асосида тушунтирилади (4-расм).

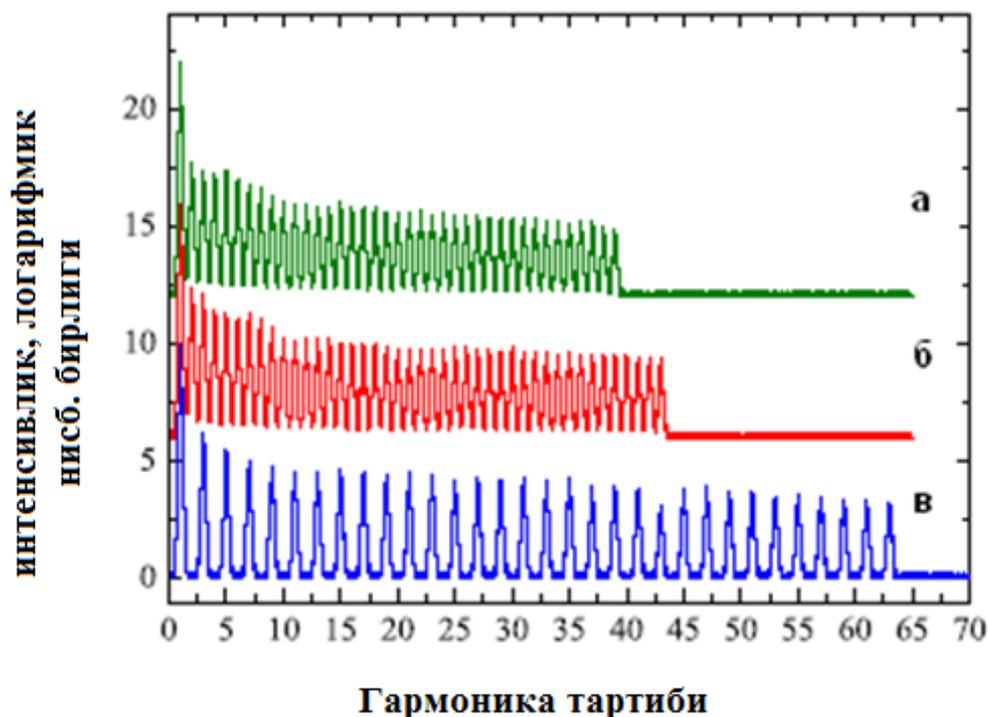


4-расм. Бир хил шароитда C_{60} фуллерен молекуласи ва углерод атомларидан генерацияланувчи гармоникаларнинг нисбий қувват спектри

Юқори гармоника резонанс генерациялари C_{60} плазмасида сўниш коэффициентининг юқорилигига қарамасдан углерод асосли плазмаларга нисбатан ошиши C_{60} плазмасида юқори гармоника резонанс генерациялари тарқалиш жараёнида яхши фазовий мослашуви билан боғланмаганлигини кўрсатади. Шундай қилиб, C_{60} плазмасида бир қатор гармоникалар кучайишида кўпэлектронли рекомбинация усули тўғри эканлиги исботланди, бу вақтда мазкур муҳитларда юқори гармоника резонанс генерациялари самарадорлигини чекловчи омиллар сифатида тарқалиш эффектлари бўлиши мумкинлиги эътироф этилди. Ҳақиқатан, C_{60} молекуласи фотоионизация кесими 20 эВ энергияли соҳа яқинида жуда юқори кенг (полоса ярим

кенглиги 10 эВ га тенг) плазмон резонансга эга (тўлқин узунлиги 800 нм бўлган титан сапфир лазери нурланишининг 11-, 13- ва 15- гармоникалари яқинида). Таъсирлашув соҳасида фуллеренлар зичлиги ($5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) бўлган қийматлар ва маълум кесимга эга фотоионизация учун ютилиш узунлиги ҳисобланганда, муҳитда плазмон резонанс соҳасида гармоникаларнинг кучли ютилишига эга бўлишини кўрсатувчи унинг 0,8 мм дан (7- ва 17- гармоникалар учун) 0,3 миллиметр гача (11-, 13-, 15- гармоникалар учун) ўзгаришини кузатиш мумкин.

Юқори гармоника генерациялари дамлаш нурланишининг икки частотали майдонлардаги тадқиқотлари бажарилди (5-расм). Плато гармоникалар бошланишига нисбатан юқори гармоника генерациялари спектрининг натижалари билан яхши мос келиши кўрсатилди. Бу моделлаштирилган тадқиқот тизими аниқлиги (вақт бўйича кичик қадамли интеграллаш, сеткалар орасидаги масофаларнинг кичиклиги ва 3 та ўлчашларда сеткаларнинг катта ўлчамлари), танланган ионизация потенциали аниқлиги (кумуш атомлари учун) ва лазер нурланиши импульслари параметрларининг тажрибадаги параметрларига яқинлиги билан боғлиқ.



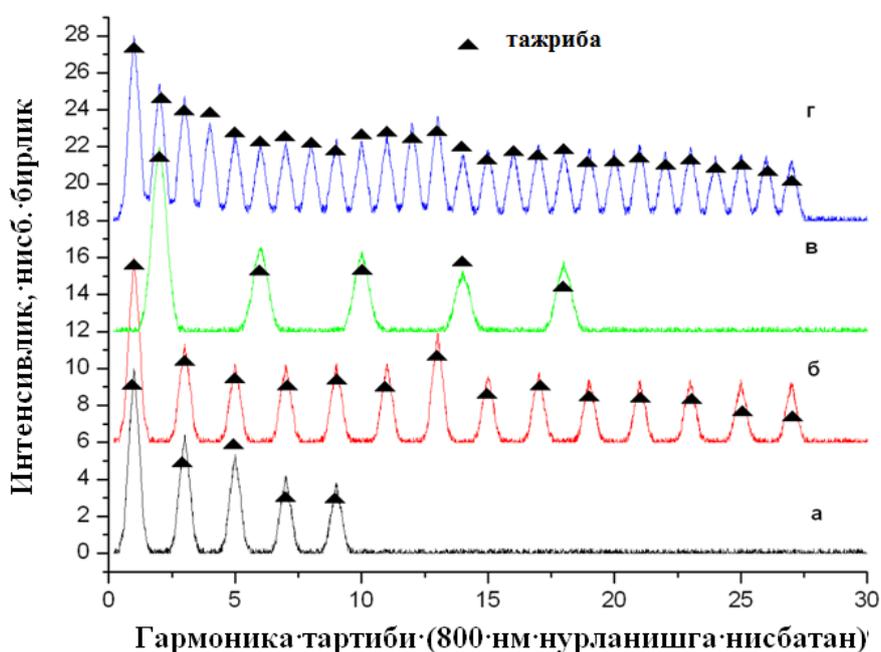
а - кутбланиши текисликлари параллел бўлган икки частотали дамлаш нурланиши, б - кутбланиши текисликлари перпендикуляр бўлган икки частотали дамлаш нурланиши, в - бир частотали дамлаш нурланиши.

5-расм. Турли импульслар билан нурлантирилувчи кумуш плазмасида юқори гармоника генерацияси қуввати спектрлари

Ҳисоблашлар иккинчи гармониканинг майдони электронлар қайтиши шартига деструктив таъсири ҳам сезиларли даражада эканлигини кўрсатди. Мазкур жиҳат яримклассик манзара билан зид келмайди, икки тўлқинли

майдонлар учун кўпэлектронли резонанс рекомбинация моделининг тўғрилигини кузатишимиз ҳам мумкин.

Индий плазмаси учун икки частотали майдонларда юқори гармоника резонанс генерацияларининг назарий тадқиқоти ўтказилди. Юқори гармоника генерациялари натижалари таҳлил учун кичик квадратлар усули билан бўлак аппроксимацияси ҳисобланиб, юқори аниқликдаги қатор учун плато гармоникалари энергиясини олиндан тахминий аниқлашни талаб қилди. Бу тажриба билан таққосланганда плато гармоникалари энергиясида озгина (1-3 тартиб гармоника оралиғида) четлашиш кузатилгани таъкидланди. 6-расмда дамлаш нурланиш майдонининг турли ўзига хосликларида индий атомлари ва ионлари плазмасида юқори гармоника генерацияси натижаси дамлаш нурланиши 0.057 атом бирликларида келтирилган.



а - In^{+0} бир тўлқинли майдон, б - In^{+1} бир тўлқинли майдон, в - In^{+1} икки тўлқинли иккинчи гармоника майдони, г - In^{+1} икки тўлқинли майдон

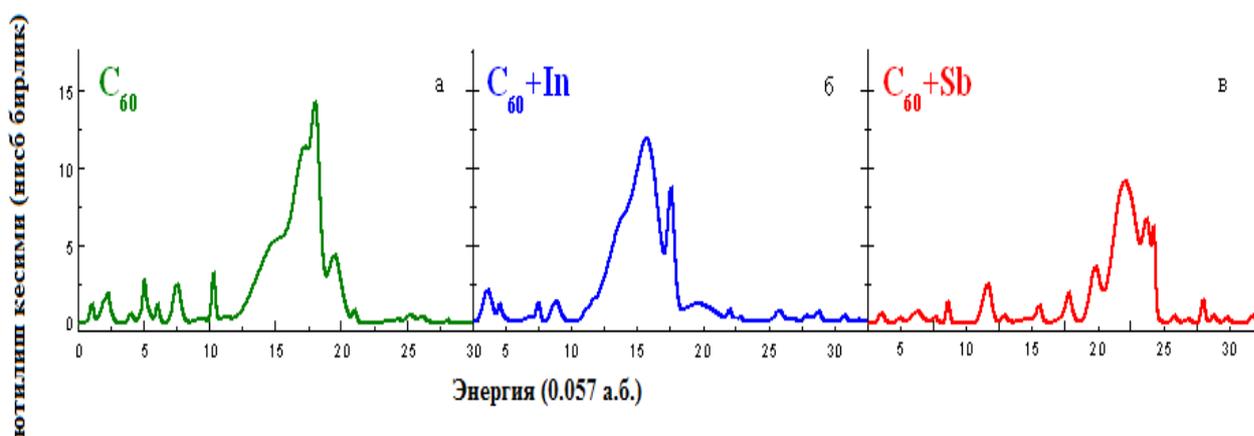
6-расм. Турли шароитдаги нурланишда индий плазмасида юқори гармоника генерациясини моделлаштириш натижаси

Кутилганидек, индий нейтрал бир электронли атомлар учун юқори гармоника резонанс генерацияси кузатилмади. Шу билан бирга тажриба билан тўлиқ мос келувчи ҳисоблашлар, частотаси 0.057 атом бирликлари бўлган бир тўлқинли дамлаш майдонида индий нишони плазмасида 13-гармоника кучайишини кўрсатди. Равшанки, иккинчи гармоника (асосий нурланиш учун 10- ва 14- гармоника) бўлмаганда 5- ва 7- гармоника резонанс ҳолатдан четланиши резонанс кучайиш ҳисобланмайди. Бироқ асосий нурланиш ва унинг иккинчи гармоникаси ортогонал қутбланиш текислиги майдонида юқори гармоника генерациясини моделлаштириш натижалари муҳим аҳамиятга эга бўлади. Ушбу ҳолатда 13-гармоникадан ташқари 12-гармониканинг ҳам кучайиши аниқ кузатилди. Шунга қарамасдан ҳар бир

кучайган гармоника интенсивлиги бир тўлқинли дамлашга қараганда бир мунча кичик ва шуни таъкидлаш лозимки, бир тўлқинли майдонда уларнинг суммар интенсивлиги 13-гармоника интенсивлигидан ошади.

Юқори гармоника резонанс генерацияси C_{60} фуллерен индий ва сурьма атомлари имплантланган плазмаларда таққослаш мақсадида ҳам тадқиқ этилди. Атомли ёки ички молекулали (эндоэдрал фуллеренлар) фуллеренлар сифат моддалардан тузилган нишонлардаги плазмаларда юқори гармоника резонанс генерацияларига бўлган қизиқиш нишонларни атомли яримўтказгич нишонлар билан бирлаштириш ва уларда бир вақтнинг ўзида юқори самарадорликка эга бир қатор гармоникалар кучайишлари билан боғлиқ.

Сохта потенциалга мос келувчи атомлар учун аниқ алмашилиш потенциали қабул қилиниб, бу гармоника спектрларини нисбатан аниқроқ олиш имконини беради. Бунда юқори гармоника генерацияси жараёни ноадиабатиклигидан юзага келувчи камчиликлар локал зичликлар асосида танланган сохта потенциалларнинг камчиликлари каби бўлмайди. Ушбу фуллеренлар учун ютилиш спектрларининг тадқиқотлар натижалари 7-расмда келтирилган.



a- C_{60} б- $C_{60}+In$ в- $C_{60}+Sb$.

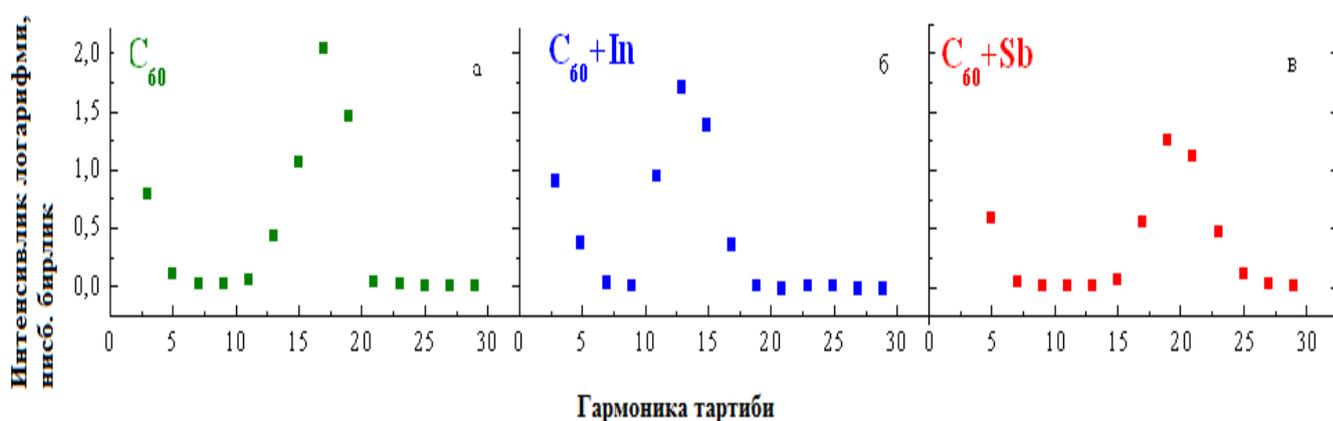
7-расм. Турли тизимлар учун вақтли усул билан ҳисобланган ютилиш спектри

Эндоэдрал фуллерен ($C_{60}+In$ ва $C_{60}+Sb$) плазмаларида C_{60} плазманинг плазмон ютилиш максимуми C_{60} плазмасидаги 15-гармоникадан 13- ва 21-гармоникаларга силжиди $C_{60}+In$ ва $C_{60}+Sb$ га мувофиқ ва бу кузатишларда олинган индий ва сурьма ионлари ютилиш максимумларига яқинлашишида кўринди. Шундай экан ҳисоблаш тажрибасида C_{60} қобиғи марказий атом спектрига сусайтирувчи таъсир ўтказмайди. Бунда C_{60} қобиғидаги локаллашмаган электронлар марказий атом электрон зичлигига кучли тебранишлар остида қайта мослашиш хусусиятига эга ва марказий атом ионзацияси истисно қилинмаган.

8-расмда мос тизимларда юқори гармоника резонанс генерацияси тадқиқот натижалари келтирилган. Гуруҳда кучаювчи қўшни гармоникалар интенсивликларининг максимал ошиши барча ҳолларда айнан плазмон

ютилиш пиклари максимумлари соҳасида жойлашганлиги юқори гармоникали генерация резонанс кучайиши деб баҳолашга имкон беради. Мазкур ҳодисанинг амалий аҳамияти аттосекунд давомийликдаги импульсларни самарали генерацияси учун фойдаланиш мумкинлигидадир. Юқори уйғонган сатҳларни оптик дамлаш жараёни кўпэлектронли рекомбинация модели орқали яхши ифодаланиши ва ҳисоблаш натижаларининг тажриба натижалари билан тўлиқ мос келишига қарамасдан, резонанс сатҳларнинг бирмунча инверс бандлик ҳосил қилинганлиги шароитида резонанс рекомбинация характерини тушунтиришни талаб қилади. Уйғонган стаҳларда инверс бандлик ҳосил қилишнинг олдинги механизмлари

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s\Gamma_{ph} \quad (9)$$



а- C_{60} ; б- $C_{60}+In$; в- $C_{60}+Sb$

8-расм. Тадқиқ этилаётган тизимларда резонанс юқори гармоника генерацияси

ўз ичига ноэластик уйғотиш ва спонтан нурланиш механизмларини олади. Бироқ спонтан нурланиш муҳитда кўп фотонли резонансга яқин бўлишига боғлиқ бўлмаган ҳолда кузатилади, шунинг учун нурланишга резонанс частотада когерент бўлган ҳисса куйидаги боғланишга олиб келувчи мажбурий нурланиш билан ифодаланиши лозим:

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s(\Gamma_{ph} + B_{12}u) \quad (10)$$

Резонанс рекомбинацияни аниқловчи мазкур механизм тадқиқ қилинувчи резонанс частота яқинида норезонанс сигналнинг кучли бўлиши яқка фаол электрон яқинлашишида амалга оширилган аналитик баҳолаш аниқлигининг юқори бўлишига таъсир кўрсатади. Мажбурий нурланиш ҳисобига гармоника сигнали кучайиши сингари жараёнлар асосий ва уйғонган сатҳлар орасида инверс бандликка эга бўлмаган тизимларда, 4 стаҳли жараёнлар доирасидаги оралик сатҳларда инверс бандлик ҳисобига ёки ютилишнинг турли каналарида интерференция деструкцияси шароитида ёпиқ мажбурий ютилиш қўлланилиш чегараларида юзага келиши мумкин. Ушбу иккита механизм юқори гармоника резонанс генерациялари

схемаларида нисбатан енгил амалга оширилади. Бунда резонанс сатҳда уйғотилиш жараёни когерент эмас ва тажрибаларда фойдаланилувчи етарлича юқори интенсивликлар ҳисобига олганда юқори гармоника майдонлари мавжудлигида рўй беради. Кўпэлектронли резонанс рекомбинация жараёнида когерент бўлмаган характерли дамлаш нурланишининг муҳим амалий аҳамияти лазер плазмасида резонанс ўтиш энергиясига яқин энергияли электронлар оқими йўналишида юқори гармоника резонанс генерацияси самарадорлигини етарлича кучайтириш имкониятини бериши ҳисобланади.

Диссертациянинг «**Юқори гармоника генерациясига заррачалар концентрациясининг таъсири**» деб номланган тўртинчи бобида юқори гармоника генерацияси, шу жумладан юқори гармоника резонанс генерацияси жараёнига заррачалар концентрацияси таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган.

Нейтрал заррачалар концентрациясини назарий аниқлашда молекуляр динамика усули ИТАР IMD пакети асосида яратилган дастурлар ёрдамида амалга оширилди. Молекуляр динамика усулига унинг аниқлиги, наноструктура шаклланишини тадқиқ қилиш имконининг мавжудлиги, нишон реал кристалл таркибини ва атомлараро ўзаро таъсирни тасвирловчи катта миқдордаги эмпирик сохта потенциални ҳисобга олиши киради.

Ионлар концентрациясини олиш имконияти лазер абляциясида нейтрал атомлар концентрациясига ионизация эҳтимоллигини кўпайтириш асосида қилинган ва аналитик усуллар ёки вақтли зичлик функционал усулларида фойдаланиш асосида амалга оширилади.

Биринчи галда углерод плазмасида юқори гармоника генерациялари кучайишига лазер абляцияси таъсири тадқиқоти ўтказилди. Тадқиқотлар бир хил шароитда олиб борилди ва бунда нишон юзасида плазма турли давомийликка эга абляция импульслар ёрдамида ҳосил қилинди. Давомийлиги 10 наносекунда бўлган абляция импульс плазмасида олинган натижаларда 9-дан 15-гача тартибли гармоникалар кузатилди ва уларнинг интенсивликлари аргон газида олинган гармоникалар билан таққосланиб, плазмада гармоникалар интенсивлигининг 2-5 марта ошиши кузатилди. Бу вақтда аргон гази муҳитида юқори тартибли гармоникалар (15 тартибдан юқори бўлган) анча самарали эканлиги кузатилди. Давомийлиги 8 пикосекунда бўлган абляция импульси плазмасида олинган натижаларда гармоникалар интенсивлиги аргон газида олинган гармоникалар билан таққосланиб, бунда тескари натижа, яъни аргонда гармоникалар интенсивлигининг 2-5 марта ошиши кузатилди. Углерод плазмасида генерацияланувчи гармоникаларнинг энг юқори тартиби 27 га тенг.

Мазкур эффеқтни тушунтириш учун лазер абляцияси жараёни графит нишони бўйича тадқиқотлар бажарилди. Сканерловчи электрон микроскоп ёрдамида олинган тасвирлар давомийлиги 8 пикосекунда бўлган импульслар билан ҳосил қилинган плазма факелининг максимал самарадорлик кузатилган ҳолатда ҳам нанозарралар мавжуд эмаслигини кўрсатди. Нишон давомийлиги 10 наносекунда бўлган импульс нисбатан кам интенсивликда

буғлатилганда (1×10^9 Вт см⁻²) ўлчамлари 20 дан 100 нм. гача бўлган нанозарралар ҳосил бўлиши аниқланди.

Аргон газининг зичлиги 6×10^{17} см⁻³ га тенг. Тажриба шароитида углерод нишони лазер абляцияси (яъни 8 пикосекундали импульс учун 2×10^{10} Вт см⁻² ва 10 наносекундали импульс учун 10^9 Вт см⁻²) плазмаси зичлиги мос равишда 2.6×10^{17} см⁻³ ва 2.5×10^{18} см⁻³ га тенг эканлиги ҳисобланди IMD ИТАР орқали. Мантиқан атомлар концентрацияси қанчалик юқори бўлса, кластерланиш даражаси шунча юқори бўлишини тахмин қилиш мумкин. Бунда 30 наносекундадан кейин уларнинг ҳолатларини аниқлашда ўртача учиш тезлиги таъсирлашув соҳасида заррачалар тақсимотларидаги ҳиссаси нишон юзасидан учишда кластерланиш даражасига тенг. Шундай қилиб, молекуляр динамик моделлаштириш таъсирлашув зонасида углерод атомлари одатий юқори концентрациясини ҳисобга олган ҳолда, 10 наносекундали импульслар учун катта ўлчамли кластерлар шаклланиши кўрсатилди. q -гармоника интенсивлиги учун муносабат

$$I_q \propto |d_q|^2 N^2 L^2 \quad (11)$$

бу ерда $d_q - q\omega$ частотада нурлантирувчи дипол моменти, $|d_q|^2$ – алоҳида заррача нозикли оптик жавобини англатади, N – нурлантирувчи атомлар зичлиги, L – муҳит узунлиги.

10 наносекундали импульслар учун $|d_q^{plasma}|^2 / |d_q^{Ar}|^2 \approx 2 - 5$ га тенг, ва 8 пикосекундали импульслар учун $N^{plasma} = 2.6 \times 10^{17}$ см⁻³, $L^{plasma} = 0.5$ мм, $I_q^{plasma} / I_q^{Ar} \approx 0.2 - 0.5$, қийматлар кўрсатадики, $|d_q^{plasma}|^2 / |d_q^{Ar}|^2$ параметр 10 наносекундали импульслар билан шаклланган плазмага нисбатан бир тартибга ошиши ўрнатилди. Аргон плазмасига нисбатан юқори гармоника чиқиши кучайиши плазма таркибида кичик нанозарралар борлиги билан тушунтирилиши мумкин.

Графит нишони юзасида турли ультрақисқа импульслари плазмасининг турли шароитларда шаклланишидаги юқори гармоника генерациялари кейинги таҳлили углерод асосли материал плазмасида кўп микдордаги нанозарралар мавжудлиги ғоясини тасдиқлади. 10 наносекундали импульсларнинг 0.33×10^9 , 10^9 ва 3×10^9 Вт см⁻² интенсивликлар учун углерод атомлар концентрациясининг қийматлари 10^{18} , 2.5×10^{18} ва 3.7×10^{18} см⁻³ олинди. Интенсив пикосекунд импульслари (6.6×10^9 , 2×10^{10} , 6×10^{10} Вт см⁻³) учун атомлар концентрациясининг паст қийматлари (1.1×10^{17} , 2.6×10^{17} ва 4×10^{17} см⁻³) олинган бўлиб, оптимал плазмани шакллантиришда бу импульс энергияси ва унинг давомийлигининг ҳал қилувчи ҳисса эканлигини кўрсатади.

Кўпчилик юқори гармоника генерациялари тадқиқотлари лазер абляцияси усули билан ҳосил қилинган, қисқа плазма муҳитларидан (0,5 мм) фойдаланган ҳолда олиб борилган. Бу муҳит узунлиги L нинг берилган гармоника когерентлик узунлигидан ортиши дамлаш нурланишининг

энергиясини гармоника энергиясига алмаштириш самарадорлиги куйида келтирилган муносабат орқали камайишини кўрсатади:

$$I \propto \left(\frac{\sin \Delta K \frac{L}{2}}{\Delta K} \right)^2 \quad (12)$$

бу ерда когерентлик узунлиги куйидагича аниқланади:

$$L_k = \frac{\pi}{\Delta K} \quad (13)$$

Фазалар квази мослашиши шартида юқори гармоника генерациялари самарадорликларига заррачалар концентрацияси таъсирини қараймиз.

Қиздирувчи ва дамловчи импульс орасидаги кечикиш 43 нс. эканлигини ҳисобга олган ҳолда, Ag ва Mn нишонлари юзасидан 100 мкм масофада нейтрал атомлар ва ионлар концентрациялари тадқиқ этилди. Нурланиш оқими 1.2 Дж/см² бўлганда, ИТАР IMD усули ёрдамида Ag ва Mn заррачалари концентрациялари учун 2.7×10^{17} см⁻³ ва 1.8×10^{17} см⁻³ қийматлар олинган. Ушбу концентрациялар нурланишнинг берилган энергиясида қиздирувчи импульс давомийлигига боғлиқ эмаслиги аниқланди.

Узлуксиз муҳитда нурланиш тарқалишида фазалар квазимослашуви шартларидан ташқарида самарадорлик кучайиши куйидаги муносабат орқали ифодалаш мумкин:

$$n_p(L, L_a, L_k) \propto \frac{L_a^2}{1 + 4\pi^2 \left(\frac{L_a}{L_k} \right)^2} \left[1 + e^{-L/L_a} - 2 \cos \left(\pi \frac{L}{L_k} \right) e^{-(L/2L_a)} \right] \quad (14)$$

$$E_q(q, L, L_a, L_{k_q}) \propto \frac{n_p(qL, L_a, L_{k_q})}{n_p(L, L_a, L_{k_q})} \quad (15)$$

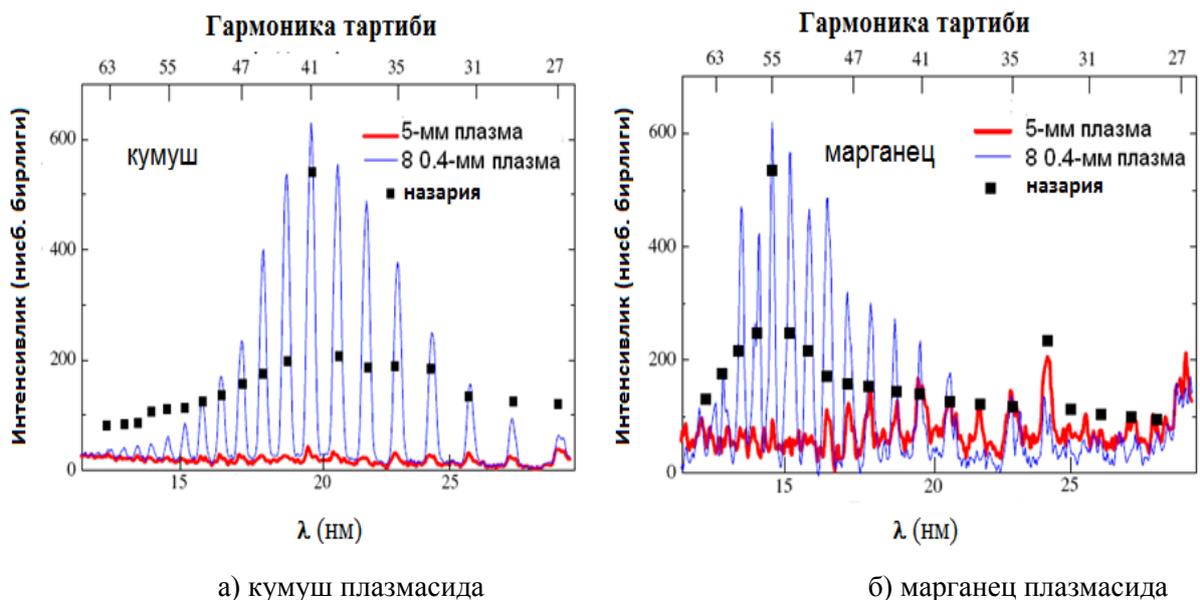
бу ерда L —муҳитнинг узунлиги, q —гармоника тартиби, L_a —ютилиш узунлиги, $E_q(q, L, L_a, L_{k_q})$ —гармониканинг нисбий кучайиши. Дамлаш нурланиш тўлқин узунлиги $\lambda \approx 800$ нанометрга тенг бўлган импульс q -гармоникаси учун когерентлик узунлигини куйидагича келтириш қулай:

$$L_k(\text{мм}) \approx 1.4 \times 10^{18} / qN_e(\text{см}^{-3}) \quad (16)$$

Нурланиш оқимининг 1.5 Дж/см² да ва концентрациянинг келтирилган қийматларидан юқори ионлашиш 10% бўлганда 31-гармоника когерентлик узунлиги 0,7 миллиметрга тенг. Бу инерт газларда мазкур гармоника когерентлик узунлигидан 10 марта кичик.

Плато соҳасида плазма узунлиги 5 мм бўлганда самарадорлик узунлиги қисқа бўлган плазма самардорлиги билан бир хил бўлиб, у тахминан 4×10^{-6} га тенг бўлади. Бу вақтда зичлиги модуляцияланган муҳитларда алмаштириш самарадорликлари 10 марта ортиқ эканлиги аниқланган.

9-расмда Ag ва Mn нишонларининг 5 мм узунликдаги узлуксиз плазмаси ва узунлиги 0.4 мм бўлган 8 та плазма оқимида гармоникалар алмаштириш самарадорлигининг қиёсий қийматлари келтирилган. Расмдан кўринадики, модда турлари кучаювчи гармоникалар жойлашиш ҳолатига таъсир қилади ва бу нишонларни қиздирганда эркин электронлар концентрацияси турлича эканлигига боғлиқ. Лазер абляция усули билан олинган оптик зичлиги фазовий модуляцияланган лазер плазмасида бир тўплам юқори гармоника гене-рацияларини кучайтириш усулидан плазмадаги ионлар концентрациясини аниқлаш учун фойдаланиш мумкин. Когерентлик узунлигини аниқлашда асосида Ag ва Mn нишонларининг эркин электронлари концентрациялари мос равишда 6.2×10^{16} ва $8.1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ га тенг эканлиги ҳисобланган. Юқори гармоника самарадорлигининг дамлаш нурланиши оптик ўқидан узоқлашишига боғлиқ радиал боғланишда юқори гармоника самарадорлигининг кескин камайиши кузатилди. Оптик зичлиги фазовий модуляцияланган плазмаларда фазалар квази мослашиши асосида кучайиш бўйича тажриба натижаларини аниқ миқдорий олдиндан айтиш учун назарий аниқланган электронлар концентрациясининг аниқ қийматларидан фойдаланиш мумкин.



9 - расм. Зичлиги фазовий модуляцияланган плазмаларда юқори гармоника генерациясининг кучайиши

9-расмда марганец плазмасида 23-гармониканинг резонанс кучайишини кўриш мумкин. Тажриба натижалари фазалар квази мослашиши билан гармоникалар резонанс генерацияларининг биргаликда бажарилишини тасдиқлайди. Мазкур кучайиш режимида жавоблар мустақиллиги холида асосланувчи плазмада гармоникалар нурланиши тарқалишини ҳисоблаш алгоритмига вақтли диполь қўйилиб, марганец алоҳида атомининг ночизиқли жавобини назарий ҳисоблашда вақтли зичлик функционал усулидан фойдаланилди. Бунда барча оптик электронлар жавоблари моделлаштирилди.

Бугунги кунда фазалар квази мослашиши ва юқори гармоникалар резонанс генерацияларини бир вақтда бажарилишини тасдиқловчи, инкор этувчи тажриба натижалари мавжуд эмас. Бу амалий муҳим ночизиқли тизимларда, хусусан, индий нишони юзасида лазер абляцияси усули билан ҳосил қилинган плазмасида атомлар ва ионлар концентрациясини ҳисоблаш атомлар ўзаро таъсирлашуви ишончли потенциаллари мавжуд эмаслиги учун мураккаб ҳисобланади. Бироқ тадқиқотда қиздирувчи импульс умумий энергиясига атомлар концентрациясининг тўғри пропорционал эканлиги, берилган энергияда қиздирувчи импульс интенсивлигини назорат қилиш йўли билан резонанс шартларига фазалар квазимослашуви соҳаларини созлаш имконини бериши кўрсатилган.

ХУЛОСА

1. Илк бор аниқ потенциаллар ва дамловчи импульсларни экспериментал параметрларига яқинларини моделлаштириш асосида юқори гармоникали спектрлар резонанс генерацияси тўғрисида барқарор информация олиш таъминланган.

2. Юқори гармоника резонанс генерациялари ионлашиш, лазер майдонида электронлар тезланиши, тезланиш билан ҳаракатланувчи электроннинг ноэластик сочилиши натижасида ион ички электронларни резонанс сатҳга уйғотилиши йўли билан резонанс сатҳлари бандлигини таъминлаш, мажбурий нурланиш асосида айна тартибли норезонанс гармоникалар кучайиши туфайли резонанс гармоникалар генерациялари билан уйғотилган сатҳдан асосий сатҳга электрон рекомбинациясидан ташкил топганлиги кўрсатилган.

3. Илк бор, молекуляр майдонда барча углерод атомларининг ҳиссаларини тўлиқ моделлаштириш учун фуллерен C_{60} плазмасида юқори гармоника генерацияларини зичлик фукнционал назариясининг вақтий боғланишли усули ёрдамида моделлаштирилиб фуллеренлар юзавий плазмон резонанс соҳаларидаги гармоникаларнинг бу соҳага мос келмаган гармоникаларга нисбатан 10 марта кучайиши аниқланган.

4. Эндоедрал фуллеренлар $In C_{60}$ ва $Sb C_{60}$ лазер плазмаларида киритилган атомлар атомар резонансларига фуллеренлар қобиклари плазмон ютилиш максимумлари силжиши ҳисобига соф C_{60} фуллеренига нисбатан резонансли кучайган юқори гармоника гуруҳлари силжиши рўй бериши топилган.

5. Лазер плазмаси концентрацияси ошиши натижасида юқори гармоника генерациялари самарадорликлари ортишини чекловчи факторлар эркин электронлар концентрациялари ортиши билан фаза мослашини бузилиши ҳисобига содир бўлиши кўрсатилган.

6. Индий плазмасида оптимал самарадорлик (2×10^{-4}) қиймати қиздирувчи импульс интенсивлиги 2×10^9 Вт см⁻² ва давомийлиги 10 пс бўлганда, хром плазмасида эса оптимал қиздирувчи импульс интенсивлиги 10^{11} Вт см⁻² ва давомийлиги 100 фс бўлганда амалга оширилади, бу ҳолат

ушбу элементларда резонанс сатҳларнинг ионланиш даражаларининг турлича эканлигидан далолат беради.

7. Қисқа (100 фс тартибида) ва интенсив (10^{11} Вт см⁻²) импульслар абляциясида ўлчами 10 нм бўлган нанозаррачалар шаклланиши локал майдон эффекти ҳисобига суғ майдонларда юқори гармоника генерациялари кучайишига, кучли майдонларда эса эркин электронлар ва нурланувчи диполлар эффектив концентрацияси камайишига олиб келиши қайд қилинган.

8. Илк бор оптик зичлиги фазовий моделлаштирилган плазмаларда қиздирувчи импульс интенсивлиги ва давомийлигини ҳисобга олган ҳолда юқори гармоника резонанс генерациялари самарадорликларини бошқариш усули ишлаб чиқилган.

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

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

РЕДЬКИН ПАВЕЛ ВИТАЛЬЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ ЭФФЕКТОВ И
КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ НА РЕЗОНАНСНУЮ ГЕНЕРАЦИЮ
ВЫСШИХ ГАРМОНИК КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.11 – Лазерная физика (физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2016

Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 30.09.2014/В2014.3-4.FM117 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на вебстранице Научного совета по адресу (www.fti-kengash.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный консультант: **Ганеев Рашид Аширович,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Усманов Тимур Бекмурадович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Юсупов Джавдат Бакиджанович,
доктор физико-математических наук

Азаматов Закир Тахирович,
доктор физико-математических наук

Ведущая организация: **Национальный университет Узбекистана**

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, Бодомзор йули, 2б. Тел./факс: (+99871) 235-42-91, e-mail:lutp@uzsci.net).

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

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2016 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2016 г.).

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. Бахромов
председатель научного семинара при одnorазовом Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодня в быстро развивающемся направлении лазерных технологий и нелинейной оптики исследования по изучению влияния многоэлектронных процессов и концентрации частиц на генерацию высших гармоник для получения когерентного излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена представляются одними из перспективных направлений лазерной физики. При этом основное внимание уделяется повышению эффективности генерируемых гармоник в условиях резонанса и квазисинхронизма фаз взаимодействующих волн. Данные исследования имеют важное научно-прикладное значение для практической реализации перспектив в области лазерной физики, нелинейной оптики, фемтосекундной голографии, генерации импульсов аттосекундной длительности, спектроскопии сверхбыстрых процессов.

Выполнение условий резонансной генерации высших гармоник и квазисогласования фаз излучения накачки с излучением гармоник обеспечивает существенное увеличение эффективности преобразования энергии импульсов фемтосекундной длительности интенсивностью 10^{14} - 10^{15} Вт/см², используемых в качестве излучения накачки, в излучение гармоник. В связи с этим, возможности использования в практике генерации высших гармоник искусственных наноматериалов, имеющих сложную структуру, а также подобных эндодральным фуллеренам, остаются малоизученными.

Востребованность темы диссертации показывает развитие методики генерации высших гармоник в плазменных образованиях, повышение эффективности нелинейного преобразования частоты при резонансной генерации высших гармоник, исследование наночастиц, образующихся в процессе лазерной абляции. Кроме того, создание высокоэффективных нелинейных элементов на основе метода лазерной абляции представляя особую значимость для решения важных проблем нелинейной оптики, дают возможность получения теоретических результатов по анализу концентрации лазерной плазмы.

До сих пор влияние концентрации свободных электронов на эффективность генерации высших гармоник в плазмах и влияние концентрации частиц на генерацию высших гармоник остаются практически неизученными. Решение этих задач позволит установить основные закономерности и особенности резонансной генерации высших гармоник в реальных системах, имеющих практический интерес при создании высокоэффективных источников когерентного излучения и установлении важных научно-практических закономерностей.

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, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в рамках программы: Ф II – «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Международный обзор научных исследований по теме диссертации. Исследования многоэлектронных эффектов в резонансной генерации высших гармоник, связанные с повышением эффективности резонансной генерации высших гармоник, проводятся в ведущих научных центрах и университетах, в частности, Университете Пьера и Марии Кюри (Париж, Франция), Институте физики комплексных систем имени Макса Планка (Дрезден, Германия), Национальном институте научных исследований (Монреаль, Канада), Пекинском институте физики (Пекин, Китай), Московском государственном университете (Москва, Россия), Университете Сараево (Сараево, Босния и Герцеговина), Институте общей физики РАН (Москва, Россия), Воронежском государственном университете (Воронеж, Россия) и ряде других зарубежных научных центров мира.

На мировом уровне в изучении механизмов взаимодействия лазерного поля и нелинейного преобразования частоты мощных ультракоротких лазерных импульсов получен ряд научных результатов: теоретические результаты по аналитическому полуклассическому приближению единственного активного электрона (Университет Пьера и Марии Кюри, Франция; институт Макса Борна, Германия); подтверждены возможности усиления высших гармоник в газовых средах с использованием атомных и ионных резонансов (Университет Сараево, Босния и Герцеговина; Институт общей физики РАН, Россия).

В настоящее время в области лазерной физики и нелинейной оптики по резонансной генерации высших гармоник в плазменных средах по ряду приоритетных направлений проводятся исследования, в том числе: по развитию теоретических и практических способов определения концентрации свободных электронов и ионов, атомов в лазерной плазме; получены научные и практические результаты по определению основных физических механизмов, а также влиянию многоэлектронных эффектов на резонансную генерацию высших гармоник.

Степень изученности проблемы. На данный момент нерезонансная генерация высших гармоник изучена достаточно полно как экспериментально, так и теоретически. Резонансная генерация высших гармоник достаточно подробно исследована экспериментально, но с теоретической точки зрения до настоящего исследования не было создано модели, полностью согласующейся с экспериментом. R. Taieb, V. Veniard, E.S. Toma, C. Figueira de Morisson Faria, D.B. Milosevic и другими учеными стран Евросоюза предложен ряд механизмов резонансной генерации высших гармоник, которые описывают некоторые экспериментальные закономерности, но не подтверждают экспериментальные данные по

усилению соседних гармоник в области резонанса. Многоэлектронные методы: многоконфигурационный временной метод Хартри-Фока и временной метод функционала плотности успешно применяли ранее J. Zanghellini, D. Bauer и другие ученые стран Евросоюза для моделирования генерации высших гармоник при наличии взаимодействия, которые ранее не были использованы.

Российские ученые В. Стрелков, М. Иванов, С. Стремоухов, используя одноэлектронные методы, получили хорошие результаты, однако требуемые потенциальные барьеры вводятся в рассматриваемые системы извне, а аналитическая модель напрямую не связана с результатами расчетов и может дать верные результаты лишь в других моделях резонансной генерации высших гармоник.

Учеными из Узбекистана, в частности, Р.А. Ганеевым, И.А. Кулагиным, Т.Б. Усмановым, проводятся исследования генерации высших гармоник в сильноионизированной плазме, а также резонансной генерации высших гармоник в многоструйной лазерной плазме. Ими в сильноионизированных системах получено излучение гармоник до $\lambda=2\div 4$ нм, однако эффективность преобразования в гармоники с такими длинами волн крайне мала ($10^{-8} \div 10^{-7}$). Кроме того, по резонансной генерации высших гармоник и генерации высших гармоник в многоструйной лазерной плазме получены эффективности преобразования в энергию гармоник соответственно 10^{-4} и 10^{-5} . Однако проблемы влияния спектральных свойств излучения накачки и электронной структуры атомов, а также ионов, составляющих лазерную плазму на резонансную генерацию высших гармоник и квазисогласование фаз, не рассмотрены.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов ОТ-Ф2-021 «Физика размерных явлений в полупроводниковых и металлических наноматериалах» (2007-2011); Ф2-09 «Исследование механизмов резонансного усиления генерации высших гармоник лазерного излучения» (2012-2016) Самаркандского государственного университета.

Целью исследования является определение влияния многоэлектронных эффектов и концентрации частиц на резонансную генерацию высших гармоник.

Задачи исследования:

изучить влияние импульсов накачки, которые могут вступать в резонанс с системой на определенных этапах, на эффективность генерации высших гармоник;

определить влияние многоэлектронных эффектов и концентрации частиц на резонансную генерацию высших гармоник;

выявить механизм резонансной генерации высших гармоник, объясняющий результаты экспериментов по резонансной генерации высших гармоник и оптимизировать условия резонансной генерации высших гармоник;

теоретически исследовать перспективные материалы для резонансной генерации высших гармоник, в частности, лазерные плазмы металлов и полупроводников различной степени ионизации, эндоэдральные фуллерены;

разработать методы экспериментального и теоретического определения концентрации атомов, ионов и свободных электронов в лазерных плазмах, а также методы управления концентрацией частиц в лазерной плазме с помощью контроля параметров импульсов абляции;

провести поиск и настройку оптимального программно-теоретического пакета для моделирования резонансной генерации высших гармоник и построения обоснованных приближенных многоэлектронных систем;

обобщить результаты проверки гипотез и определить механизмы резонансной генерации высших гармоник, исследовать возможности оптимизации резонансной генерации высших гармоник.

В качестве **объекта исследования** взяты плазменные среды, полученные методом лазерной абляции и высшие гармоники лазерного излучения.

Предметом исследования являются многоэлектронные эффекты при резонансной генерации высших гармоник когерентного излучения.

Методы исследования: многоконфигурационный временной метод Хартри-Фока, временной метод функционала плотности, молекулярно-динамический метод.

Научная новизна исследования заключается в следующих результатах:

показано, что многоэлектронные эффекты приводят к резонансной генерации высших гармоник в результате неупругого рассеяния ускоренного электрона на ионе с возбуждением электронов иона на резонансный уровень;

предложен механизм резонансной генерации высших гармоник, объясняющий результаты экспериментов по резонансной генерации высших гармоник и позволяющий оптимизировать процесс резонансной генерации высших гармоник на основе расчета оптимальных импульсов абляции и накачки;

предложено использование неионизированной плазмы в качестве перспективной среды для наблюдения резонансной генерации высших гармоник, основанной на переходах в однократно ионизированных средах;

на основе теоретических расчетов сдвига плазмонных пиков поглощения оболочки молекулы C_{60} в эндоэдральных фуллеренах $C_{60}+In$ и $C_{60}+Sb$ к соответствующим ионным резонансам внедренных полупроводников и сдвига максимума резонансного усиления группы гармоник к новым пикам плазмонного поглощения, показана возможность равномерного усиления группы гармоник в лазерной плазме, созданной испарением смеси эндоэдральных фуллеренов;

разработан метод теоретического определения концентрации атомов, ионов и свободных электронов в плазме, основанный на учете усиления группы высших гармоник при квазисогласовании фаз в процессе лазерной абляции с использованием длинных импульсов абляции;

выявлены механизмы ограничения эффективности преобразования частоты с ростом концентрации частиц лазерной плазмы углерода созданной с использованием импульсов абляции длительностью 8 пикосекунд и 10 наносекунд.

предложена методика определения закономерности зависимости степени ионизации при заданной концентрации от длительности импульса абляции приводящая к усилению отдельной высшей гармоники в области плато более чем в 1000 раз при сочетании квазисогласования фаз и резонансных условий.

Практические результаты исследований:

разработана методика определения параметров импульсов лазерной абляции для достижения наибольшей эффективности резонансной генерации высших гармоник;

разработана методика теоретического определения концентрации атомов, ионов и свободных электронов в лазерной плазме на основе компьютерного моделирования и экспериментах по генерации высших гармоник в плазмах с пространственно модулированной оптической плотностью;

разработана схема использования смеси эндоэдральных фуллеренов с внедренными полупроводниками для управления положением группы резонансно усиленных гармоник.

Достоверность результатов исследований состоит в следующем.

Результаты компьютерного моделирования подтверждаются применимостью использованных программ для решения схожих задач квантовой механики, непротиворечивостью с результатами экспериментального определения спектров высших гармоник другими авторами, а также непротиворечивостью с основными теоретическими положениями, справедливыми для нерезонансного случая.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в том, что предложенные подходы к расчету резонансной генерации высших гармоник позволяют обеспечить высокое соответствие с экспериментом, а также упростить поиск перспективных материалов и импульсов для резонансной генерации высших гармоник.

Практическая значимость результатов исследований диссертации заключается в том, что модель многоэлектронной резонансной рекомбинации может быть использована для оптимизации экспериментов по резонансной генерации высших гармоник и квазисогласованию фаз в плазмах с пространственно модулированной оптической плотностью, что позволяет значительно увеличить интенсивность генерируемых импульсов лазерного излучения для их применения в практически важных областях науки и техники.

Внедрение результатов исследований. Разработанная в диссертационной работе методология определения характеристик плазмы, создаваемой с помощью лазерной абляции, а также метод усиления резонансной генерации высших гармоник использованы в гранте 14G0206

«Грант содействия творческим научным исследованиям Японского общества содействия развитию науки» для объяснения усиления резонансных гармоник в лазерной плазме индия (Заключение Центра офтальмологии и передовых лазеров при Медицинском Университете Саитама, 26.02.2016, Япония). Применение полученных результатов позволило 10кратно повысить интенсивность резонансных гармоник при тех же затратах энергии и редких материалов.

Апробация работы. Результаты диссертации прошли апробацию на следующих конференциях и симпозиумах: 5-й Международной конференции «Актуальные проблемы физической электроники UzPEC-5» (Ташкент, 2009); Республиканской конференции «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» (Самарканд, 2010); 2-й Международной конференции «Оптика и фотоника-2013» (Самарканд, 2013); Международной конференции по фундаментальной атомной спектроскопии «ФАС-XX» (Россия, Воронеж, 2013); Международной конференции «Современная наука: теоретический и практический взгляд» (Россия, Челябинск, 2015), на семинаре Специализированного конструкторско-технологического Бюро при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан (09.03.2016), а также в одноразовом Научном семинаре при Научном совете 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете по присуждению ученой степени доктора наук по специальности 01.04.11-Лазерная физика (04.05.2016).

Опубликованность результатов. По теме диссертации всего опубликованы 22 научные работы, из них 15 статей изданы во влиятельных международных журналах, а также 5 тезисов изданы в сборниках международных и республиканских конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, содержит 198 страниц машинописного текста, 40 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность исследования, сформулированы цели и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость.

В первой главе **«Теоретические и экспериментальные данные по резонансной генерации высших гармоник»** приведен обзор литературных данных по состоянию проблемы влияния многоэлектронных эффектов и концентрации частиц на резонансную генерацию высших гармоник, а также по теоретическим исследованиям резонансной генерации высших гармоник и их связи с предложенной в диссертационной работе моделью резонансной генерации высших гармоник.

Во второй главе **«Влияние многоэлектронных эффектов на резонансную генерацию высших гармоник»** рассмотрено влияние различных особенностей межэлектронного взаимодействия на резонансную генерацию высших гармоник на основе многоконфигурационного временного метода Хартри-Фока.

Показано, что при относительно невысоком увеличении вычислительной сложности по сравнению с прямым решением временного уравнения Шредингера, многоконфигурационный временной метод Хартри-Фока позволяет получить точные результаты для сильно коррелированных систем. В многоконфигурационном временном методе Хартри – Фока предположение о волновой функции имеет вид

$$\Psi(Q_1, \dots, Q_f, t) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_f=1}^{n_f} A_{j_1 \dots j_f}(t) \prod_{\kappa=1}^f \varphi_{j\kappa}^{(\kappa)}(Q_\kappa, t), \quad (1)$$

где Q_1, \dots, Q_f – координаты частиц, $A_{j_1 \dots j_f}$ – коэффициенты разложения в многоконфигурационном временном методе Хартри, $\varphi_{j\kappa}^{(\kappa)}$ – n_κ временно-зависимые функции разложения для каждой степени свободы κ .

Многоконфигурационный временной метод Хартри-Фока также вводит точную обменную симметрию временно-зависимого гамильтониана и ограничение на подпространство полностью антисимметричных решений. Взаимодействие электронов в данном методе парное. Это приводит к тому, что начальные волновые функции всех частиц являются идентичными, а начальный А-вектор $A_{j_1 \dots j_f}$ должен быть полностью антисимметризован по отношению к своим индексам.

Для моделирования резонансной генерации высших гармоник целесообразно использовать представление дискретных переменных и быстрых преобразований Фурье. На основании сравнительных исследований

различных представлений было выбрано представление дискретных переменных синусоидального типа, которое разбивает сетку на равные доли и упрощает создание потенциала межэлектронного взаимодействия, а также позволяет сравнивать результаты с данными, полученными с помощью других программ для решения временного уравнения Шредингера. Учитывая, что относительная ошибка является низкой (~40 миллиэлектрон-вольт) для выбранных функций разложения, данное приближение можно считать оптимальным с точки зрения точности и быстродействия.

Комплексные поглощающие потенциалы использовались для создания поглощающих границ, необходимых для устранения отражений волновой функции от границы сетки, а также для сокращения длины сетки и имели вид:

$$-iW(x) = -i\eta|x - x_c|^b \Theta(\pm(x - x_c)), \quad (2)$$

где x_c , η и b обозначают начальную точку, силу и порядок комплексного поглощающего потенциала, Θ обозначает ступенчатую функцию Хэвисайда, знак «+» определяет положение комплексного поглощающего потенциала справа от x_c , знак «-» соответственно слева. Моделирование показало, что само наличие поглощающих границ сильно изменяет временной диполь, однако порядок комплексного поглощающего потенциала не имеет решающего влияния на качественный характер временно-зависимого диполя, поэтому использовались комплексные поглощающие потенциалы 1-го порядка силой 0.2 атомные единицы, расположенные на расстоянии 20 атомных единиц от краев любой использованной сетки.

Исследования влияния многоэлектронных эффектов на резонансную генерацию высших гармоник выполнены для трехмерной фуллереноподобной системы, в которой активными принимались только два электрона, а потенциал электронного остова системы имел вид:

$$V(r) = \begin{cases} -3 \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{R_0^2 - R_i^2}{2} \right), r \leq R_i \\ - \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{3R_0^2}{2} - \left[\frac{r^2}{2} + \frac{R_i^3}{r} \right] \right) - v_0, R_i < r < R_0, r_n = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2. \\ -250/r, r \geq R_0 \end{cases} \quad (3)$$

При этом смягченный потенциал двухэлектронного взаимодействия можно представить в виде:

$$V_{ee} = 1 / \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 + 2}. \quad (4)$$

Спектр поглощения данной системы, полученный вычислением свободной эволюции системы во времени после приложения дельта-импульса, приведен на рис. 1. Максимум поглощения системы соответствует 13-й гармонике излучения с энергией 0.057 атомных единицы. Магнитная составляющая лазерного импульса при моделировании не учитывается, поскольку рассматриваемые интенсивности ($10^{13} \div 10^{16}$ Вт/см²), соответствующие использованным в реальных экспериментах лазерам, не приводят к релятивистскому движению активного электрона.

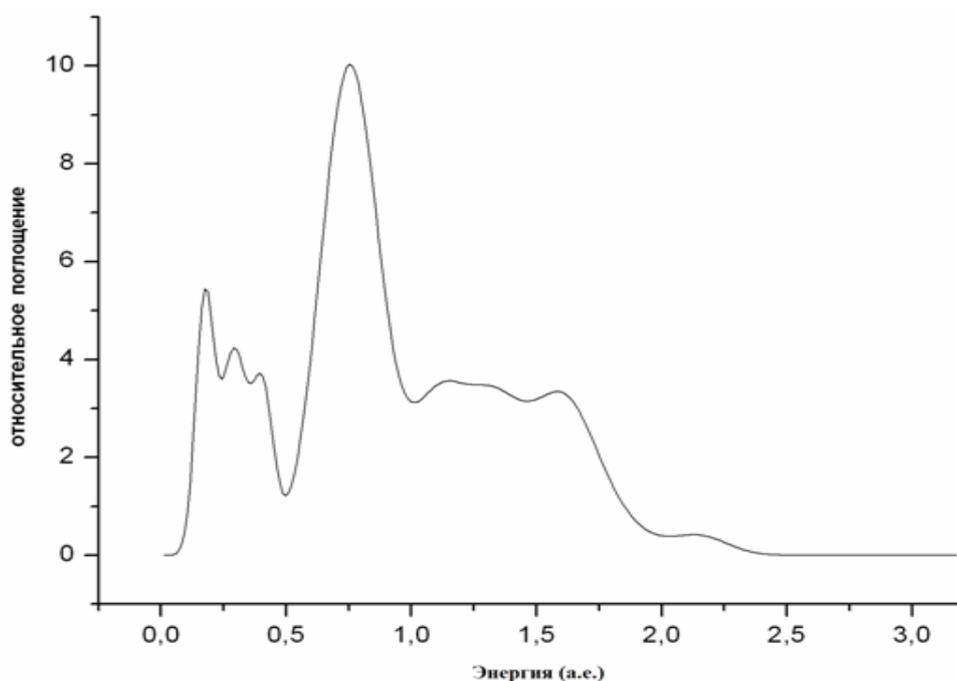


Рис. 1. Спектр поглощения модели фуллера с двумя активными электронами

При моделировании резонансной генерации высших гармоник несущая частота ω лазерного импульса длительностью 60 фемтосекунд принималась равной 0.057 атомных единиц.

Для исследования отстройки от резонанса использовалась несущая частота 0.046 атомных единицы. Вместе с этим для введения соответствующих отклонений от плоской монохроматичной волны вводилось соответствующее Гауссово уширение по интенсивности импульса. Соответственно используемая волна имела вид:

$$E(t) = \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) E_0 \sin(\omega t). \quad (5)$$

Изучение спектров резонансной генерации высших гармоник, возникающих при взаимодействии данной системы с фемтосекундными импульсами, имеющими центральную частоту 0.057 атомных единицы (рис. 2), показало, что уменьшение числа конфигураций, вплоть до одной функции разложения не приводит к полному исчезновению резонансной генерации

высших гармоник, но уменьшает наблюдаемую эффективность преобразования. В одномерном случае наблюдаемая эффективность преобразования уменьшалась. Можно утверждать, что именно с данным фактом связана необходимость введения большого числа конфигураций для наблюдения резонансной генерации высших гармоник в одномерном случае. Наибольшую близость к экспериментальным данным имело, как и следовало ожидать, наиболее точное приближение с шестью функциями разложения.

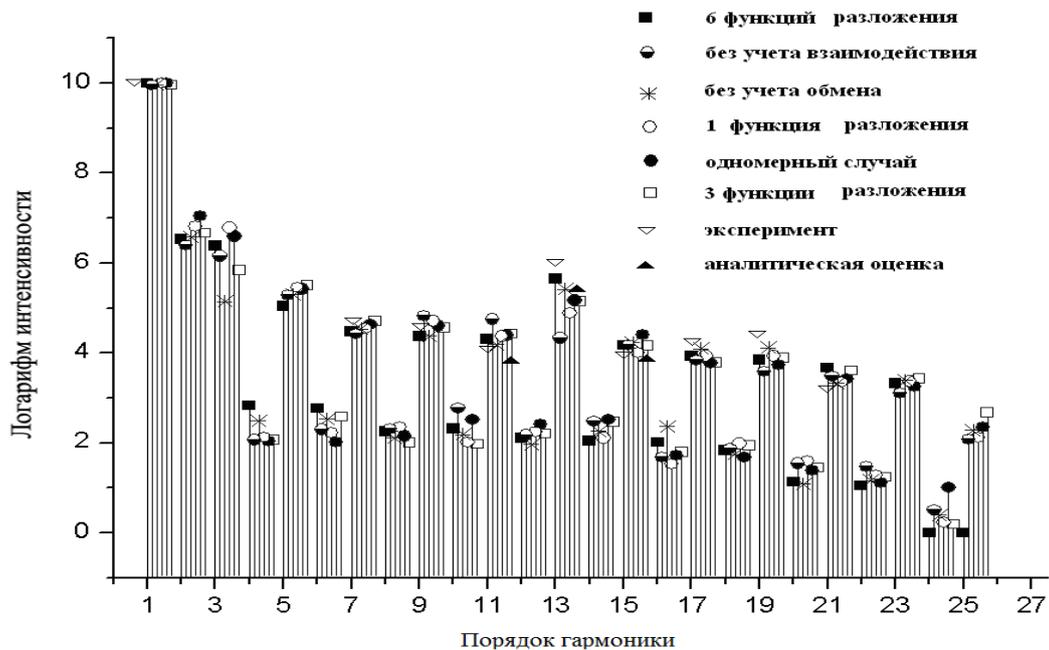


Рис. 2. Влияние приближений на эффективность резонансной генерации высших гармоник

Аналитическая оценка эффективности преобразования по соотношению

$$\frac{I_{resonant}}{I_{nonresonant}} = \frac{2\pi\Omega^3 f_{osc}}{\omega p^3 [Z * M(p)]^2} \left[\frac{\Gamma^2}{4(\Omega - q\omega)^2 + \Gamma^2} \right] \quad (6)$$

давала результат, близкий к результату без учета электронного обмена, поскольку аналитическая модель не включает в себя этот существенно многоэлектронный эффект. Следует также отметить, что возможные отклонения от эксперимента, получаемые по данной аналитической формуле, также связаны и с механизмами перехода электрона в основное состояние, рассмотренными при ее выводе. Поэтому для достижения количественного соответствия с экспериментом предпочтительно моделирование процесса резонансной генерации высших гармоник.

Пренебрежение межэлектронным взаимодействием полностью разрушало эффект резонансной генерации высших гармоник. Вместе с этим представление электронов как различимых частиц практически не снизило эффективности резонансной генерации высших гармоник. Наиболее важным практическим приложением данного явления является необходимость точного учета межэлектронного отталкивания, тогда как обменным эффектам

не следует уделять большого внимания, если не требуется максимальной близости к эксперименту.

На основании результатов данных исследований в слабо коррелированных системах точность учета электронной корреляции не оказывает качественного влияния на наблюдаемость резонансной генерации высших гармоник. Данное обстоятельство особо значимо в том отношении, что моделирование электронного обмена—намного более простая задача, чем моделирование электронной корреляции.

Впервые показано, что резонансная генерация высших гармоник целиком объясняется одноатомными многоэлектронными эффектами, а следовательно, может сочетаться с согласованием фаз накачки и гармоник при распространении излучения в протяженных плазмах.

В третьей главе «**Исследование перспективных нелинейных систем для резонансной генерации высших гармоник**» приводятся расчетные данные по моделированию резонансной генерации высших гармоник на основе временного метода функционала плотности.

В методе временного функционала плотности решение уравнения Шредингера заменяется решением системы уравнений Коэна-Шама для невзаимодействующих электронов. Используемый в нем потенциал

$$v_{xc}(r, t) = v_{ext}(r, t) + v_{Hartree}(r, t) + v_{xc}(r, t) \quad (7)$$

является единственным приближением, а для низших гармоник допустимо адиабатическое приближение локальной плотности

$$v_{xc}^{adiabatic}(r, t) = \tilde{v}_{xc}[n](r)|_{n=n(t)}, \quad (8)$$

тогда как для высших гармоник используется точный обменный потенциал (рис.3).

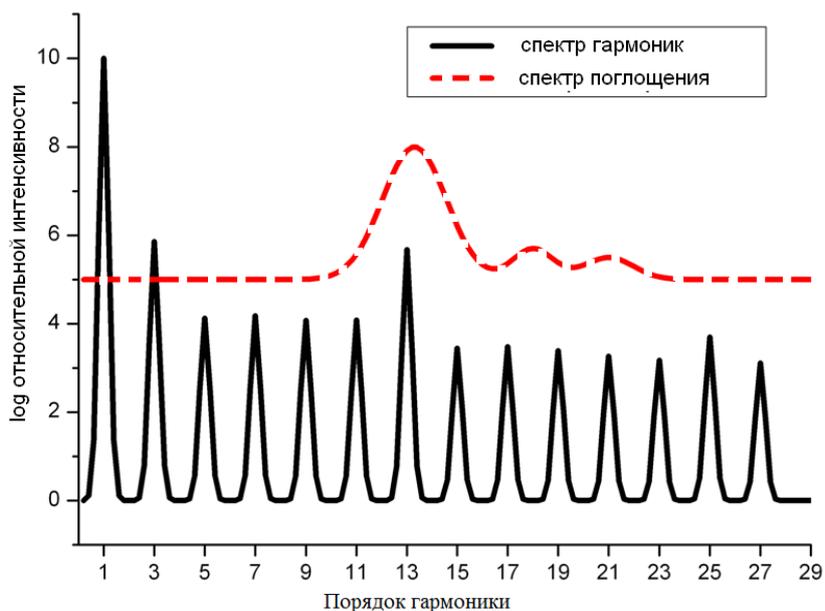


Рис. 3. Результаты моделирования резонансной генерации высших гармоник от иона индия (In^{+1})

Для моделирования резонансной генерации высших гармоник в плазме индия атом индия представлен с использованием псевдопотенциалов, поэтому полученный по методу дельта-сдвига спектр был несколько упрощенным и имел ярко выраженный максимум в области 13-й гармоники излучения с частотой 0.057 атомных единицы, который сопоставляется со спектром поглощения данной системы, полученным на основе Фурье-преобразований.

Впервые проведено теоретическое моделирование генерации высших гармоник в плазме фуллеренов C_{60} методом временно-зависимой теории функционала плотности для случая полного моделирования вклада всех атомов углерода в молекулярное поле. Атомы углерода моделировались с использованием нормосохраняющих нелокальных потенциалов Тройллера-Мартинса, обменного функционала Слэтера, корреляционных функционалов, адиабатического приближения локальной плотности. На основе сравнения расчетных данных с экспериментальными показано, что значительное увеличение эффективности генерации высших гармоник в случае плазмы C_{60} объясняется на основе многоэлектронной резонансной рекомбинации как передача энергии ускоряемого электрона на возбуждение сразу нескольких электронов в плазмонное колебание (рис. 4).

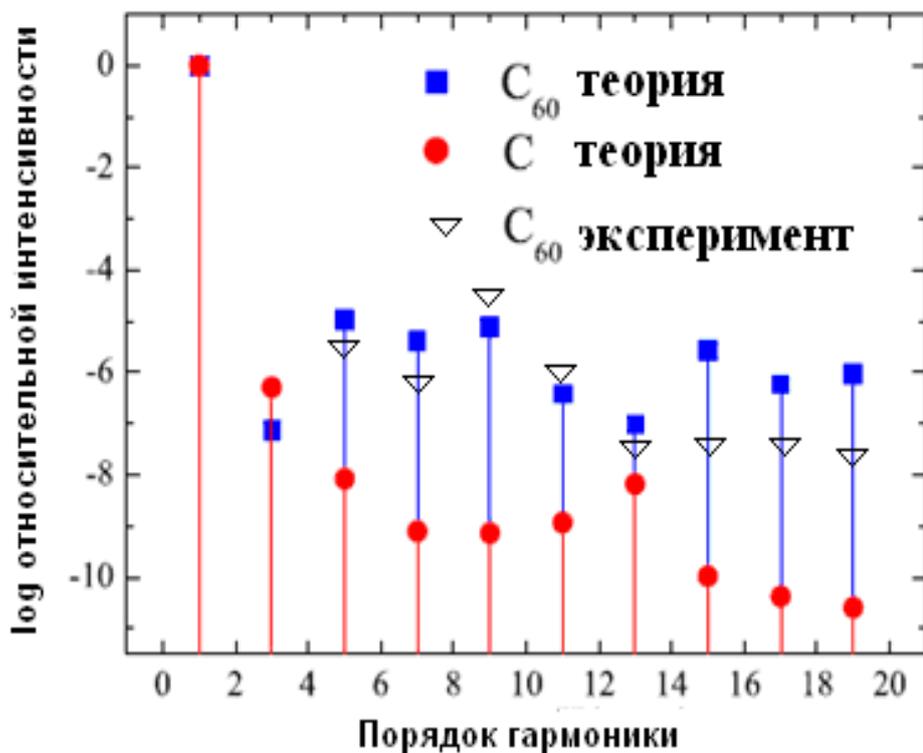
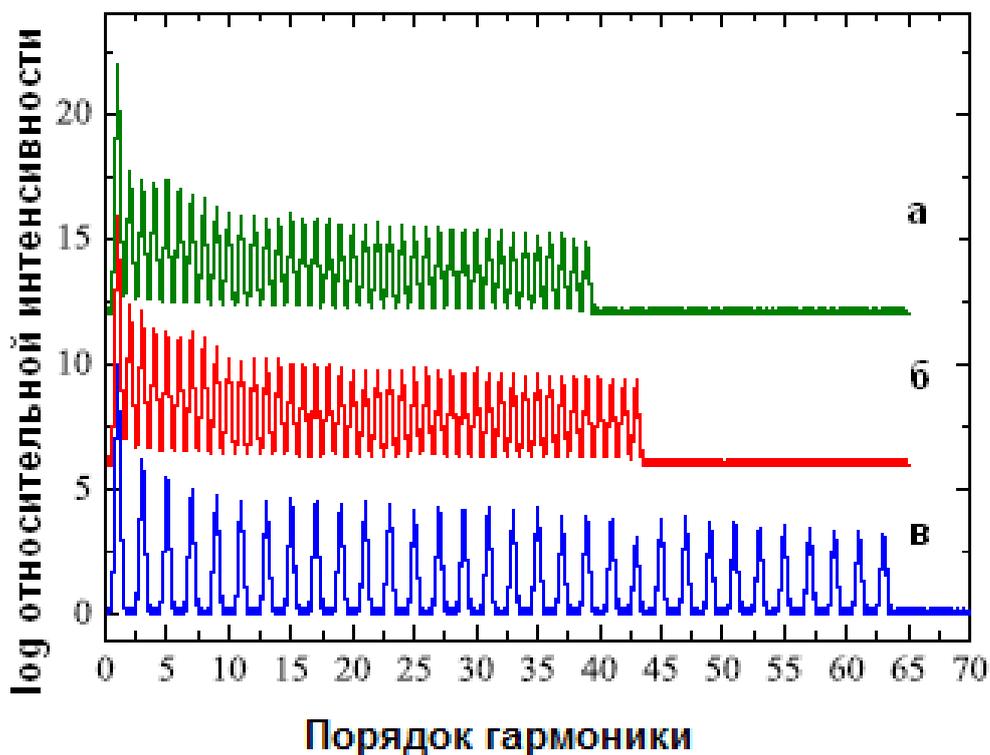


Рис. 4. Сравнительный спектр мощности гармоник от атомов углерода и молекул фуллерена C_{60} при идентичных условиях

Усиление генерации высших гармоник в плазме C_{60} по сравнению с плазмой углерода, несмотря на более высокий коэффициент затухания, указывает на то, что резонансная генерация высших гармоник в плазме C_{60} не связана с хорошим фазовым согласованием при распространении. Это

обстоятельство доказывает справедливость модели многоэлектронной резонансной рекомбинации при усилении ряда гармоник в плазме C_{60} , тогда как эффекты распространения были признаны факторами, существенно ограничивающими эффективность резонансной генерации высших гармоник в подобных средах. Действительно, сечение фотоионизации C_{60} имеет широкий гигантский плазмонный резонанс примерно при 20 эВ (около 11-й, 13-й и 15-й гармоник излучения титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 нм) с полушириной на половине высоты полосы 10 электрон-вольт. Вычисляя длину поглощения с использованием предполагаемой плотности фуллеренов и известным сечением фотоионизации, в области взаимодействия ($5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) получим, что длина поглощения изменяется от 0.8 мм (для 7-й и 17-й гармоник) до 0.3 мм (для 11-й, 13-й и 15-й гармоник).

Исследование генерации высших гармоник выполнено в двухчастотных полях накачки (рис.5). Выявлено, что спектры генерации высших гармоник находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами генерации высших гармоник. Точность моделирования исследуемых систем обеспечена малым шагом интегрирования по времени, малым расстоянием между точками сетки и большими размерами сетки в трех измерениях, точностью выбранных потенциалов ионизации (для атомов серебра) и близостью параметров лазерного импульса к экспериментальным.



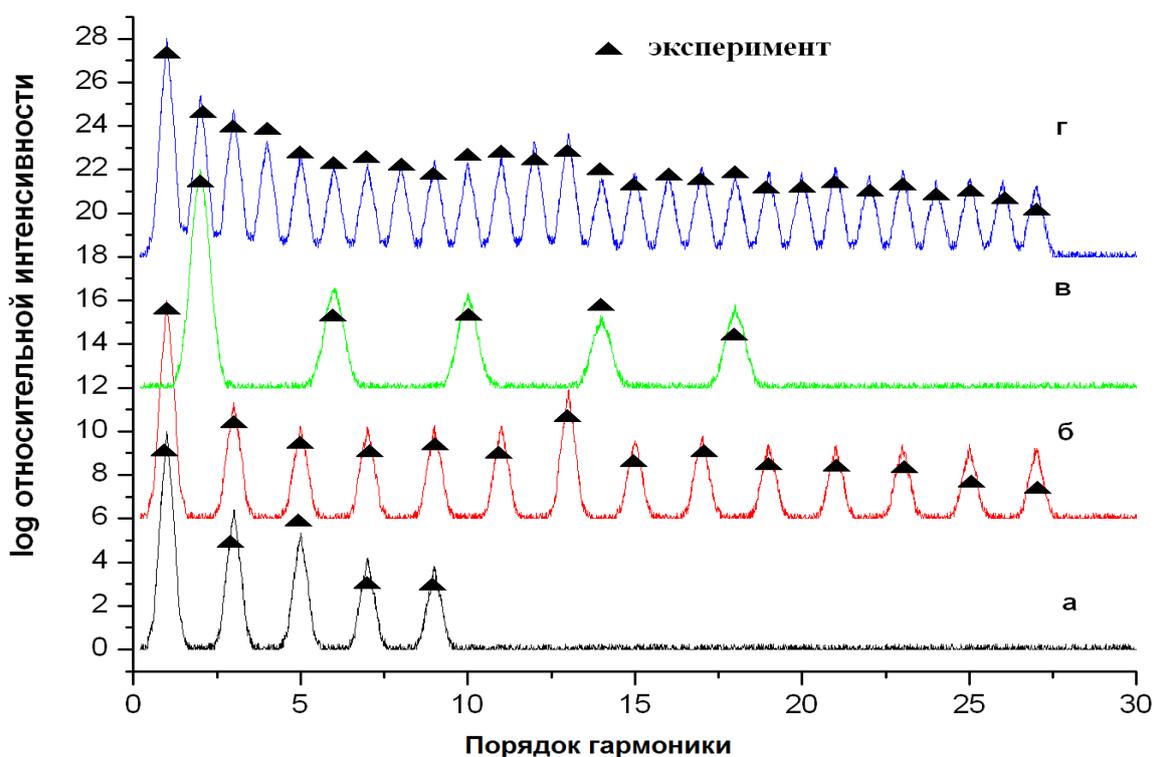
а-двухчастотная накачка с параллельной поляризацией; б-двухчастотная накачка с ортогональной поляризацией; в-одночастотная накачка

Рис. 5. Спектры мощности генерации высших гармоник в плазме серебра, облучаемой различными импульсами

Расчеты показывают деструктивное влияние коллинеарного поля второй гармоники на условия возврата электронов. Поскольку данные обстоятельства не противоречат полуклассической картине, можно также ожидать справедливость предложенной модели многоэлектронной резонансной рекомбинации для двухчастотных полей.

Было проведено теоретическое исследование резонансной генерации высших гармоник в двухчастотных полях для плазмы индия. Анализ результатов генерации высших гармоник проводился с помощью кусочной аппроксимации методом наименьших квадратов, что требовало заблаговременного примерного определения энергии гармоник плато для большей точности разложения. При этом обнаружено небольшое (в пределах 1–3 порядков гармоник) отклонение в энергиях гармоники среза по сравнению с экспериментом. Результаты генерации высших гармоник в плазме атомов и ионов индия при различных особенностях поля накачки приведены на рис. 6 в единицах гармоник излучения накачки 0.057 атомных единицы.

Из рис. 6 видно, что в полном соответствии с моделью многоэлектронной резонансной рекомбинации резонансная генерация высших гармоник для нейтральных одноэлектронных атомов индия не наблюдается. Однако имеем усиление 13-й гармоники в плазме индия при накачке одночастотным полем с частотой 0.057 атомных единицы.



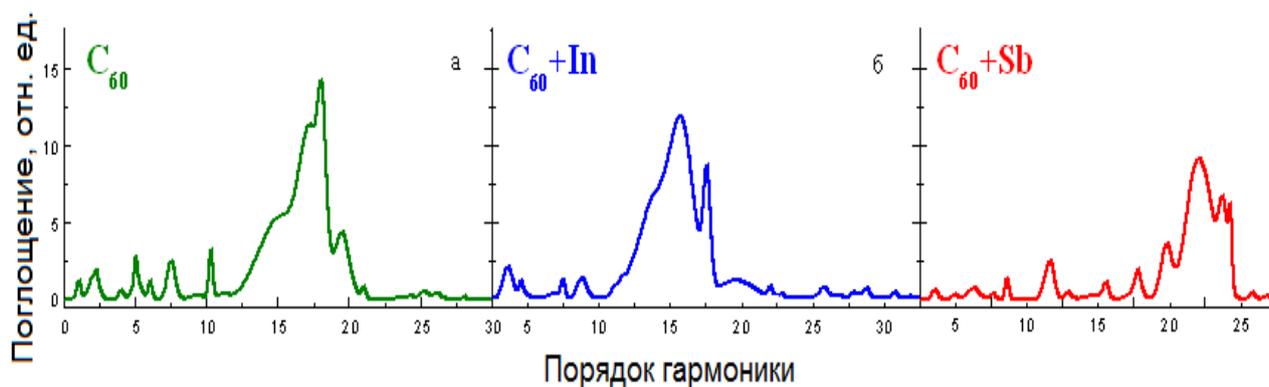
а-In⁺⁰ одночастотное поле, один электрон, б-In⁺¹, одночастотное поле, в-In⁺¹, одночастотное поле второй гармоники, г-In⁺¹, двухчастотное поле

Рис. 6. Спектр генерации высших гармоник в плазме индия в различных условиях облучения

Действительно, попадающие в отстройку от резонанса 5-я и 7-я гармоники накачки излучения второй гармоники (то есть 10-я и 14-я гармоники основной накачки) не являются резонансно усиленными. Особую важность приобретают результаты моделирования генерации высших гармоник в поле ортогонально поляризованной двухчастотной накачки с использованием основного излучения и его второй гармоники. Отчетливо видно, что в данном случае усиливается не только 13-я, но и 12-я гармоника основного излучения. Несмотря на то, что усиление каждой гармоники несколько ниже, чем для одночастотного поля, следует отметить, превышение их суммарной интенсивностью интенсивности 13-й гармоники в одночастотном поле.

Для сравнения была также исследована резонансная генерация высших гармоник в плазмах фуллера C₆₀ с имплантированными атомами индия и сурьмы. Интерес к фуллеренам с атомами или даже молекулами внутри (так называемым эндоэдральным фуллеренам) как к мишеням для резонансной генерации высших гармоник возникает по причине, что их использование перспективно для совмещения усиления нескольких гармоник в плазме фуллеренов с исключительно высокой эффективностью преобразования в полупроводниковых мишенях, подвергшихся лазерной абляции.

В качестве псевдопотенциала был принят точный обменный потенциал для соответствующих атомов, что позволило получать более точные спектры гармоник, поскольку в этом случае вычисления не теряют точности от неадиабатичности эффекта генерации высших гармоник в той степени, в которой неэффективны псевдопотенциалы, выбранные на основе приближений локальной плотности. Результаты исследования спектров поглощения для данных фуллеренов приведены на рис. 7.



а–C₆₀ б–C₆₀+In в–C₆₀+Sb.

Рис. 7. Спектры поглощения, вычисленные временно-зависимым методом для различных систем

В плазме эндоэдральных фуллеренов (C₆₀+In и C₆₀+Sb) максимум плазмонного поглощения плазмы C₆₀ сместился с 15-й гармоники к 13 и 21 гармоникам соответственно в плазме C₆₀+In и C₆₀+Sb, что близко к

соответствующим наблюдаемым максимумам поглощения ионов индия и сурьмы. Следовательно, в вычислительном эксперименте оболочка C_{60} не оказывает подавляющего влияния на спектр центрального атома. При этом делокализованные электроны оболочки C_{60} имеют свойство подстраиваться под более сильные колебания электронной плотности центрального атома с возможной ионизацией центрального атома.

На рис.8 приведены результаты исследования резонансной генерации высших гармоник в соответствующих системах. Усиленные группы соседних гармоник смещались во всех случаях к максимумам плазмонного поглощения, что дает возможность считать данное усиление генерации высших гармоник резонансным. Практическая значимость данного явления заключается в возможности его использования для более эффективной генерации аттосекундных импульсов. Несмотря на то что модель многоэлектронной резонансной рекомбинации хорошо описывает процесс оптической накачки высоковозбужденного уровня, а расчеты имеют хорошее соответствие с экспериментом, необходимо пояснить характер резонансной рекомбинации при наличии некоторой заселенности резонансного уровня. Действительно, указанный ранее механизм расселения возбужденного уровня

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s\Gamma_{ph} \quad (9)$$

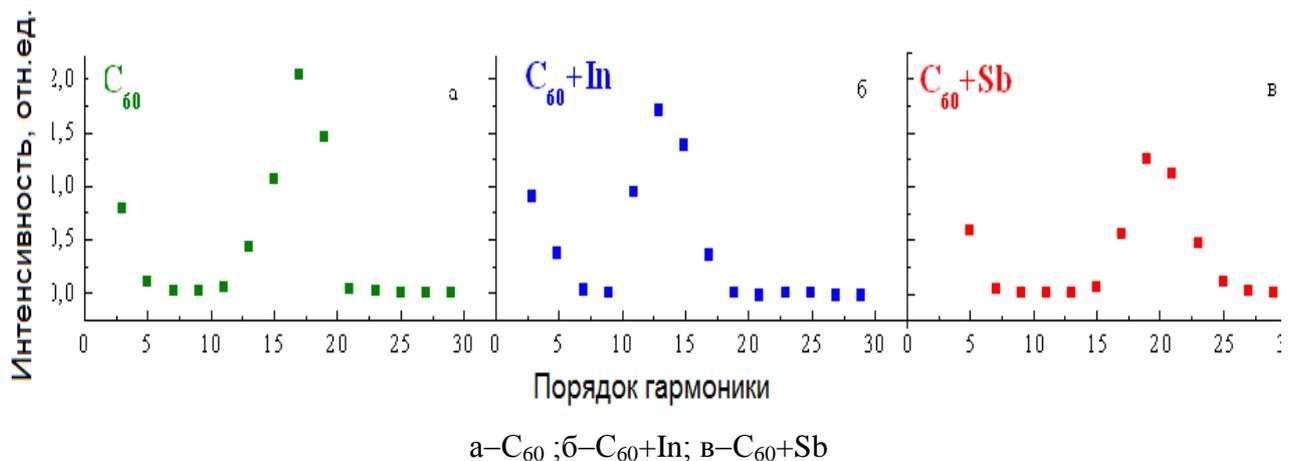


Рис. 8. Резонансная генерация высших гармоник в исследуемых системах

включает в себя только неэластичное возбуждение и спонтанное излучение. Однако спонтанное излучение наблюдается вне зависимости от близости поля к многофотонным резонансам в среде, поэтому когерентный вклад в излучение на резонансной частоте должен описываться вынужденным излучением:

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s(\Gamma_{ph} + B_{12}u) . \quad (10)$$

Данный механизм, определяющий резонансную рекомбинацию, влияет на точность аналитических оценок, сделанных в приближении единственного активного электрона, которая тем выше, чем сильнее нерезонансный сигнал гармоники вблизи частоты исследуемого резонанса. Подобный процесс усиления сигнала гармоники за счет вынужденного излучения может происходить даже в системах, в которых нет инверсии населенности между основным и возбужденным состоянием, либо в рамках четырехуровневого процесса, где инверсия достигается с некоторым промежуточным уровнем, либо в границах применимости запрета вынужденного поглощения в условии деструктивной интерференции различных каналов поглощения. Оба данных механизма легко реализуются в схеме резонансной генерации высших гармоник, поскольку процесс возбуждения на резонансный уровень не когерентен и происходит в присутствии поля высшей гармоники, которая с учетом используемых в экспериментах интенсивностей может считаться достаточно сильной. Важной практической стороной некогерентного характера накачки в процессе многоэлектронной резонансной рекомбинации является возможность существенно усилить эффективность резонансной ГВГ с помощью направления в лазерную плазму потока электронов с энергиями, близкими к энергии резонансного перехода.

В четвертой главе **«Влияние концентрации частиц на генерацию высших гармоник»** приведены результаты изучения влияния концентрации частиц на генерацию высших гармоник, в том числе на резонансную генерацию высших гармоник.

Задача теоретического определения концентрации нейтральных частиц решена методом молекулярной динамики с помощью программы, созданной на основе пакета ITAR IMD. К несомненным достоинствам метода молекулярной динамики относится его точность, возможность исследования формирования наноструктур, учет реальной структуры мишени и наличие большого количества эмпирических псевдопотенциалов, описывающих межатомное взаимодействие.

Определение концентрации ионов было выполнено на основе произведения вероятности ионизации в поле импульса лазерной абляции на концентрацию нейтральных атомов, легко реализуется на основе аналитических методов или с использованием временного метода функционала плотности.

В первую очередь было проведено исследование влияния лазерной абляции на усиление генерации высших гармоник в плазме углерода. Исследования проводились в одинаковых условиях, и плазма создавалась на поверхности цели импульсами абляции различной длительности. Для случая 10-нс импульсов абляции было показано, что для гармоник с 9-й по 15-ю эффективность преобразования в углеродной плазме была от 2 до 5 раз выше, чем в аргоне. Высшие же порядки (более 15-го) генерировались в аргоне более эффективно, чем в углеродной плазме. Для импульсов абляции длительностью 8 пикосекунд, эффективность генерации высших гармоник для 9-15 гармоник в аргоне была в 2-5 раз выше, чем в углеродной плазме.

Наиболее высокий порядок наблюдавшихся в экспериментах генерируемых гармоник в углеродной плазме был равен 27.

Для объяснения этого эффекта было проведено исследование лазерной абляции в случае графитовой цели. Снимки, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, не показали присутствия наночастиц на напыленных подложках после абляции 8-пикосекундными импульсами даже для максимальной эффективности преобразования. Наоборот, для сравнительно умеренной интенсивности испарения 10-нс импульсами (1×10^9 Вт см⁻²) было обнаружено множество наночастиц, размеры которых варьировались от 20 до 100 нм.

Плотность аргона 6×10^{17} см⁻³. Соответствующие плотности углеродной плазмы при экспериментальных условиях лазерной абляции (2×10^{10} Вт см⁻² для 8-пс импульсов и 10^9 Вт см⁻² для 10-нс импульсов), найденные с помощью IMD ИТАР, были равны $2,6 \times 10^{17}$ см⁻³ и $2,5 \times 10^{18}$ см⁻³. Логично полагать, что чем выше концентрация атомов, тем выше степень их кластеризации, так как наибольший вклад в распределение частиц в зоне взаимодействия дает их средняя скорость при вылете, определяющая их положение примерно через 30 нс после начала абляции, равно как и степень кластеризации при вылете с поверхности мишени. Таким образом, молекулярно-динамическое моделирование показывает, что, с учетом особо высокой концентрации атомов углерода в зоне взаимодействия, образуются крупные кластеры в случае 10-наносекундных импульсов. Интенсивность q -й гармоники может быть представлена как

$$I_q \propto |d_q|^2 N^2 L^2, \quad (11)$$

где d_q – дипольный момент излучателя на частоте $q\omega$, $|d_q|^2$ – нелинейно-оптический отклик отдельной частицы, N – плотность излучателей, L – длина среды.

Было установлено, что в случае сравнительно низших порядков гармоник $|d_q^{plasma}|^2 / |d_q^{Ar}|^2 \approx 2-5$ в случае абляции 10-наносекундными импульсами.

Расчеты для абляции 8-пикосекундными импульсами ($N = 2.6 \times 10^{17}$ см⁻³, $L = 0.5$ мм, $I_q^{plasma} / I_q^{Ar} \approx 0.2-0.5$), показывают, что параметр $|d_q^{plasma}|^2 / |d_q^{Ar}|^2$ выше более чем на порядок по магнитуде по сравнению с плазмой, сформированной 10-наносекундными импульсами. Можно сделать заключение, что более сильные низшие гармоники, генерируемые в плазме по отношению с аргоном, могут быть обусловлены присутствием малых наночастиц, которые могут увеличить эффективность этих гармоник.

Последующий анализ генерации высших гармоник от различных ультракоротких лазерных импульсов в плазме, созданной на поверхности графитовой цели при различных условиях ее формирования также подтвердил гипотезу о наличии большого количества наночастиц в плазме

углерода. Для 10-наносекундных импульсов при интенсивностях $0,33 \times 10^9$, 10^9 и 3×10^9 Вт см⁻² были получены концентрации атомов углерода 10^{18} , $2,5 \times 10^{18}$ и $3,7 \times 10^{18}$ см⁻³. Для интенсивных пикосекундных импульсов ($6,6 \times 10^9$, 2×10^{10} и 6×10^{10} Вт см⁻³) были получены более низкие концентрации атомов ($1,1 \times 10^{17}$, $2,6 \times 10^{17}$ и 4×10^{17} см⁻³), что указывает на решающий вклад плотности энергии импульса (по сравнению с интенсивностью импульса) на формирование оптимальной плазмы.

Большинство исследований генерации высших гармоник в плазмах, полученных методом лазерной абляции, проводились с использованием коротких областей плазмы (менее 0.5 мм). Это связано с тем, что при последующем увеличении длины среды L больше длины когерентности для данной гармоники эффективность преобразования накачки в гармонику уменьшается в соответствии с соотношением

$$I \propto \left(\frac{\sin \Delta K \frac{L}{2}}{\Delta K} \right)^2, \quad (12)$$

где длина когерентности определяется следующим образом

$$L_k = \frac{\pi}{\Delta K}. \quad (13)$$

Рассмотрим влияние концентрации частиц на эффективность генерации высших гармоник в условиях квазисогласования фаз.

Исследовались концентрации как нейтральных атомов, так и ионов при испарении целей Ag и Mn на расстоянии 100 мкм от поверхностей с учетом задержки между испарением и накачкой в 43 нс. С помощью ИТАР IMD для потока излучения в 1.2 Дж/см² были получены концентрации соответственно Ag- $2,7 \times 10^{17}$ см⁻³, Mn- $1,8 \times 10^{17}$ см⁻³. Данные концентрации практически не зависели от длительности испаряющего импульса при той же его энергии.

Эффективность усиления при распространении в непрерывной среде вдали от условий квазисогласования фаз определяется соотношениями

$$n_p(L, L_a, L_k) \propto \frac{L_a^2}{1 + 4\pi^2 \left(\frac{L_a}{L_k} \right)^2} \left[1 + e^{-L/L_a} - 2 \cos \left(\pi \frac{L}{L_k} \right) e^{-(L/2L_a)} \right], \quad (14)$$

$$E_q(q, L, L_{a_q}, L_{k_q}) \propto \frac{n_p(qL, L_{a_q}, L_{k_q})}{n_p(L, L_{a_q}, L_{k_q})}. \quad (15)$$

где L —длина среды, q —порядок гармоники, L_a —длина поглощения $E_q(q, L, L_{a_q}, L_{k_q})$ —относительное усиление гармоники. Длину когерентности для q -й гармоники при длине волны накачки $\lambda \approx 800$ нм можно удобно записать как

$$L_c(\text{мм}) \approx 1.4 \times 10^{18} / qN_e(\text{см}^{-3}). \quad (16)$$

Тогда при потоке более 1.5 Дж/см^2 длина когерентности для гармоник около 31-й становится менее 0.7 мм при степени ионизации около 10% и приведенных выше концентрациях. Это примерно в 10 раз меньше, чем длина когерентности в инертных газах.

С учетом того что для 5-миллиметровой плазмы эффективность была практически такой же, как и для короткой плазмы, и составляла 4×10^{-6} в области плато, эффективность преобразования в случае сред с модулированной плотностью более чем в 10 раз превышает типичные эффективности преобразования в коротких плазмах.

На рис. 9 приведены соответственно для Ag и Mn сравнительные эффективности преобразования для 5-миллиметровой непрерывной плазмы и 8 0.4-миллиметровых плазменных струй. Видно, что тип вещества влияет на положение усиленных групп гармоник в связи с разностью концентраций свободных электронов при испарении мишеней. Метод усиления группы высших гармоник в плазме с пространственно модулированной оптической плотностью может быть использован для точного определения концентрации электронов в плазменных факелах, полученных методом лазерной абляции. Вычисленные на основании определения длины когерентности концентрации свободных электронов составили 6.2×10^{16} и $8.1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно в случае серебра и марганца. Кроме того, при исследовании радиальной зависимости эффективности генерации высших гармоник с удалением от оптической оси импульса накачки обнаружено резкое снижение эффективности генерации высших гармоник. В сочетании со знанием точной концентрации свободных электронов, определенной теоретически, это можно использовать для точного количественного предсказания результатов экспериментов по усилению на основе квазисогласования фаз в плазмах с пространственно модулированной оптической плотностью.

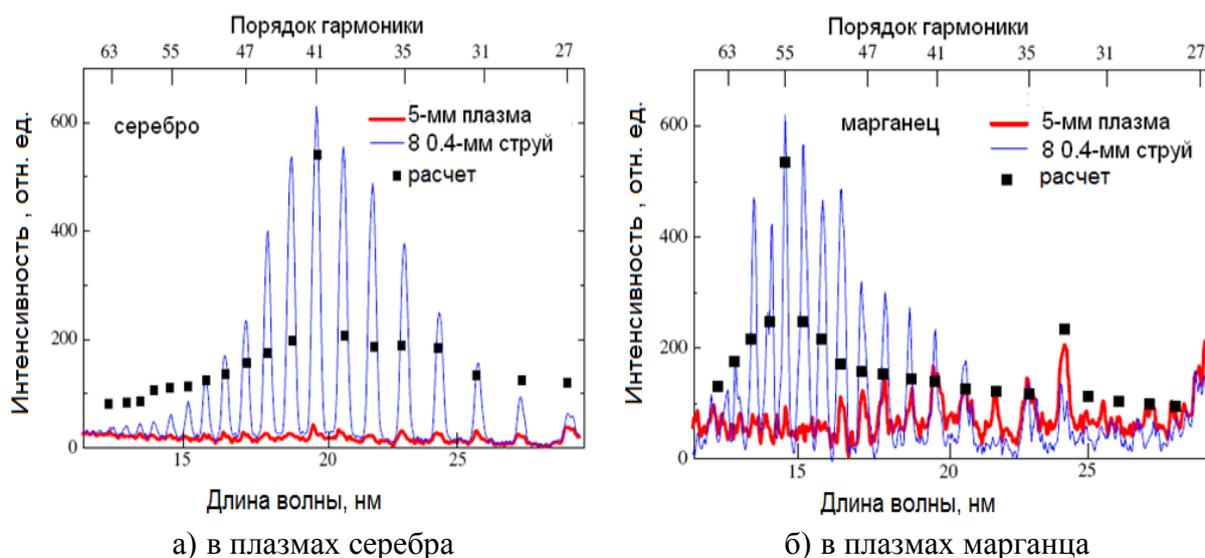


Рис. 9. Усиление генерации высших гармоник в различных плазмах с пространственно модулированной плотностью

На рис. 9 в случае плазмы марганца видно резонансное усиление 23-й гармоники. Экспериментальные результаты подтверждают возможность наблюдения резонансной генерации высших гармоник совместно с квазисогласованием фаз. Для теоретических расчетов нелинейного отклика отдельного атома марганца использовался метод временного функционала плотности, причем моделировался вклад всех оптических электронов, после чего временно-зависимый диполь подставлялся в алгоритм расчета распространения излучения гармоник в плазме, что обосновано в случае независимости вкладов данных режимов усиления.

В настоящее время не имеется экспериментальных данных, подтверждающих или опровергающих возможность одновременного квазисогласования фаз и резонансной генерации высших гармоник. Это связано с тем, что для многих практически важных нелинейных систем, в частности плазмы индия, подсчет концентрации атомов и ионов, полученных методом лазерной абляции, затруднен из-за отсутствия надежных потенциалов взаимодействия атомов. Однако обнаруженная в исследовании прямая пропорциональность концентрации атомов общей энергии импульса абляции позволяет перестроить область квазисогласования фаз к резонансу путем контроля интенсивности импульса абляции при той же его энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые обеспечена надежная информация о спектрах резонансной генерации высших гармоник на основе точных потенциалов и близких к экспериментальным параметрам импульсов накачки.
2. Показано, что резонансная генерация высших гармоник обусловлена заселением резонансного уровня путем возбуждения внутренних электронов иона на резонансный уровень в результате неупругого рассеяния ускоренного электрона, а также последующей рекомбинацией электронов с возбужденного уровня в основное состояние с генерацией резонансной гармоники в результате вынужденного излучения, происходящего из-за влияния нерезонансной гармоники того же порядка.
3. Впервые проведено теоретическое моделирование генерации высших гармоник в плазме фуллеренов C_{60} методом временно-зависимой теории функционала плотности для случая полного моделирования вклада всех атомов углерода в молекулярное поле, при этом получено усиление гармоник в области поверхностного плазмонного резонанса фуллеренов C_{60} в 10 раз выше, чем вне данной области.
4. Показано, что в лазерной плазме эндоэдральных фуллеренов In C_{60} и Sb C_{60} происходит смещение максимума резонансного усиления группы высших гармоник относительно чистого C_{60} в связи с смещением максимумов плазмонного поглощения фуллереновой оболочки к атомарным резонансам включенных атомов.
5. Показано, что основным фактором, ограничивающим возможности повышения эффективности генерации высших гармоник за счет

увеличения концентрации лазерной плазмы является нарушение условий согласования фаз с увеличением концентрации свободных электронов.

6. Показано, что оптимальная в отношении эффективности преобразования (2×10^{-4}) плазма индия может быть получена при использовании импульсов абляции длительностью 10 пикосекунд и интенсивностью 2×10^9 Вт см⁻², тогда как оптимальная плазма хрома создается при использовании импульсов абляции длительностью 100 фемтосекунд и интенсивностью 10^{11} Вт см⁻², что связано с различными степенями ионизации резонансных уровней данных элементов.
7. Показано, что при коротких (порядка 100 фс) и интенсивных (более 10^{11} Вт см⁻²) импульсах абляции образуются наночастицы размером более 10 нм, которые усиливают генерацию высших гармоник в слабых полях за счет эффекта локального поля, а в сильных полях лишь снижают эффективную концентрацию излучающих диполей и свободных электронов.
8. Впервые разработана методика управления эффективностью резонансной генерации высших гармоник на основе контроля длительности и интенсивности возбуждающего импульса в плазмах с пространственно модулированной оптической плотностью.

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

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

REDKIN PAVEL VITALEVICH

**INFLUENCE OF MULTIELECTRON EFFECTS AND CONCENTRATION
OF PARTICLES ON RESONANT HIGH-HARMONIC GENERATION OF
COHERENT RADIATION**

01.04.11 – Laser physics (physical and mathematical sciences)

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2016

The subject of the doctoral dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number 30.09.2014/B2014.3-4.FM117

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

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) has been posted on the website at www.fti-kengash.uz and on Information-educational portal "Ziyonet" at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant: **Ganeev Rashid Ashirovich,**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Official opponents: **Usmanov Timur Bekmuradovich,**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Yusupov Javdat Bakidjanovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Azamatov Zakir Tahirovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization: **National University of Uzbekistan**

The defense will take place on «__» _____ 2016 at ____ o'clock at the meeting of the Scientific Council 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University (address: 2B Bodomzor street, Tashkent, 100084, Uzbekistan, phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

The doctoral dissertation can be looked through the Information Resource Centre of the Physical-Technical Institute (registration No ____) (address: 2B Bodomzor street, Tashkent, 100084, Uzbekistan. Phone: (+99871) 235-30-41).

The abstract of the dissertation is distributed on «__» _____ 2016.

(mailing report No _____ dated on _____ 2016).

S.L. Lutpullayev

Chairman of the Scientific Council on Award of Scientific
Degree of Doctor of Sciences D.Ph-M.S., Professor

A.V. Karimov

Scientific secretary of the Scientific Council on Award of Scientific
Degree of Doctor of Sciences D.Ph-M.S., Professor

S.A. Bahromov

Chairman of the Scientific Seminar under Scientific
Council on Award of Scientific Degree of
Doctor of Sciences D.Ph-M.S., Professor

INTRODUCTION (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and relevance of the subject of dissertation. Nowadays in the fast developing field of laser technologies and nonlinear optics the research directed to the study of influence of multielectron effects and concentration of particles on resonant high-harmonic generation for the production of coherent radiation in vacuum ultraviolet and soft X-ray range is considered one of the most promising directions of laser physics. At the same time the main attention is paid to increase the efficiency of generated harmonics in conditions of resonance and quasi-synchronization of phases of interacting waves. These studies are connected with the application of coherent radiation in the field of laser physics, nonlinear optics, femtosecond holography, generation of attosecond pulses, spectroscopy of ultrafast processes.

Fulfillment of conditions of resonant high-harmonic generation and quasi-matching of phases of pump radiation with radiation of harmonics provides substantial increase of efficiency of conversion of energy of femtosecond pulses with intensity 10^{14} - 10^{15} W/cm² used as pump radiation into radiation of harmonics. In connection with this the possibilities of utilization of artificial nanomaterials which have complicated structure as well as ones like endohedral fullerenes in practice of high-harmonic generation remain weakly studied.

The demand for the subject of the dissertation is shown by the development of the methodology of high-harmonic generation in plasma formations, the enhancement of the efficiency of nonlinear frequency conversion at resonant high-harmonic generation, the study of nanoparticles which are produced during the process of laser ablation. Moreover, the creation of highly efficient nonlinear elements on the basis of the laser ablation method, while being of special importance for the solution of important problems of nonlinear optics, give the possibility to obtain the theoretical results on the analysis of concentration of laser plasma.

The influence of concentration of free electrons on the efficiency of high-harmonic generation, as well as the influence of concentration of particles on high-harmonic generation still remain almost completely unstudied. The solution of these problems will help to establish basic laws and peculiarities of resonant high-harmonic generation in real systems which are of practical interest in creating highly efficient sources of coherent radiation in vacuum ultraviolet spectral range.

This thesis is devoted to solving in a certain degree 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 as well as in other normative legal documents accepted in this field.

Conformity of the research to the priority directions of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology of the Republic of Uzbekistan in the framework of F II “Physics, astronomy, power engineering and engineering industry”.

Review of international scientific researches on the theme of the dissertation. The researches of multielectron effects in resonant high-harmonic generation connected with the increase of efficiency of resonant high-harmonic generation are carried out in the scientific centres of the University of Pier and Marie Curie (Paris, France), Max Planck Institute for Physics of Complex Systems (Dresden, Germany), Max Born Institute (Berlin, Germany), the National Institute for Scientific Research (Montreal, Canada), Beijing Institute of Physics (Beijing, China), Moscow State University (Moscow, Russia), Sarajevo University (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina), the Institute for General Physics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), Voronezh State University (Voronezh, Russia) and a series of other foreign scientific centres of the world.

On the World level a series of scientific results in study of mechanisms of interaction of laser field and nonlinear conversion of frequency of powerful ultrashort laser pulses: theoretical results in analytical semiclassical single active electron approximation (University of Pierre and Marie Curie, France; Institute of Max Born, Germany); possibilities of enhancement of high harmonics in gaseous media using atomic and ionic resonances are proven *подтверждены возможности усиления высших гармоник в газовых средах с использованием атомных и ионных резонансов* (University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; Institute for General Physics of Russian Academy of Sciences, Russia).

Nowadays in the field of laser physics and nonlinear optics in resonant high harmonic generation in plasma media in a series of priority directions research is carried out, including: development of theoretical and practical ways of determination of concentration of free electrons and ions, atoms in laser plasma; scientific and practical results are obtained in determination of the main physical mechanisms influencing resonant high-harmonic generation are obtained.

Degree of study of the problem. Now non-resonant high-harmonic generation has been studied almost completely both experimentally and theoretically. Resonant high-harmonic generation has been investigated experimentally and in detail, but from the theoretical point of view, up to this investigation there was no model was created which agreed completely with the experiment. R. Taieb, V.Veniard, E.S. Toma, C. Figueira de Morisson Faria, D.B. Milosevic and other scientists from European Union suggested a series of mechanisms of resonant high-harmonic generation which describe certain experimental regularities of this process, however, lead to conclusions not confirmed experimentally, particularly, to the enhancement of the harmonics neighbouring to the resonant one out of the resonance area. Multi-electron methods: multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock and time-dependent density functional method have been successfully used before by J. Zanghellini, D. Bauer and other scientists from the European Union to model high-harmonic generation in the presence of collective interaction. However, they have not been used before to model resonant high-harmonic generation.

Russian scientists V. Strelkov, M. Ivanov and S. Stremoukhov got good agreement with experiments using single-electron methods, but the required potential barriers are introduced into the considered systems from outside, and the

analytical model is not connected directly with the results of computation and can give true results only in other models of resonant high-harmonic generation.

The scientists of Uzbekistan, in particular, Ganeev R.A., Kulagin I.A. and Usmanov T.B. did investigations of high-harmonic generation in strongly ionized plasma as well as in multijet laser plasma. For strongly ionized systems they got radiation of harmonics up to $\lambda=2-4$ nm, but the efficiency of conversion into harmonics with such wavelengths is extremely small ($10^{-8} - 10^{-7}$). Moreover, in resonant high-harmonic generation and high-harmonic generation in multijet laser plasma, conversion efficiencies of 10^{-4} and 10^{-5} correspondingly were obtained. But the problems of influence of spectral properties of pump radiation and electronic structure of atoms as well as ions, which compose laser plasma, on resonant high-harmonic generation and quasi-synchronization of phases are not considered.

Connection of the topic of the dissertation with the plans of scientific research works of the higher educational institution, where the dissertation was carried out. The dissertational research was carried out in the framework of the following projects of Samarkand State University: OT-F2-021 “Physics of dimensional phenomena in semiconducting and metal nanomaterials” (2007-2011); F2-09 “Investigation of mechanisms of resonant enhancement of high-harmonic generation of laser radiation” (2012-2016).

The purpose of the research is determination of the influence of multielectron effects and concentration of particles on resonant high-harmonic generation.

Tasks of the research:

to investigate the influence of pump pulses, which can enter the resonance with the system at certain stages, on resonant high-harmonic generation;

to determine the influence of multielectron effects and concentration of particles on resonant high-harmonic generation;

to determine the mechanism of resonant high-harmonic generation which explains the results of the experiments on resonant high-harmonic generation and to investigate the possibilities of optimization of resonant high-harmonic generation with its help;

to investigate theoretically the promising targets for resonant high-harmonic generation, particularly, laser plasmas of metals and semiconductors with different degrees of ionization, endohedral fullerenes;

to develop the methods for experimental and theoretical determination of concentration of atoms, ions and free electrons in laser plasmas, as well as to develop methods of control of particle concentration in laser plasma using control of parameters of ablating pulse;

to perform search and tuning of optimal program and theoretical tools for modelling the resonant high-harmonic generation, as well as for stating justified approximations and simplifications for multi-electron systems taking into consideration the quantum confinement;

to generalize the results of checking the hypotheses, determine the mechanisms of resonant high-harmonic generation and to investigate the possibilities of optimization of resonant high-harmonic generation.

As **the object of the research**, the plasmas obtained by laser ablation method and high harmonics of laser radiation are taken.

The subject of the research is multi-electron effects in resonant high-harmonic generation of coherent radiation.

The methods of the research: Multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock, time-dependent method of density functional, molecular dynamical method.

The scientific novelty of the research consists of the following results:

it is shown that multi-electron effects lead to resonant high-harmonic generation as a result of nonelastic scattering of accelerated electron on the ion with excitation of ion's electrons to resonant level;

a mechanism of resonant high-harmonic generation was suggested, which explains the results of experiments on resonant high-harmonic generation and allows to optimize the process of resonant high-harmonic generation on the base of computation of optimal pump and ablation pulses;

usage of nonionized plasma as promising medium was suggested for the observation of resonant high-harmonic generation based on transitions in singly ionized media;

on the base of theoretical calculations of plasmon absorption peaks of C_{60} -molecule's casing in endohedral fullerenes $C_{60}+In$ and $C_{60}+Sb$ to corresponding ionic resonances of encapsulated semiconductors as well as shift of the maximum of resonant enhancement of a group of harmonics to the new plasmon absorption peaks possibility of uniform enhancement of a group of harmonics in laser plasma created by evaporation of mixture of endohedral fullerenes has been demonstrated;

a method was developed for the theoretical determination of the concentration of atoms, ions and free electrons in plasma which is based on consideration of enhancement of a group of high harmonics during quasi-phase matching at the process of laser ablation using long heating pulses;

mechanisms of restriction of efficiency of frequency conversion with growth of concentration of particles in laser plasma of carbon created using ablation pulses with duration of 8 picoseconds and 10 nanoseconds were revealed;

a technique of determination of dependence laws of degree of ionization at given concentrations was suggested which leads to enhancement of single high harmonic in the plateau region up to more than 1000 times at the combination of quasi-phase matching and resonant conditions.

Practical results of the research:

a technique for the determination of parameters of laser ablation pulses to achieve the maximal efficiency of resonant high-harmonic generation was developed;

a technique for theoretical determination of concentration of atoms, ions and free electrons in laser plasma was developed on the basis of computer simulation

and experiments on high-harmonic generation in plasmas with spatially modulated optical density;

a scheme was developed for using the mixture of endohedral fullerenes with embedded semiconductors to control the position of a group of resonantly enhanced harmonics.

Reliability of the obtained results consists in the following:

The results of computer simulation are confirmed by the applicability of used programs for the solution of similar problems of quantum mechanics, consistency with the results of experimental determination of spectra of high harmonics performed by other authors as well as consistency with basic theoretical assumptions which are true for non-resonant case.

Scientific and practical values of the results of the research.

The theoretical value of the results of the research is that the suggested approaches for calculating the resonant high-harmonic generation allow to ensure high correspondence with the experiment as well as to simplify the search of promising materials and pulses for resonant high-harmonic generation.

The practical value of the results of the dissertational research is that the model of multielectron resonant recombination can be used for optimizing the experiments on resonant high-harmonic generation and quasi-phase matching in plasmas with spatially modulated optical density allowing to increase substantially the intensity of generated pulses of laser radiation for their application in practically important areas of science and technology.

Application of the results of the research. The developed in the dissertation methodology of determination of the characteristics of plasma created by laser ablation as well as the method of enhancing the resonant high-harmonic generation were used in the grant 14G0206 “Grant -in - Aid for Creative Scientific Research of the Japan Society for the Promotion of Science” for explaining the enhancement of resonant harmonics in laser plasma of indium (Letter from the Center for Ophthalmology and Advanced Lasers of the Saitama Medical University of 26.02.2016, Japan). Application of the obtained results allowed to increase the intensity of resonant harmonics more than 10 times at the same expenses of energy and rare materials.

Approbation of the research results. The results of the dissertation were approbated on the following conferences and symposiums: the 5th International conference “Actual Problems of Physical Electronics UzPEC-5” (Tashkent, 2009); Republic Conference “Actual Problems of Modern Physics” (Samarkand, 2010); the 2nd International Conference “Optics and Photonics-2013” (Samarkand, 2013); International Conference for Fundamental Atomic Spectroscopy “FAS-XX” (Russia, Voronezh, 2013); International Conference “Modern Science: Theoretical and Practical View” (Russia, Chelyabinsk, 2015), and at the seminar of Special Construction and Technology Bureau at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (09.03.2016) as well as at the one-time Scientific seminar of the Scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences 16.07.2013.FM/T.12.01 at

Physical-Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University(04.05.2016).

Publication of the research results. On the topic of the dissertation 22 scientific works are published in total, out of them 15 articles are published in influential international journals, as well as 5 theses are published in the proceedings of international and republican conferences.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, the conclusion and a list of used references, contains 198 pages of main text and 40 figures.

THE MAIN CONTENT OF THE DISSERTATION

In the introduction the topicality and relevance of the theme of dissertation are proved, the purpose and tasks, objects and subject of the research are formulated, the conformity of the research to priority directions of development of science and technologies in the Republic of Uzbekistan is stated, the scientific novelty and practical results of the research are stated, the reliability of the obtained results is proved and the scientific and practical importance of the obtained results are revealed.

In the first chapter **“Theoretical and experimental data on resonant high-harmonic generation”**, a review of references is presented on the current state of the problem of influence of multielectron effects and concentration of particles on resonant high-harmonic generation as well as on theoretical investigation of resonant high-harmonic generation and their connection with the model of resonant high-harmonic generation suggested in the dissertation.

In the second chapter **“Influence of multi-electron effects on resonant high-harmonic generation”**, the influence of different peculiarities of electron-electron interaction on resonant high-harmonic generation is investigated on the basis of multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock.

It is shown that, at relatively low computational difficulty compared with the direct solution of time-dependent Schrodinger equation, multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock allows to get exact results for strongly correlated systems. In the multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock scheme the assumption about the wavefunction has the form:

$$\Psi(Q_1, \dots, Q_f, t) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_f=1}^{n_f} A_{j_1 \dots j_f}(t) \prod_{\kappa=1}^f \phi_{j\kappa}^{(\kappa)}(Q_\kappa, t) \quad (1)$$

where Q_1, \dots, Q_f - particle coordinates, $A_{j_1 \dots j_f}$ - expansion coefficients in multiconfigurational time-dependent method of Hartree, $\phi_{j\kappa}^{(\kappa)} - n_\kappa$ time-dependent expansion functions for each degree of freedom κ .

The multiconfigurational time-dependent method of Hartree-Fock also introduces the exact exchange symmetry of time-dependent Hamiltonian and the restriction on the subspace of fully antisymmetric solutions as well as two-particle nature of electron-electron interaction. The interaction of electrons in this approach is pairwise. This leads to the fact that the starting wavefunctions of all particles are identical and the starting A-vector $A_{j_1 \dots j_f}$ must be fully antisymmetrized in relation with its indices.

For simulating the resonant high-harmonic generation it is reasonable to use the representation of discrete variables and fast Fourier transformations. On the basis of the comparative research of various representations the discrete variable representation of sinusoidal type was chosen, which splits the grid in equal parts and simplifies the creation of electron-electron interaction as well as allows to compare the results with the data obtained using other programs for the solution of

time-dependent Schrodinger equation. Taking into account the fact that the relative error is low (~ 40 millielectron-volt) for chosen functions of expansion, this approximation can be considered optimal from the point of view of precision and speed.

Complex absorbing potentials were used to create absorbing boundaries which are necessary for removing the reflections of wavefunction from the boundary of the grid as well as for shortening the grid length, and had the form:

$$-iW(x) = -i\eta|x - x_c|^b \Theta(\pm(x - x_c)) \quad (2)$$

where x_c , η and b denote the starting point, strength and order of complex absorbing potential. Θ denotes Heavyside step function, the “+” sign defines the position of the complex absorbing potential to the right from x_c , the “-“ sign denotes the position to the left correspondingly. The simulation has shown that the very presence of absorbing boundaries changes the time-dependent dipole, but the order of complex absorbing potential has no decisive influence on the qualitative character of the time-dependent dipole, so complex absorbing potentials were used with strength 0.2 atomic units placed at the distance of 20 atomic units from the edges of any used grid.

Investigations of the influence of multielectron effects on resonant high-harmonic generation are performed for the three-dimensional fullerenelike system, in which only two electrons were considered active, and the potential of the electron basis of the system had the form:

$$V(r) = \begin{cases} -3 \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{R_0^2 - R_i^2}{2} \right), r \leq R_i \\ - \left(\frac{250}{R_0^3 - R_i^3} \right) \left(\frac{3R_0^2}{2} - \left[\frac{r^2}{2} + \frac{R_i^3}{r} \right] \right) - v_0, R_i < r < R_0, r_n = x_n^2 + y_n^2 + z_n^2. \\ -250/r, r \geq R_0 \end{cases} \quad (3)$$

At the same time the smoothed potential of two-electron interaction can be represented in the form:

$$V_{ee} = 1 / \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 + 2}. \quad (4)$$

The absorption spectrum of the given system, which was obtained by computing the free evolution of the system in time after the application of delta-pulse, is presented in Fig. 1. The maximum of absorption of the system corresponds to the 13th harmonic of the radiation with the energy of 0.057 atomic units. The magnetic component of the laser pulse is not included during the simulation because the considered intensities (10^{13} - 10^{16} W/cm²), which correspond to lasers used in real experiments, do not lead to relativistic movement of active electron.

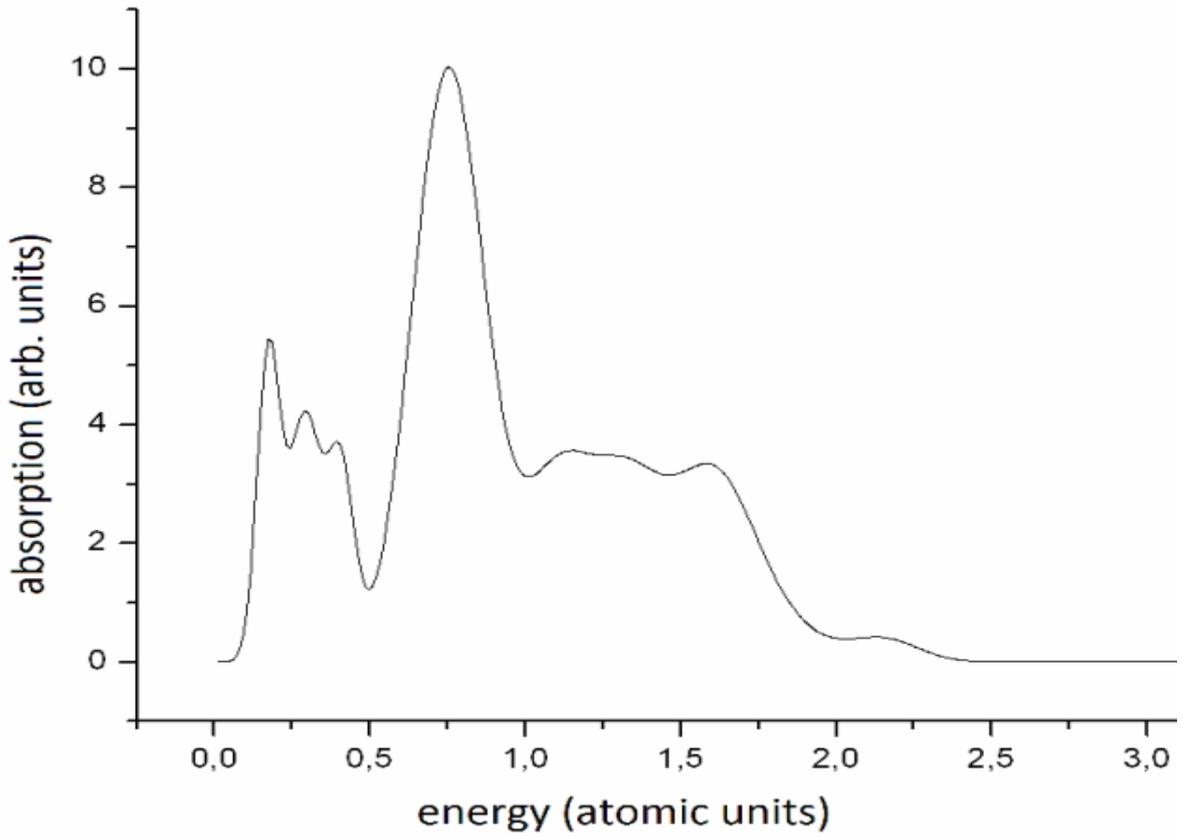


Fig. 1. Absorption spectrum of fullerene model with two active electrons

During the simulation of resonant high-harmonic generation the carrier frequency of laser radiation ω with duration 60 femtoseconds was assumed to be 0.057 atomic units (corresponding to 800 nm wavelength).

To investigate the detuning from resonance, carrier frequency of 0.046 atomic units was used. Together with this, to introduce the corresponding deviations from flat electromagnetic wave, necessary Gaussian broadening by pulse intensity was introduced. The used wave had the form correspondingly:

$$E(t) = \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) E_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

The investigation of spectra of resonant high-harmonic generation emerging during the interaction of the given system with femtosecond pulses with central frequency of 0.057 atomic units (Fig. 2) showed that the decrease of the number of configurations up to 1 expansion function did not lead to the full disappearance of resonant high-harmonic generation although it decreased the observable conversion efficiency. In one-dimensional case the observed conversion efficiency was decreased. One can state that indeed due to this fact the necessity of introduction of many configurations for observing the resonant high-harmonic generation in one-dimensional case is related. As it should be expected, the closest proximity to experimental results had the most exact approximation with 6 expansion functions.

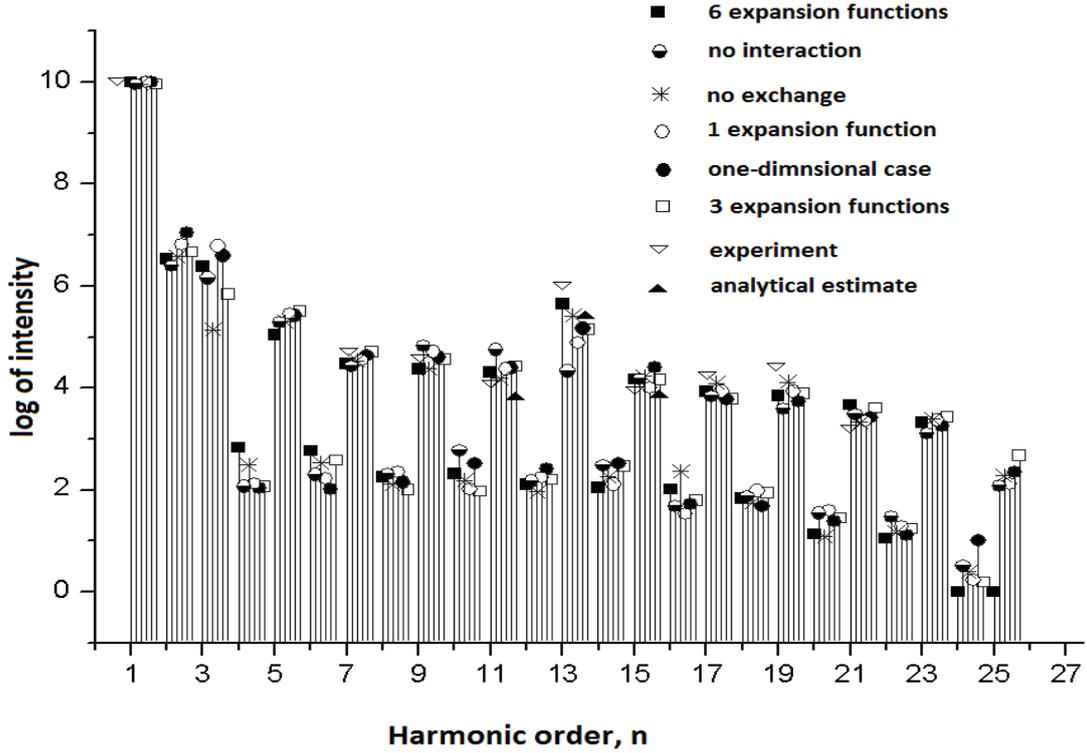


Fig. 2. The influence of approximations on the efficiency of resonant high-harmonic generation

The analytical estimate of conversion efficiency by the relation:

$$\frac{I_{resonant}}{I_{nonresonant}} = \frac{2\pi\Omega^3 f_{osc}}{\omega p^3 [Z^* M(p)]^2} \left[\frac{\Gamma^2}{4(\Omega - q\omega)^2 + \Gamma^2} \right] \quad (6)$$

gave the result which was close to the result without consideration of electron exchange, because the analytical model does not include this substantially multi-electron effect. It should be also noted that the possible deviations from the experiment obtained using given analytical formula are also connected to the mechanisms of transition of an electron into ground state considered at derivation of the formula. So for achieving quantitative agreement with the experiment, simulation of the process of resonant high-harmonic generation is preferable.

The neglect of electron-electron interaction destroyed the effect of resonant high-harmonic generation completely. At the same time the representation of electrons as distinguishable particles almost did not reduce the efficiency of resonant high-harmonic generation. The most important practical application of this phenomenon is the necessity of exact accounting of the electron-electron repulsion, while the exchange processes should receive not so much attention unless maximal proximity to the experiment is required.

Based on the results of the given research in weakly correlated systems, the precision of accounting the electron correlation has no qualitative influence on the observability of resonant high-harmonic generation. This effect is especially important because the simulation of electron exchange is much simpler task than the simulation of electron correlation.

It is shown for the first time that resonant high-harmonic generation is explained completely by single-atom multielectron effects and hence can be combined with phase matching of pump and harmonic at the propagation of radiation in extended plasmas.

In the third chapter “**Investigation of promising nonlinear systems for resonant high-harmonic generation**”, the computational data on resonant high-harmonic generation simulation are presented on the basis of the time-dependent density functional method.

In the time-dependent density functional method the solution of Shrodinger equation is replaced by the solution of a system of Kohn-Sham equations for non-interacting electrons. The potential used in it

$$v_{XC}(r,t) = v_{ext}(r,t) + v_{Hartree}(r,t) + v_{xc}(r,t) \quad (7)$$

is the only approximation of the method, and for lower harmonics the adiabatic approximation of local density is allowed

$$v_{xc}^{adiabatic}(r,t) = \tilde{v}_{xc}[n](r) |_{n=n(t)}, \quad (8)$$

while the exact exchange potential is used for high harmonics(Fig. 3).

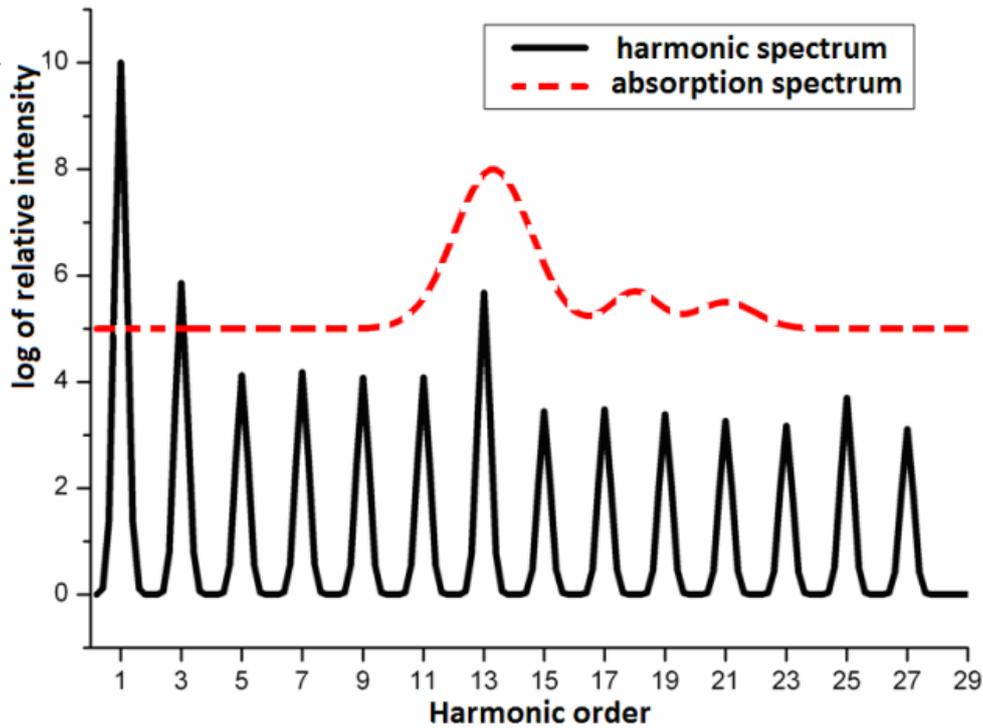


Fig. 3. Results of modelling of resonant high-harmonic generation from indium ion (In^{+1})

For the simulation of resonant high-harmonic generation in indium plasma, indium atom was represented using pseudopotentials, so the spectrum which was obtained by delta-kick method was a little simplified and had very prominent maximum in the region of 13th harmonic of radiation with frequency of 0.057 atomic units, which was compared with the absorption spectrum of the given system obtained on the basis of Fourier transformation.

For the first time a theoretical simulation of high-harmonic generation in plasma of C_{60} fullerenes by the time-dependent density functional method for the case of full simulation of contribution of all atoms of carbon in the molecular field. Carbon atoms were modelled using norm-conserving nonlocal potentials of Troiller-Martins, Slater approximated exchange functional, correlation functionals as well as adiabatic local density approximation. On the basis of the comparison of calculation data with experimental data it is shown that significant intensity enhancement of high-harmonic generation in case of C_{60} plasma can be explained on the basis of the model of multielectron resonant recombination as transfer of the accelerated electron's energy to excitation of a few electrons at once in plasmonic oscillation (Fig. 4).

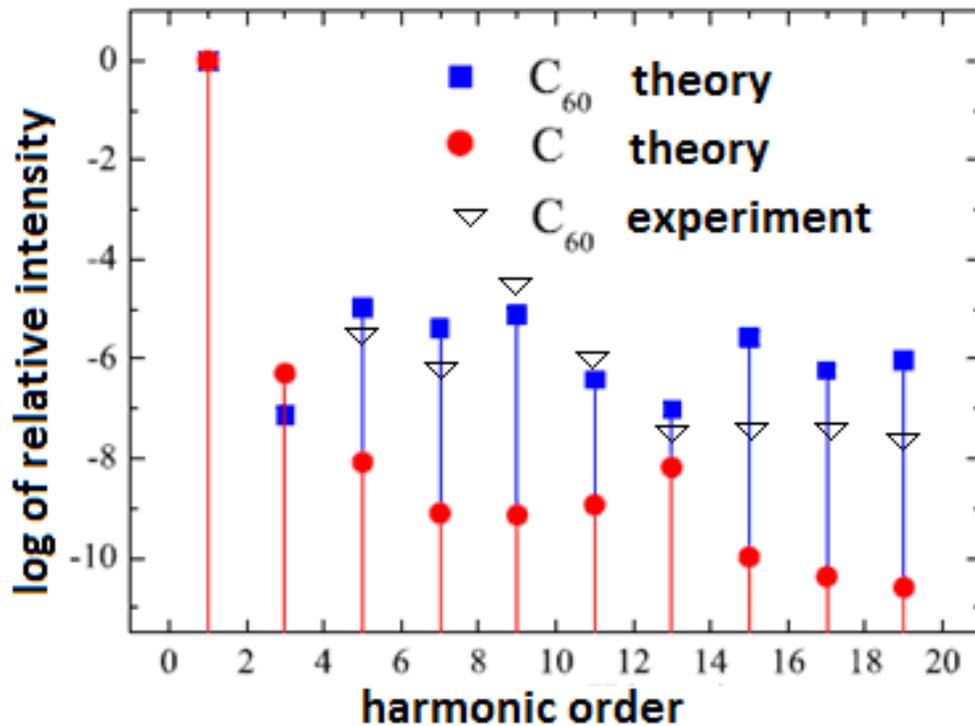


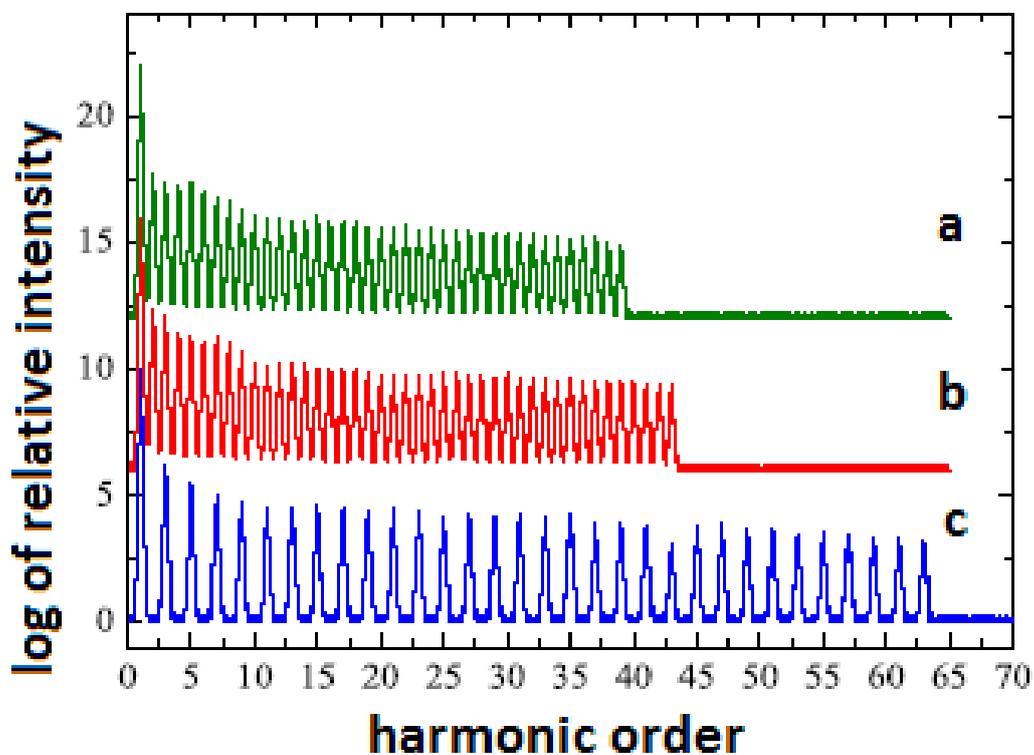
Fig. 4. Comparative power spectrum of harmonics from carbon atoms and C_{60} fullerene molecules at identical conditions

The enhancement of high-harmonic generation in C_{60} plasma compared to carbon plasma, despite the higher extinction index, points out that resonant high-harmonic generation in C_{60} plasma is not connected with good phase matching during the propagation. This circumstance proves the correctness of model of multielectron resonant recombination during the enhancement of a series of harmonics in C_{60} plasma, while the effects of the propagation were found to be factors which sufficiently limit the efficiency of resonant high-harmonic generation in such media. Indeed, cross-section of photo-ionization of C_{60} has a broad giant plasmon resonance approximately at 20 electron-volts (near the 11th, 13th and 15th harmonics of titan-sapphire laser radiation with wavelength of 800 nm) with full width at half maximum of the band 10 electron-volt. When computing the absorption length using the supposed density of fullerenes in the interaction region ($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) and known cross-section of photo-ionization we obtain that the

absorption length changes from 0.8 mm (for the 7th and 17th harmonics) to 0.3 mm (for the 11th, 13th and 15th harmonics).

The research of high-harmonic generation in two-frequency pump fields was performed (Fig.5). It is shown that high-harmonic generation spectra in two-frequency fields are in good agreement with the experimental results of high-harmonic generation. Precision of simulation of the investigated systems is provided by small step of integration, small distance between grid points and large grid sizes in 3 dimensions, precision of the chosen ionization potentials (for silver atoms) and proximity of parameters of modelled laser radiation to experimental ones.

Calculations show the destructive influence of the collinear field of second harmonic on return conditions of electrons as well. As far as these circumstances do not contradict the semiclassical model, one can also expect the correctness of the proposed model of multi-electron resonant recombination for two-frequency fields.



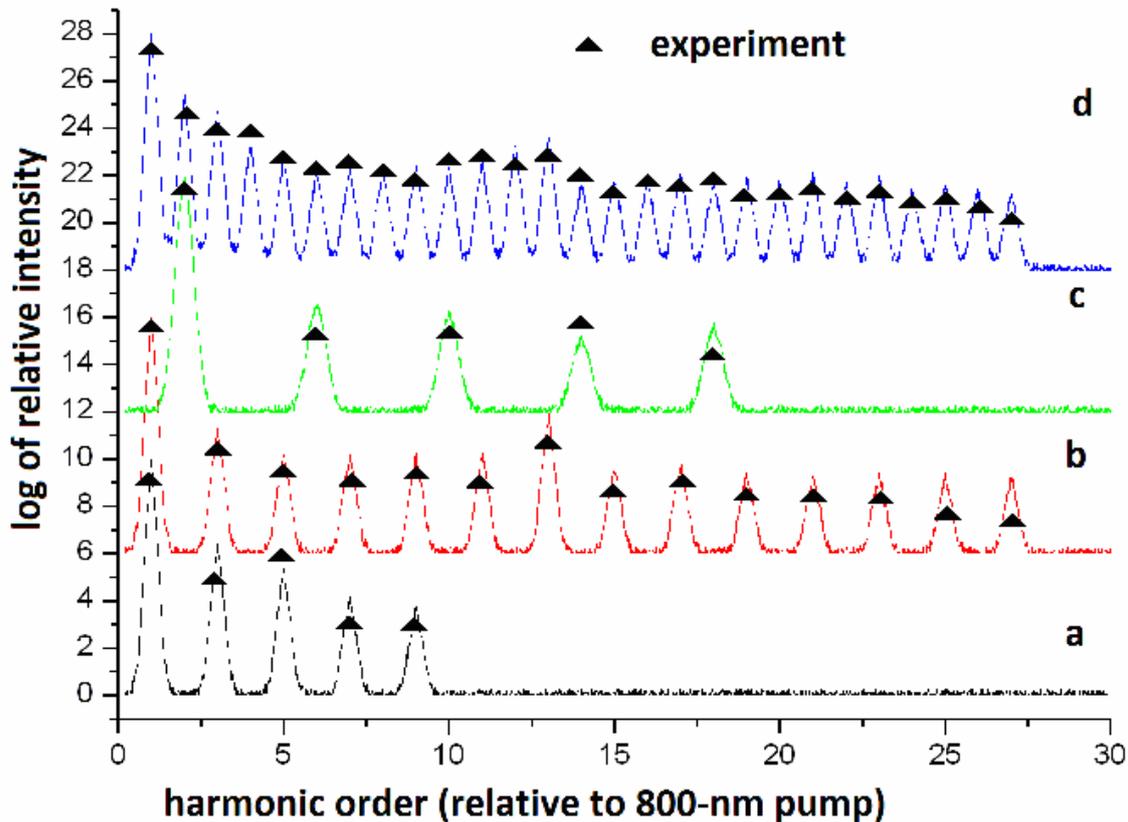
a-Two-frequency pump with parallel polarization; b-Two-frequency pump with orthogonal polarization; c-Single-frequency pump

Fig. 5. Power spectra of high-harmonic generation in silver plasma irradiated by different pulses

The theoretical study of resonant high-harmonic generation in two-frequency fields was performed for indium plasma. The analysis of the results of high-harmonic generation was performed using piecewise approximation by the least-squares approach that required preliminary approximate determination of cut-off harmonic for better precision of the expansion. At the same time small deviance (within 1-3 harmonic orders) in cut-off harmonic energies was noticed compared to

experiment. The results of high-harmonic generation in indium plasma of atoms and ions for different peculiarities of pump pulse are presented in Fig. 6 in the units of energy of harmonics of pump radiation of frequency 0.057 atomic units.

It is seen from Fig. 6 that in full agreement with the model of multielectron resonant recombination, resonant high-harmonic generation was not observed for single-electron approximation neutral atoms of indium. However, we have the enhanced 13th harmonic in indium plasma at the pump of single-frequency field with the frequency of 0.057 atomic units.



a-In⁺⁰ single-frequency field, single-electron approximation; b-In⁺¹, single-frequency field; c-In⁺¹, single-frequency field of the 2nd harmonic d-In⁺¹, two-frequency field.

Fig. 6. Spectra of high-harmonic generation in indium plasma at different irradiation conditions

Indeed, the detuned from the resonance the 5th and 7th harmonics of driving radiation of the second harmonic (that is, 10th and 14th harmonics of the main pump) are not resonantly enhanced. A special importance, however, get the results of high-harmonic generation simulation in the field of orthogonally polarized two-frequency pump using the main radiation and its second harmonic. It is clearly seen that in this case not only 13th but also 12th harmonic of the main radiation are enhanced. Despite the fact that the enhancement of each harmonic is somewhat lower than for single-frequency field, their summary intensity excess over the intensity of the 13th harmonic in single-frequency field should be mentioned.

For comparison, resonant high-harmonic generation was investigated in plasma of C₆₀ fullerene with implanted ions of indium and antimony. The interest in fullerenes with atoms or even molecules inside (the so-called endohedral

fullerenes) as for targets for resonant high-harmonic generation emerges due to the reason that their utilization is promising for the unification of enhancement of several harmonics in fullerene plasma with exceptionally high conversion efficiency from semiconducting targets which have undergone laser ablation.

As pseudopotential, exact exchange potential for corresponding atoms was accepted that allowed to get more precise harmonic spectra, because in this case calculations do not lose precision due to non-adiabaticity of the effect of high-harmonic generation to that degree where the pseudopotentials chosen on the basis of local density approximation are inefficient. The results of the investigation of absorption spectra for the given fullerenes are presented in Fig. 7.

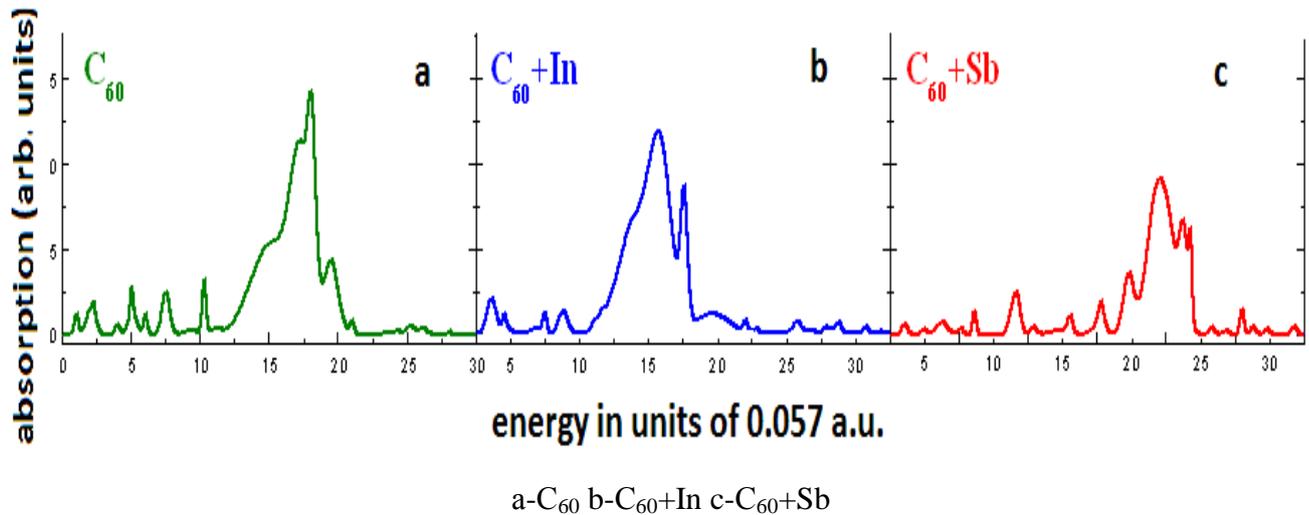


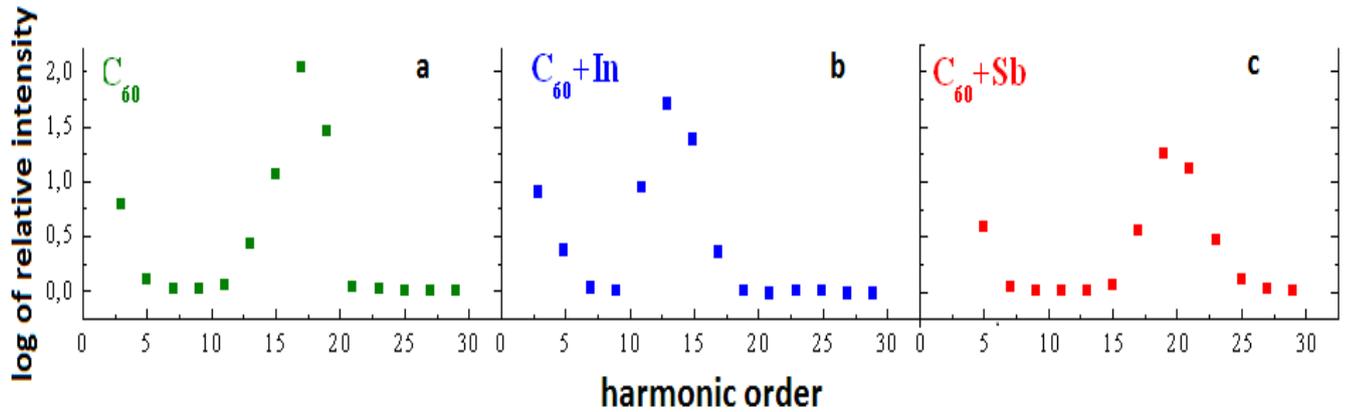
Fig. 7. Absorption spectra calculated by time-dependent method for different systems

In the plasma of endohedral fullerenes ($C_{60}+In$ and $C_{60}+Sb$) the maximum of plasmon absorption shifted itself from the 15th harmonic in C_{60} plasma to the 13th and the 21th harmonics in the plasmas of $C_{60}+In$ and $C_{60}+Sb$ correspondingly, that is close to the corresponding absorption peaks of ions of indium and antimony observed both theoretically and experimentally. So, in the computational experiment the C_{60} shell has no overwhelming influence on the absorption spectrum of the central atom. At the same time the delocalized electrons of the C_{60} shell have the property to tune to stronger oscillations of electronic density of the central atom with possible ionization of the central atom.

In Fig.8 the results of investigation of resonant high-harmonic generation in corresponding systems are presented. The enhanced groups of neighbouring harmonics in all cases shifted themselves to the maximums of peaks of plasmon absorption which allows to consider this enhancement of high-harmonic generation a resonant one. The practical importance of this phenomenon consists of the possibility of its utilization for more efficient generation of attosecond pulses. Despite the fact that the model of multielectron resonant recombination better describes the process of optical pump of highly excited level, and the calculations have good correspondence with the experiment, the character of resonant

recombination in presence of some population of resonant level should be explained. Indeed, the mechanism of depopulation of the excited level

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s\Gamma_{ph} \quad (9)$$



a-C₆₀ b-C₆₀+In c-C₆₀+Sb.

Fig. 8. Resonant high-harmonic generation in the investigated systems

includes only non-elastic excitation and spontaneous emission. However, spontaneous emission can be observed independently of proximity of the field to multiphoton resonances in the medium, so coherent contribution into the radiation on resonant frequency should be described by the stimulated emission:

$$ds / dt = p\sigma |c|^2 - s(\Gamma_{ph} + B_{12}u) \quad (10)$$

The given mechanism, which determines the resonant recombination, influences the precision of analytical estimates made using single active electron approximation, that is the less exact the stronger is the non-resonant signal of a harmonic close to the frequency of the investigated resonance. Such process of enhancement of harmonic signal on behalf of the stimulated transition can take place even in the systems where there is no population inversion between the ground and the excited states either in the frames of four-level process, where the inversion is achieved with some intermediate level or in the boundaries of applicability of prohibition of stimulated absorption in conditions of destructive interference of various channels of absorption. Both given mechanisms can be easily realized in the scheme of resonant high-harmonic generation because the process of excitation to resonant level is non-coherent and takes place in presence of the field of a high harmonic which can be considered as relatively strong taking into account the intensities used in experiments. An important practical feature of incoherent character of the pump during the multielectron resonant recombination process is the possibility to enhance substantially the efficiency of resonant high-harmonic generation by directing into the laser plasma a flow of electrons with energies close to that of resonant transition.

In the fourth chapter **“Influence of concentration of particles on high-harmonic generation”**, the results of investigation of the influence of

concentration of particles on high-harmonic generation including resonant high-harmonic generation are presented.

The problem of theoretical determination of concentration of neutral particles was solved by molecular dynamical method using the program created on the basis of ITAP IMD package. The evident advantages of the method of molecular dynamics are high obviousness, the possibility of studying the formation of nanostructures, the account of the real structure of the target and availability of a large number of empirical pseudopotentials describing the atomic interaction. The simulation of ablation by relatively long pulses was performed through averaging by a few shorter measurements. Such an approach, which is not realized in the starting form of ITAP IMD code, allowed to make calculations without quadratic growth of computational difficulty with the increase of simulated time of ablation.

Determination of concentration of ions was performed on the basis of the multiplication of ionization probability in laser ablation pulse by the concentration of neutral atoms, and can easily be implemented both based on analytical methods and using the time-dependent density functional method.

In the first turn the investigation of the influence of laser ablation on the enhancement of high-harmonic generation in carbon plasma was performed. The research was carried out at the same conditions, and the plasma was created on surface of the target by ablation pulses of different duration. For the case of 10-nanosecond ablation pulses it was shown that for harmonics from the 9th to the 15th the conversion efficiency in carbon plasma was 2 to 5 times higher than in argon. The highest orders (from the 15th) were generated in argon more effectively than in carbon plasma. For 8-picosecond ablation pulses the efficiency of high-harmonic generation for 9th-15th harmonics was 2-5 times higher than in carbon plasma. The highest order of the generated harmonics in carbon plasma, which were observed in the experiment, was equal 27.

To explain this effect, an investigation of the process of laser ablation was performed for the case of graphite target. The photos, which were obtained through a scanning electron microscopy, did not show the presence of nanoparticles on the sprayed surfaces after the ablation using 8-picosecond pulses even for the maximum conversion efficiency. On the contrary, for relatively moderate intensity of ablation using 10-ns pulses ($1 \times 10^9 \text{ W cm}^{-2}$) a lot of nanoparticles whose size varied from 20 to 100 nm were found.

The density of argon was $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The corresponding densities of carbon plasma at the experimental conditions of laser ablation ($2 \times 10^{10} \text{ W cm}^{-2}$ for 8-ps pulses and 10^9 W cm^{-2} for 10-ns pulses), which were found using IMD ITAP, were equal $2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. It is natural to assume that the higher is the concentration of particles the higher is the degree of their clusterization as the highest contribution to the distribution of particles makes their average velocity at the take-off from the surface which determines both their position approximately 30 nanoseconds after the beginning of ablation and the degree of clusterization at the take-off from the surface. Thus the molecular dynamical simulation also shows that, taking into account extremely high concentration of carbon atoms in the

interaction area, the formation of large clusters in case of 10-nanosecond pulses is observed. The intensity of the q^{th} harmonic can be expressed as

$$I_q \propto |d_q|^2 N^2 L^2 \quad (11)$$

where d_q is the oscillating dipole at the frequency $q\omega$, $|d_q|^2$ - nonlinear optical response of a single particle, N - density of oscillators, L - length of the medium.

It was found that in case of relatively low harmonics $|d_q^{\text{plasma}}|^2 / |d_q^{\text{Ar}}|^2 \approx 2-5$ in case of ablation by 10-ns pulses.

Calculations for 8-ps ablation ($N = 2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L = 0.5 \text{ mm}$, $I_q^{\text{plasma}} / I_q^{\text{Ar}} \approx 0.2-0.5$.) show that the parameter $|d_q^{\text{plasma}}|^2 / |d_q^{\text{Ar}}|^2$ is higher by an order of magnitude compared with the plasma formed by 10-nanosecond pulses. A conclusion was made that stronger low harmonics generated in plasma (relative to argon) can be explained by the presence of small nanoparticles which can increase the intensity of these harmonics.

The consequent analysis of high-harmonic generation from various ultrashort laser pulses in graphite plasma at different conditions of its formation also confirmed the hypothesis about the presence of a lot of nanoparticles in carbon plasma. As a result of the simulation of ablation by 10-ns pulses at the intensities of 0.33×10^9 , 10^9 and $3 \times 10^9 \text{ W cm}^{-2}$, the concentrations of carbon atoms in the interaction region were correspondingly 10^{18} , 2.5×10^{18} and $3.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. As a result of the simulation of ablation by picosecond pulses (at the intensities of 6.6×10^9 , 2×10^{10} and $6 \times 10^{10} \text{ W cm}^{-2}$), lower concentrations of atoms were obtained (1.1×10^{17} , 2.6×10^{17} and $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), which points out the decisive contribution of the density of pulse energy (compared to pulse intensity) on the formation of optimal plasma.

Most of the performed researches of high-harmonic generation in plasmas obtained by the method of laser ablation were carried out using short plasma plumes (less than 0.5 mm). This is connected with the fact that at subsequent increase of the length of the medium L greater than the coherent length for the given harmonic, the conversion efficiency of pump into harmonic is decreased according to the relation:

$$I \propto \left(\frac{\sin \Delta K \frac{L}{2}}{\Delta K} \right)^2 \quad (12)$$

where the coherent length is determined in the following way:

$$L_k = \frac{\pi}{\Delta K} \quad (13)$$

Now we shall consider the influence of concentration of particles on the efficiency of high-harmonic generation in conditions of quasi-matching of phases.

The concentrations of both neutral atoms and ions were investigated at the ablation of Ag and Mn targets on the distance of 100 μm from the surface taking into account the delays between the ablation and pump of 43 nanoseconds. For the

radiation flux of 1.2 J/cm^2 , the concentrations were obtained using ITAP IMD package Ag- $2.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, Mn- $1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ correspondingly. These concentrations had almost no dependence on the duration of the ablation pulse at its same energy.

The efficiency of enhancement during the propagation in extended noninterrupted medium far from quasi-phase matching conditions is given by the relations

$$n_p(L, L_a, L_k) \propto \frac{L_a^2}{1 + 4\pi^2 \left(\frac{L_a}{L_k}\right)^2} \left[1 + e^{-L/L_a} - 2 \cos\left(\pi \frac{L}{L_k}\right) e^{-(L/2L_a)} \right] \quad (14)$$

$$E_q(q, L, L_{a_q}, L_{k_q}) \propto \frac{n_p(qL, L_{a_q}, L_{k_q})}{n_p(L, L_a, L_k)} \quad (15)$$

where L —length of medium, q - harmonic order, L_a - absorption length, $E_q(q, L, L_{a_q}, L_{k_q})$ - relative harmonic enhancement. Coherent length for the q^{th} harmonic at pump wavelength $\lambda \approx 800 \text{ nm}$ can be conveniently written as:

$$L_k(\text{mm}) \approx 1.4 \times 10^{18} / qN_e(\text{cm}^{-3}) \quad (16)$$

Then at the flux higher than 1.5 J/cm^2 , the coherent length for harmonics near the 31^{th} becomes less than 0.7 mm at the degree of ionization about 10% and concentrations given above. This is also 10 times less than the coherent length in noble gases.

Taking into account that for 5-mm plasma the efficiency was nearly the same as for short plasma and was 4×10^{-6} in plateau region, the conversion efficiency in case of media with modulated density exceeds typical conversion efficiencies in short plasmas by more than an order of magnitude.

In Fig. 9 comparative conversion efficiencies are presented for Ag and Mn plasmas correspondingly for 5-mm non-interrupted plasma and 8 0.4-mm plasma jets. It is seen that the type of the matter influences the position of enhanced groups of harmonics due to the difference of concentrations of free electrons at ablation of targets. The method of enhancement of groups of high harmonics in plasma with spatially modulated optical density can be used for the exact determination of concentration of electrons in plasma plumes, obtained by laser ablation. The concentrations of free electrons calculated on the basis of determination of coherence length were found to be 6.2×10^{16} and $8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ correspondingly in cases of Ag and Mn. Moreover, by the study of radial dependence of efficiency of high-harmonic generation with getting away from the optical axis of the pump pulse sharp, decrease of the efficiency of high-harmonic generation was also noted. In connection with the knowledge of the exact concentration of free electrons determined theoretically, this can be used for quantitatively exact prediction of the results of experiments on the enhancement of high-harmonic generation on the basis of quasi-phase matching conditions in plasmas with spatially modulated optical density.

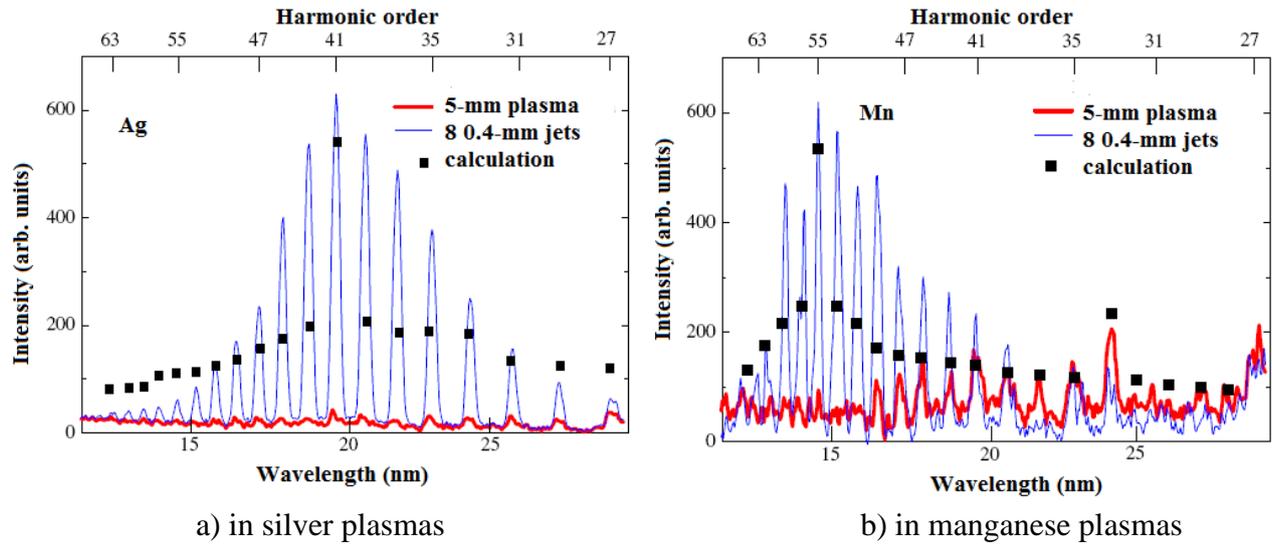


Fig. 9. Enhancement of high-harmonic generation in different plasmas with spatially modulated densities

In Fig. 9, in case of manganese plasma, the resonant enhancement of the 23rd harmonic is seen. The experimental results approve the possibility of observation of resonant high-harmonic generation simultaneously with quasi-phase matching. For theoretical calculations of nonlinear response of a single manganese atom the time-dependent density functional method was used so that the contribution of all optical electrons was modelled, after which the time-dependent dipole was substituted to the algorithm of calculation of propagation of harmonic radiation in plasma, that was justified in case of independence of contributions of the given regimes of enhancement.

Unfortunately, nowadays there is no experimental data which approves or declines the possibility of enhancement of single harmonic due to joint quasi-phase matching and resonant high-harmonic generation. This is due to the fact that for many practically important nonlinear systems, particularly, indium plasma, the calculation of concentration of atoms and ions obtained using laser ablation is complicated due to lack of reliable interaction potentials of atoms. But the observed direct proportionality of concentration of atoms to the total energy of ablation pulse allows tuning the area of quasi-phase matching to the resonance by controlling the intensity of ablation pulse while holding its energy. The required initial degree of ionization should be estimated based on model of multielectron resonant recombination.

CONCLUSION

1. For the first time reliable information about spectra of resonant high-harmonic generation is provided on the base of exact potentials and parameters of pump pulses close to the experimental ones.
2. It is shown that the resonant high-harmonic generation is determined by population of resonant state by means of excitation of inner electrons of ion to resonant level as a result of inelastic scattering of the accelerated electron as

well as by subsequent recombination of electrons from the excited level to the ground state with generation of resonant harmonic due to stimulated emission influenced by nonresonant harmonic of the same order.

3. For the first time theoretical simulation of high-harmonic generation in the plasma of C_{60} fullerenes was performed using the time-dependent density functional method for the case of fully modelling the contribution of all carbon atoms into molecular field, at the same time the enhancement of harmonics was obtained in the range of surface plasmon resonance of C_{60} fullerenes 10 times higher than outside this range.
4. It is shown that in laser plasma of endohedral fullerenes In C_{60} and Sb C_{60} shift of maximum of resonant enhancement of a group of high harmonics relative to pure C_{60} due to shift of plasmon absorption maxima of fullerene casing to atomic resonances of embedded atoms.
5. It is shown that the main factor restricting the possibilities of enhancement of high-harmonic generation by increasing concentration of laser plasma is the breach of conditions of phase matching with increase of concentration of free electrons.
6. It is shown that optimal relative to conversion efficiency plasma of indium can be obtained using ablation pulses with duration of 10 picoseconds and intensity of $2 \times 10^9 \text{ W cm}^{-2}$, while optimal plasma of chromium is created using ablation pulses with duration of 100 femtoseconds and intensity of $10^{11} \text{ W cm}^{-2}$, that is linked to different ionization degrees of resonant levels of these elements.
7. It is shown that at short (on the order of 100 femtoseconds) and intense (more than $10^{11} \text{ W cm}^{-2}$) ablation pulses nanoparticles of the size more than 10 nm are formed which increase high-harmonic generation in weak fields due to local field effect and in strong fields they only decrease the efficient concentration of radiating dipoles and free electrons.
8. For the first time a technique of control of efficiency of resonant high-harmonic generation was developed based on control of duration and intensity of ablation pulse in plasmas with spatially modulated optical density.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Ganeev R.A., Singhal H., Naik P.A., Arora V., Chakravarty U., Chakera J.A., Khan R.A., Redkin P.V., Raghuramaiah M., Gupta P.D. Single harmonic enhancement by controlling the chirp of the driving laser pulse during high-order harmonic generation from GaAs plasma // Journal of Optical Society of America B, OSA, -USA, 2006. -Vol. 23, -pp. 2535-2540 (No.40. ResearchGate; IF=1,97).
2. Ganeev R.A., Singhal H., Naik P. A., Arora V., Chakravarty U., Chakera J.A., Khan R.A., Kulagin I.A., Redkin P.V., Raghuramaiah M., Gupta P.D. Harmonic generation from indium-rich plasmas // Physical Review A, AIP, -USA, 2006.- Vol. 74, -pp. 063824-1 - 063824-6 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
3. Ganeev R.A., Suzuki M., Redkin P.V., Baba M., Kuroda H. Variable pattern of high harmonics spectra from a laser-produced plasma by using the chirped pulses of narrow-bandwidth radiation // Physical Review A, AIP, -USA, 2007. -Vol. 76, -pp. 023832-1 - 023832-8 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
4. Ganeev R.A., Elouga Bom L.B., Ozaki T., Redkin P.V. Maximizing the yield and cutoff of high-order harmonic generation from plasma plume // Journal of Optical Society of America B, OSA, -USA, 2007.- Vol. 24, -pp. 2770-2778 (No.40. ResearchGate; IF=1,97).
5. Ganeev R.A., Redkin P.V. Role of resonances in the high-order harmonic enhancement in diatomic molecules // Optics Communications, Elsevier, - Netherlands, 2008. -Vol. 281, -pp. 4126-4129 (No.40. ResearchGate; IF=1,45).
6. Ganeev R.A., Singhal H., Naik P.A., Kulagin I.A., Redkin P.V., Chakera J.A., Tayyab M., Khan R.A. and Gupta P.D. Enhancement of high-order harmonic generation using two-color pump in plasma plumes // Physical Review A, AIP, -USA, 2009. - Vol. 80, -pp. 033845-1 -033845-9 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
7. Ganeev R.A., Elouga Bom L.B., Wong M.C.H., Brichta J.P., Bhardwaj V.R., Redkin P.V., Ozaki T. High-order harmonic generation from C60-rich plasma // Physical Review A, AIP, -USA, 2009. -Vol. 80, -pp. 043808-1 -043808-8 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
8. Redkin P.V., Kodirov M.K., Ganeev R.A. Investigation of resonant nonperturbative high-order harmonic generation from indium vapors // Узбекский Физический Журнал, -Ташкент, 2009.- т.11, -с.329-333 (01.00.00, №.5).
9. Redkin P.V. and Ganeev R.A. Simulation of resonant high-order harmonic generation in three-dimensional fullerenelike system by means of multiconfigurational time-dependent Hartree-Fock approach // Physical

- Review A, AIP, -USA, 2010.-Vol. 81,- pp. 063825-1 -063825-6 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
10. Redkin P.V., Kodirov M.K., Ganeev R.A. Theoretical investigation of resonant nonperturbative harmonic generation in indium vapors // Journal of Optical Society of America B, OSA, -USA, 2011.- Vol.28,- pp.165-170 (No.40. ResearchGate; IF=1,97).
 11. Redkin P.V., Danailov M.B., Ganeev R.A. Endohedral fullerenes: A way to control resonant high-harmonic generation // Physical Review A, AIP, -USA, 2011.- Vol. 84, - pp. 013407-1 -013407-5 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
 12. Ganeev R.A., Witting T., Hutchison C., Frank F., Redkin P.V., Okell W.A., Lei D.Y., Roschuk T., Maier S.A., Marangos J.P. and Tisch J.W.G. Enhanced high-order-harmonic generation in a carbon ablation plume.// Physical Review A, AIP, -USA, 2012.- Vol. 85, -pp. 015807-1 -015807-4 (No.40. ResearchGate; IF=2,81).
 13. Ganeev R.A., Hutchison C., Witting T., Frank F., Okell W.A., Zair A., Weber S., Redkin P.V., Lei D.Y., Roschuk T., Maier S.A., Lopez-Quintas I., Martin M., Castillejo M., Tisch J.W.G. and Marangos J.P. High-order harmonic generation in graphite plasma plumes using ultrashort laser pulses: a systematic analysis of harmonic radiation and plasma conditions // Journal of Physics B, IOP, -USA, 2012.- Vol. 45, -pp.165402-1 -165402-14 (No.40. ResearchGate; IF=1,98).
 14. Redkin P.V. Direct observation of multielectron effects in resonant high harmonic generation // Научный вестник Самаркандского государственного университета, -Самарканд, 2014.- т.5, -с. 51-58 (01.00.00, №2).
 15. Ganeev R.A., Suzuki M., Redkin P.V. and Kuroda H. Quasi-phase-matching of laser harmonics using variable multi-jet plasmas // Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, World Scientific, -Singapore, 2014. - Vol 23, -pp 1450013-1 -1450013-10 (No.40. ResearchGate; IF=0,64).
 16. Ganeev R.A., Zheng J., Wostmann M., Witte H., Redkin P.V. and Zacharias H. Resonant and non-resonant high-order harmonic generation in the plasmas produced by 1 kHz picosecond and femtosecond pulses // European Journal of Physics D: Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, Springer, -USA, 2014. -Vol. 68, -pp. 325-330 (No.40. ResearchGate; IF=1,23).
 17. Wostmann M., Redkin P.V., Zheng J., Witte H., Ganeev R.A. and Zacharias H. High-order harmonic generation in plasmas from nanoparticle and mixed metal targets at 1-kHz repetition rate // Applied Physics B, Springer,-USA, 2015. -Vol. 120, -pp. 17-24 (No.40. ResearchGate; IF=1,86).

II бўлим (II часть; Part II)

18. Redkin P.V., Kodirov M.K., Ganeev R.A. Investigation of resonant nonperturbative high-order harmonic generation from indium vapors // 5-я международная конференция по физической электронике UzPEC-5 Ташкент, Узбекистан, 28-29 октября 2009, С. 128.

19. Редькин П.В. Резонансная генерация высших гармоник: обзор достижений // Республиканская конференция «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари», Самарканд, Узбекистан, 28-29 мая 2010 , С. 171-174.
20. Redkin P.V., Kodirov M.K., Ganeev R.A. Calculations of plasma formation for harmonics generation // II Международная конференция «OPTICS and PHOTONICS-2013», Самарканд, Узбекистан, 25-27 сентября 2013, С. 184-187.
21. Редькин П.В., Захариас Х., Ганеев Р.А., Данаилов М.Б. Расчеты эндофуллеренов для генерации высших гармоник // Международная конференция по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС-XX , Воронеж, Россия, 23-27 сентября 2013, С. 106-108.
22. Redkin P.V. Calculations of optimal plasma formation for high-harmonic generation // Международная конференция «Современная наука: теоретический и практический взгляд» Челябинск, Россия, 28 ноября 2015, Т.3, С. 3-6.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди (08.04.2016 йил)

Босишга рухсат этилди: _____ 2016 йил
Бичими 60x84 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 5. Адади: 100. Буюртма: № _____.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ» ДУК

