

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI  
URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMY KENGASH**

---

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI**

**REYIMBAYEV SHERZOD BOZORBOYEVICH**

**NOCHIZIQLI MUHITLARDA QUYI TARTIBLI NOCHIZIQLILIK VA  
YUQORI TARTIBLI GARMONIKALAR GENERATSIYASI**

**01.04.11- Lazer fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Urganch– 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктор философии (PhD) физико-  
математических наук**

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

**Reyimbayev Sherzod Bozorboyevich**

Nochiziqli muhitlarda quyi tartibli nochiziqlilik va yuqori tartibli  
garmonikalar generatsiyasi..... 3

**Рейимбаев Шерзод Базарбаевич**

Нелинейностей низшего порядка и генерация высших гармоник в  
нелинейных средах ..... 21

**Reyimbayev Sherzod Bozorboyevich**

Low-order nonlinearity and high harmonic generation in nonlinear  
media..... 41

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 45

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI  
URGANCH DAVLAT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI**

**REYIMBAYEV SHERZOD BOZORBOYEVICH**

**NOCHIZIQLI MUHITLARDA QUYI TARTIBLI NOCHIZIQLILIK VA  
YUQORI TARTIBLI GARMONIKALAR GENERATSIYASI**

**01.04.11- Lazer fizikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Urganch– 2025**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.3.PhD/FM1162 raqam bilan ro‘yxatga olingan.**

Dissertatsiya O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus va ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.urdu.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta’lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** **Boltayev Ganjaboy Sapayevich,**  
fizika-matematika fanlari doktori

**Rasmiy opponentlar:** **Yusupov Javdat Bakidjanovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor  
**Matnazarov Anvar Rustamovich**  
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

**Yetakchi tashkilot:** **O‘zbekiston Milliy Universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti huzuridagi PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil «24» iyun soat 14<sup>00</sup> dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 220100, Urganch sh., H.Olimjon ko‘chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-66-11; faks: (99862) 224-67-00.)

Dissertatsiya bilan Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (~~808~~ raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 220100, Urganch sh., H. Olimjon ko‘chasi, 14-uy. Tel.: (99862) 224-66-11; faks: (99862) 224-67-00.)

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «13» iyun kuni tarqatildi.  
(2025 yil «13» 06 dagi 8 -raqamli reestr bayonnomasi).



**U.O. Kutliev,**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash raisi,  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**K.R. Yakubov,**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash kotibi,  
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

**U.K. Sapaev,**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash qoshidagi  
ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari  
doktori, dotsent

## **KIRISH (Falsafa fanlari doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda optoelektronika, biofotonika va kvant optikasi sohalarida olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlarda, lazer qurilmalari ishlab chiqarishda va nanoo'lchamli strukturalarni sintez qilishda nohiziqli optik effektlarni qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida, nanoo'lchamli strukturalarda kvant o'lchamli effektlarga asoslangan nohiziqli optik xususiyatlarini o'rganish asosida yangi optik materiallar va ilg'or texnologik qurilmalarni yaratish bo'yicha olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlar natijalarini amaliyotga joriy etishni taqazo qiladi. Shu jihatdan, nanoo'lchamli strukturalarning o'ziga xos xususiyatlari yaratilgan qurilmalarning samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda nanoo'lchamli materiallarning nohiziqli optik xususiyatlarini o'rganishda olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlar, yangi turdagi yuqori foton energiyali kogerent yorug'lik manbalarini yaratishga va ular yordamida ixcham mikrofotolitografiya mashinalarini ishlab chiqarishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada nanozarralarning kvant o'lchamli optik xususiyatlarini boshqarish orqali kogerent manbalari generatsiyasi uchun yuqori samaradorliklarga erishish natijasida yuqori aniqlikdagi tasvirga oluvchi tizimlarini yaratish, biotexnologiya va kvant hisoblash kabi sohalarda innovatsion yechimlarni rivojlantirishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda innovatsion texnologiyalarni iqtisodiyotga joriy etish, energiya samaradorligini oshirish va resurs sarfini kamaytirish muhim strategik yo'nalish sifatida belgilangan va bu vazifalarni amalga oshirishda keng qamrovli chora-tadbirlar olib borilgan va muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan O'zbekiston Respublikasini innovatsion rivojlantirish strategiyasida, jumladan «...yangi turdagi mahsulotlar va innovatsion texnologiyalar yaratishning g'oyadan yakuniy iste'molchigacha bo'lgan kompleks tizimini ta'minlash orqali innovatsiyalarga bo'lgan talabni rag'batlantirish»<sup>1</sup> vazifalari belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, nanoo'lchamli muhitlarda quyi tartibli nohiziqilik va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi jarayonlarini o'rganish orqali muhim ilmiy natijalarga erishish va yangi usullarni rivojlantirish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28- fevraldagi PF-60-son farmoni, 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-sonli qarori va 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-sonli qarori kabi me'yoriy-huquqiy hujjatlar, elektrotexnika sanoatini rivojlantirish, mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirish, fizika sohasidagi ta'lim sifatini yaxshilash va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish kabi vazifalarni belgilaydi. Bundan tashqari, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi<sup>2</sup>, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022 – 2026 -yillarga mo'ljallangan Yangi

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 06.07.2022 yildagi PF-165-son

<sup>2</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 29.10.2020 yildagi PF-6097-son

O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi<sup>3</sup> farmonlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Ushbu tadqiqot O‘zbekiston Respublikasining ilm-fan va texnologiyalarni rivojlantirishga oid II-ustuvor yo‘nalishi - “Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik” sohalari bo‘yicha amalga oshirilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Hozirgi vaqtda dissertatsiya tadqiqoti yo‘nalishidagi bir qator dolzarb muammolar hal qilindi, jumladan, xitoylik (Hong-Wei Zang, He-Long Li, Yue Su, Yao Fu, Meng-Yao Hou, Andrius Baltuska, Kaoru Yamanouchi, and Huailiang Xu), Meksikalik olimlar (P. Zaca-Moran, R. Ramos-Garcia, J. G. Ortega-Mendoza, F. Chavez, G. F. Perez-Sanchez and C. Felipe), O‘zbekiston va Yaponiya olimlari (R. A. Ganeev, M. Baba, M. Suzuki, S. Yoneya, va H. Kuroda), Hindiston olimlari (H. Singhal, V. Arora, B. S. Rao, P. A. Naik, U. Chakravarty, R. A. Khan, va P. D. Gupta) va O‘zbekiston olimlari (G.S. Boltayev va boshqalar) tamonidan ilmiy izlanishlar olib borilgan.

Biroq, lazer ablyatsiya yordamida olingan rux (Zn) va rux selenid (ZnSe) nanozarrachalarning quyi va yuqori tartibli noxiziqli optik xususiyatlari tizimli ravishda o‘rganilmagan. Shuningdek, turli muhitlar sirtlarida hosil qilingan lazer-plazmasida generatsiyalangan 8–40 nm to‘lqin uzunligi diapazonidagi garmonikalar samaradorligi fazaviy moslashuv shartlari buzilgani sababli past chiqqan.

Shunday qilib, muommaning dolzarbligi va yetarlicha o‘rganilmaganligi inobatga olgan holda, muallif uglerod tarkibli yonish alangalari va plazma holatidagi muhitlarda quyi va yuqori tartibli noxiziqli jarayonlarni tadqiq qilish yo‘nalishini tanlashga asos bo‘ldi.

**Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilayotgan oliy ta‘lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya ishida keltirilgan tadqiqotlar davlat ilmiy-texnik dasturlar doirasida F2-FA-F160 “Chirpirlangan lazer impulslarining optik parametrik kuchaytirilishi va femtosekundli nurlanishning moddalar bilan noxiziqli o‘zaro ta’siri tadqiqotini o‘rganish” (2012-2016), OT-F2-49 “Subpetavatt quvvatli femtosekund lazer nurlanish generatsiyasini kuchaytirish usullarini yaratish va ularning moddalar bilan o‘zaro tasirini tadqiq qilish” (2017-2020) va MRU-FA-21/2017 “Keng klasterli va sirt yaqinidagi femtosekundli lazer plazmasida garmonika generatsiyasi va rentgen nurlanishi” (2017-2019) loyihalarida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** plazma holatidagi va uglerod tarkibli muhitlarning noxiziqli optik parametrlarini aniqlash va yuzaga keluvchi noxiziqli jarayonlar qonuniyatlarini o‘rganishdan iborat.

#### **Tadqiqot vazifalari:**

uglerod tarkibli muhitlarda noxiziqli optik jarayonlarni va uchinchi garmonikaning generatsiya mexanizmlarini o‘rganish;

lazer nurlanish yordamida suyuq fazada Zn va ZnSe nishonlarini lazerli ablatsiya qilishda ularning nanozarrachalari shakllanishini tahlil qilish;

---

<sup>3</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 28.01.2022 yildagi PF-60-son

nanoo'lchamli Zn va ZnSe zarrachalarining nohiziqli optik xossalarini Z-skanerlash usuli yordamida o'rganish, hamda nohiziqli yutilish va muhitning nohiziqli sindirish ko'rsatkichlarining qiymatlarini aniqlash;

lazer nurlanishi yordamida hosil qilingan Zn va ZnSe nanozarrachalari mavjud bo'lgan plazma holatidagi muhitlarda infraqizil lazer nurlanishining yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasini tajribada o'rganish;

plazma holatidagi muhitlarda generatsiyalanuvchi yuqori tartibli garmonikalar samaradorligini oshirish uchun plazma muhitning o'lchamlari va parametrlarini boshqarish usulini rivojlantirish.

**Tadqiqotning ob'ekti** – Zn va ZnSe nanozarrachalari, tarkibida uglerod bo'lgan yonuvchi moddalar, turli materiallarni lazer ablyatsiya qilish natijasida olingan plazma muhitlari.

**Tadqiqotning predmeti** Zn va ZnSe nanozarrachalarining nohiziqli optik xususiyatlari, uglerod asosli muhitlarda yuzaga keluvchi nohiziqli jarayonlar, shuningdek, lazer-plazma sharoitida yuqori tartibli optik garmonikalar generatsiyasining mexanizmlari va ularning samaradorligini oshirish usullari.

**Tadqiqotning usullari.** Dissertatsiya ishida lazer ablyatsiya usuli, Z-skanerlash usuli, atom kuch mikroskopiyasi, lazer nurlanishining garmonikasini hosil qilish, ekstremal ultrabinafsha spektral tahlili, optik spektroskopiya va elektron mikroskopiya usullaridan foydalangan holda tadqiq qilingan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk marotaba uglerod tarkibli nohiziqli muhitlarda qisqa lazer nurlanishining uchinchi garmonikasi samarali generatsiyasi uchun nohiziqli mexanizmlar o'rganilgan va uglerod nanozarrachalaridagi kuchli nohiziqli effektlar aniqlangan;

ilk marotaba suyuq muhitlarda lazer ablyatsiyasi jarayonida Zn va ZnSe nanozarrachalarining shakllanishi tahlil qilingan va o'lchamlari 100 va 200 nm bo'lgan sferik nanozarrachalar eritmasi olingan;

muhitlarni z-skanerlash usuli yordamida Zn va ZnSe nanozarrachalardan tashkil topgan eritmalarning nohiziqli optik xossalari o'rganilib, eritmalarning sindirish ko'rsatkichi va yutilish koeffisientlari nanoo'lchamli zarrachalarda yuzaga keluvchi kuchli kvant o'lchamli nohiziqli effektlar xisobiga ortishi kuzatilgan va nohiziqli parametrlarning qiymatlari o'lchangan;

ilk marotaba Zn va ZnSe nanozarrachalaridan tashkil topgan plazma muhitlarida o'ta qisqa infraqizil lazer nurlanishining yuqori tartibli garmonika generatsiyalari tajribada o'rganilgan va yuqori foton energiyali, xususan energiyasi 32 eV va 40 eV bo'lgan kogerent nurlanish generatsiyalari kuzatilgan;

ilk marotaba plazma holatidagi muhitlarda generatsiyalanuvchi yuqori energiyali fotonlarning kogerent nurlanish manbalarining energetik samaradorliklarini oshirish imkonini beruvchi usuli rivojlantirilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

Uglerod nanozarrachalaridan tarkib topgan nohiziqli muhitlarda uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorliklarining sezilarli darajada oshirish imkoniyati ko'rsatilgan.

Sham alangasidan olingan uglerod nanozarrachalarining supergidrofobik

xususiyatlari amaliy qoplama materiallari uchun yangi imkoniyatlar yaratgan.

Zn va ZnSe nanozarralaridan tashkil topgan plazma muhitlarida yuqori tartibli garmonika generatsiyalarining samaradorligini oshirish imkoniyat o'zaro tasirlashuvchi nurlanishlarining fazalarini kvazi moshlashtirish orqali erishish mumkinligi ko'rsatilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqotda qo'llanilgan eksperimental usullar yuqori darajadagi aniqlik va takrorlanuvchanlikka ega bo'lib, natijalar ilgari chop etilgan ilmiy maqolalar va tadqiqotlar bilan taqqoslanib ularga mosligi va asosiy nazariy tamoyillarga muvofiqligi bilan tasdiqlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati Zn va ZnSe nanozarrachalari eritmalarini sintez qilishda lazer nurlanishi parametrlarini va eritmaning fizik xossalarini taminlashga qaratilgan mexanizmlarining asoslanganligi hamda rivojlantirilgan usullarining matematik asoslari va boshqa noxiziqli jarayonlarini tadqiq qilishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati tajribalarda olingan Zn va ZnSe nanozarralaridan quvvatli lazer nurlanishi optik cheklovchi qurilmalarini yaratishda foydalanish mumkinligi va noxiziqli optik qurilmalarining sifatining yaxshilanishi bilan izohlanadi.

#### **Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.**

Zn va ZnSe nanozarrachalarining sintez qilish va kogerent nurlanish manbalari yaratish bo'yicha olingan natijalar asosida:

2018-2019 yillar davomida Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan YOOT-Ftex-2018-161, "Ikki o'zakli nurlotolada keng polosali nurlanishni qayta o'rganish va zichlashgan chastotali optik kanallarni spektral ajratilish" mavzusidagi amaliy tadqiqot doirasida nurlotoladagi noxiziqli optik jarayonlarning chuqur tahlili, chastotalarni almashtirish jarayonining optimallashtirilgan modellarini ishlab chiqish va yuqori tezlikdagi optik signallarni uzatish texnologiyalarini takomillashtirish maqsadida qo'llanilgan (O'zbekiston Respublikasi Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti 2024-yil 11- sentabrdagi 01/914-1715-son ma'lumotnomasi). Natijada, ikki o'zakli nurlotolalarda keng polosali nurlanishning parallel spektral kanallar orqali uzatish imkoniyatlarini kengaytirish, chastota almashtirish jarayonlarining samaradorligini oshirish va optik signallarni yuqori aniq ajratish texnologiyalarini takomillashtirishga xizmat qilgan;

turli optik muhitlarda aniqlangan quyi tartibli noxiziqlilik va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi bo'yicha olingan tajriba natijalarini Birlashgan Arab Amirliklari Sharja shahridagi Amerika universiteti (American University of Sharjah, UAE) tadqiqot markazida olib borilgan FRG21-M-S34, FRG19-L-S61 va FRG-C-S56 ilmiy loyihalarida qo'llanilgan. Natijada, lazer nurlanishining metal nanozarralaridan tashkil topgan lazer-plazmasi bilan o'zaro ta'siri jarayonida to'lqin uzunliklari 15-100 nm bolgan spektral sohalarda yuqori tartibli garmonikalar asosida samarador kogerent nurlanish manbalarini yaratish imkoniyatlari ko'rsatilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Tadqiqotlarning asosiy natijalari 11

ta ilmiy-amaliy anjumanlarda, shu jumladan 3 ta xalqaro va 8 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha olingan ilmiy natijalar 15 ta ilmiy ishda yoritilgan bo'lib, ulardan 4 tasi ilmiy maqola. Shundan 4 tasi O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyasining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan chet el va mahalliy ilmiy jurnallarida nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 119 sahifani tashkil etadi va asosiy matn, shu jumladan 21 ta rasm hamda 1 ta jadvalni o'z ichiga oladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

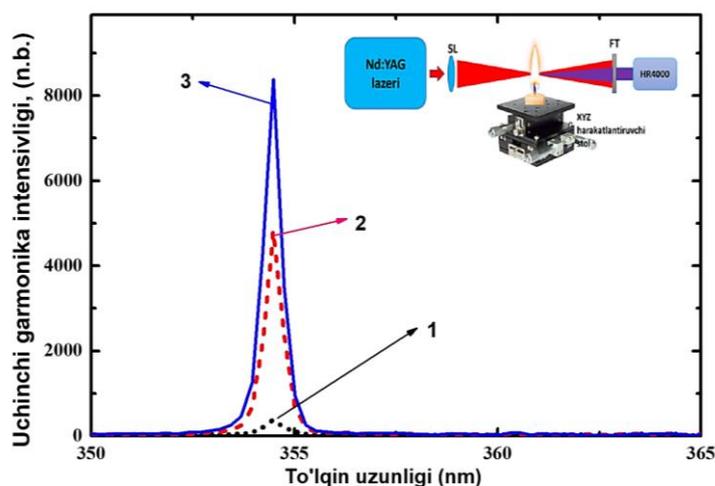
**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot ob'ekti, predmeti va usullari aniqlangan, olingan natijalarning ilmiy yangiligi, ilmiy va amaliy ahamiyati, tadqiqotning ishonchliligi hamda tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishning aprobatsiyasi va dissertatsiya tuzilishi haqida qisqacha ma'lumot keltirilgan.

Dissertatsiya ishining **“Nanozarralar va plazmalar yordamida garmonikalar generatsiyasini hosil qilishning zamonaviy usullari bo'yicha adabiyotlar sharhi”** deb nomlangan birinchi bobida nohiziqli optik jarayonlar va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi samaradorligini oshirishga qaratilgan zamonaviy usullar tahlil qilindi. Xususan, yuqori intensivlikdagi lazer nurlanishining muhit bilan o'zaro ta'sirida nohiziqli sindirish ko'rsatgichi, ikki fotonli yutilish, to'yinuvchi va teskari to'yinuvchi yutilish kabi nohiziqli hodisalarning roli hamda ushbu parametrlarning generatsiyalanayotgan garmonikalar amplitudasi va fazaviy moslashuv sharoitlariga ta'siri o'rganildi. Bundan tashqari, lazer-plazma parametrlarini nishon sirtida optimallashtirish, ionlanish jarayonlarini boshqarish va erkin elektronlarning fazoviy taqsimotini nazorat qilish orqali kogerent rentgen nurlanish hosil qilish samaradorligiga ta'siri tahlil qilindi. Bobning oxirida adabiyotlar sharhiga asoslanib, ushbu dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari belgilandi.

Dissertatsiya ishining **“Quyi tartibli nohiziqli jarayonlar va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi hosil qilish metodikasi, hamda eksperimental qurilmalar tavsifi”** deb nomlangan ikkinchi bobida turli muhitlarda olib borilgan eksperimental tadqiqotlarning metodologik asoslarini yoritishga bag'ishlangan. Ushbu bobda, eng avvalo, uglerod tutuvchi yonish alangalarida, xususan sham va etanol alangalarida, uchinchi tartibli garmonika generatsiyasini havoda hosil qilishga mo'ljallangan optik sxema va bu jarayonda paydo bo'ladigan nanozarrachalarni aniqlashda qo'llanilgan usullari keltirilgan. Shuningdek, yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasini kompleks tarzda o'rganish maqsadida Zn va ZnSe kabi metall va yarim o'tkazgich moddalardan femtosekund lazer ablatsiyasi usuli yordamida nanozarrachalarni sintez qilishga oid optik sxema, hosil bo'lgan zarrachalarning morfologik va spektral tavsiflarini aniqlash natijalari, shuningdek

ushbu tavsiflarni qayd qilish usullari batafsil yoritilgan. Bundan tashqari, lazer ablatsiyasi orqali tayyorlangan kolloid suspenziyaning Z-skanerlash texnikasi yordamida o'ljangan quyi tartibli nochiziqli optik xususiyatlarini aniqlashga mo'ljallangan eksperimental qurilma elementlari va ularning ishlash prinsipi keltirilgan. Shuningdek, ushbu bobda nanozarrachalardan tashkil topgan tagliklarni hosil qilish usullari hamda ushbu tagliklar va qattiq jism sirtida hosil bo'lgan plazmalarda ekstremal ultrabinafsha sohasida yuqori tartibli garmonikalarni generatsiyalash va qayd etish uchun qo'llanilgan spektrometning sxemasi keltirilgan. Ushbu spektrometr oltin bilan qoplangan silindrsimon ko'zgu, yo'naltiruvchi difraksion panjara, fosforli ekran bilan integratsiyalangan mikrokanalli plastinka hamda CCD kamera elementlaridan tashkil topgan. Bundan tashqari, qattiq jism sirtida ko'p tirqishli niqob yordamida davriy plazma tuzilmalarini hosil qilish va ushbu modulyatsiyalangan muhit orqali fazaviy moslashuvni yaxshilab, yuqori samaradorlikdagi garmonika generatsiyasiga erishish metodikasi tahlil qilingan. Tavsiflangan metodlar va eksperimental qurilmalar yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi jarayonini optimallashtirish, fazoviy-taqsimot xususiyatlarini baholash va nurlanish intensivligini oshirish imkonini berdi.

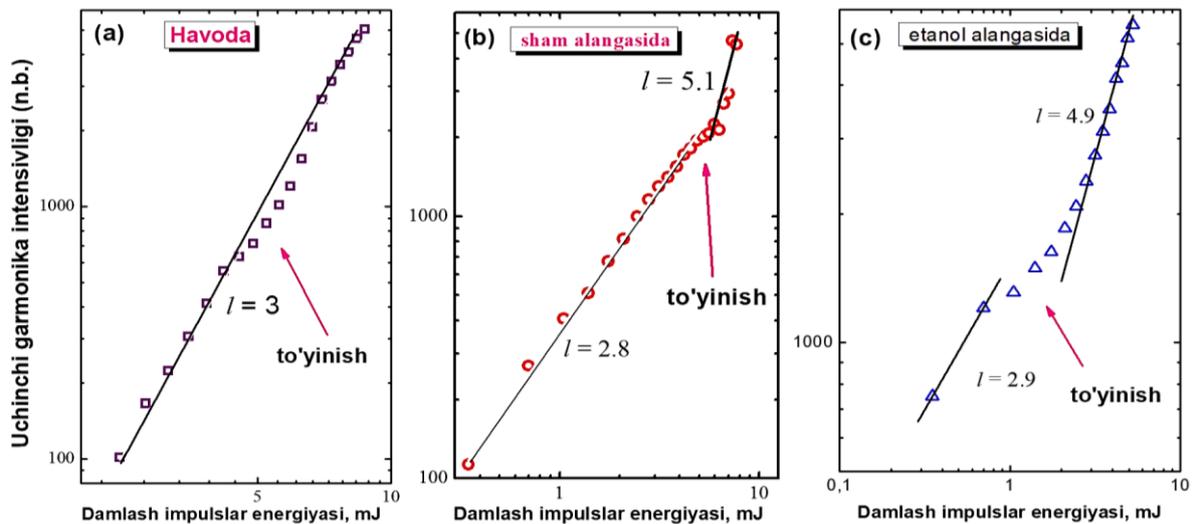
Dissertatsiya ishining **“Yonish alangalarida va lazer ablyatsiyasi yordamida sintez qilingan nanozarrachalarda quyi tartibli nochiziqlilik”** deb atalgan uchinchi bobida yonish alangalarida va lazer ablyatsiyasi yordamida hosil qilingan nanozarrachalarning quyi tartibli nochiziqlilik xususiyatlari o'rganildi. To'lqin uzunligi 1064 nm, vaqt davomiyligi 28 ps bo'lgan lazer nurlanishining ta'siri ostida sham va etanol alangalarida uchinchi garmonika generatsiyasi bo'yicha olingan tajribaviy natijalar tahlil qilindi. 1-rasmda havoda (1), sham (2) va etanol (3) alangalarida hosil bo'lgan uchinchi garmonika spektrlari keltirilgan.



**1-rasm. Havoda (1), sham alangasida (2) va etanol alangasida (3) uchinchi garmonika generatsiyasi spektrlari. Barcha holatlar 1064 nm bo'lgan lazer nurlanishining energiyasi 3,6 mJ da olindi. Eksperimental sxemasi: fokuslash linzalari (SL), filtr tizimi (FT), HR4000 tolali spektrometr.**

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, havoda hosil bo'lgan uchinchi garmonika samaradorligi ( $1,1 \times 10^{-5}$ ) bilan solishtirilganda, samaradorlik sham alangasida 12 marta ( $1,2 \times 10^{-4}$ ) va etanol alangasida 24 marta ( $2,4 \times 10^{-4}$ ) oshgan. Buning natijasida, havo komponentlarining alangada hosil qilinayotgan uchinchi garmonika samaradorligida hissasi past bo'lganligi sababli inobatga olinmadi. Alangada garmonika samaradorligini oshiruvchi asosiy omil sifatida

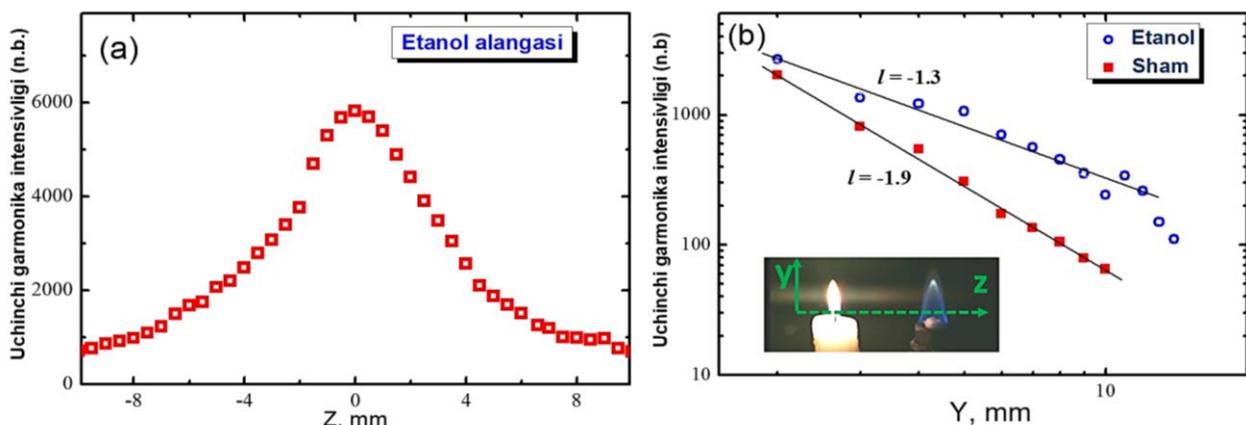
alanga ichida hosil bo'layotgan uglerod nanozarralari bilan baholandi. Shu bilan birgalikda, uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligining zondlash impulsi energiyasiga bog'liqligi jarayonning cheklovchi mexanizmlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. 2-rasmda havo, sham alangasi va etanol alangasidagi impulslarning turli energiyalarida uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligining bog'liqligi ko'rsatilgan.



2-rasm: a) havo, b) sham va c) etanol alangasida hosil bo'lgan uchinchi garmonika intensivligining damlash energiyasiga bog'liqligi.

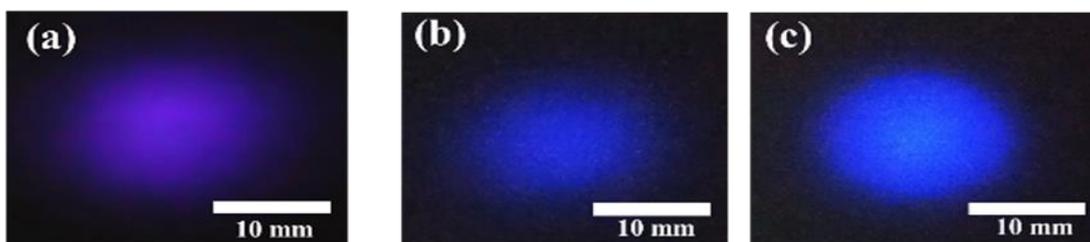
Tadqiqot natijalari uchala muhitda ham uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligining to'yinish holatini ko'rsatdi, bu esa zondlash impulslarining yuqori intensivligida erkin elektronlar konsentratsiyasining ortishi bilan izohlanadi. Sham va etanol alangasida lazer energiyasining oshishi bilan uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligining og'ishidagi o'zgarishlar esa nochiziqli Kerr effekti ta'sirida yuzaga keladigan faza siljishi bilan tushuntiriladi.

Linzaning fokus tekisligida namunalarning joylashuvi va alangada hosil bo'layotgan uglerod nanozarralari mavjudligini tahlil qilish uchun z va y o'qlari bo'ylab skanerlash usuli qo'llanildi. 3.a-rasm etanol va sham alangalarida uchinchi



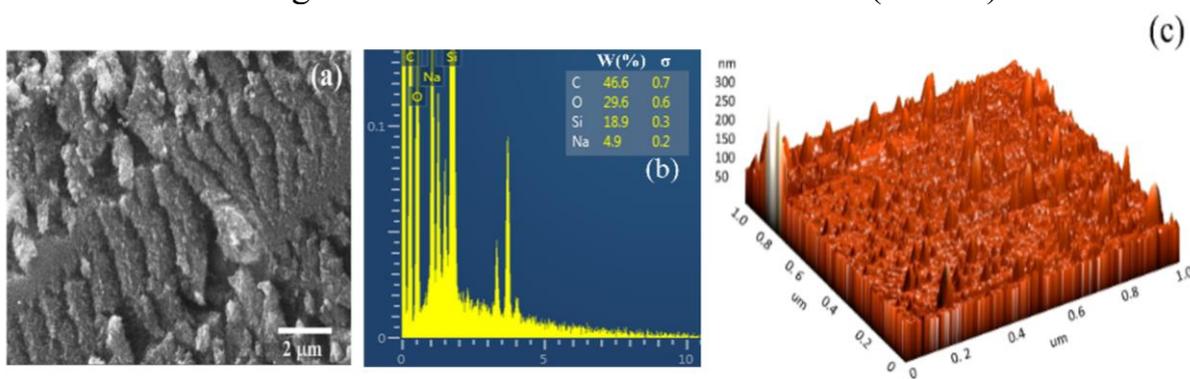
3-rasm. a) Linzalarning fokus tekisligiga nisbatan etanol alangasida uchinchi garmonika intensivligining o'zgarishi. b) Garmonika samaradorligining etanol va sham alangasi manbasida y masofaga bog'liqligi.

garmonika generatsiyasi samaradorligining lazer fokusining holatiga va alangadagi zarrachalar shakllanishiga bog‘liqligini ko‘rsatadi. Bu yerda z o‘qi lazer nurlanishining optik yo‘li bo‘lib (yonish alangasiga perpendikulyar yo‘nalishda), y o‘qi esa (3.b-rasm) pilikdan boshlab alangaga parallel yo‘nalishda tajribalar amalga oshirildi. Har ikkala o‘lchovda ham nanozarralarning konsentratsiyasi alanga markazida yuqori ekanligi aniqlandi. Ushbu natija, adabiyotlarda qayd etilganidek, uglerod tutuvchi alangada, ya’ni harorat eng yuqori bo‘lgan nuqtada nanozarralar shakllanishini tasdiqlaydi. Sham alangasida y o‘qi bo‘ylab monoton kamayishning etanol alangasiga nisbatan kattaroqligi, alangada haroratning pasayishi natijasida hosil bo‘lgan nanozarralarning bir-biri bilan birikib agregat holatiga o‘tishi va ularning konsentratsiyasining kamayishi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, yonish alangalarida bir xil sharoitda olingan uchinchi garmonikaning fazoviy taqsimotida o‘zgarishlar (4.b-rasm) sham alangasida yirik nanozarrachalar paydo bo‘lishini tasdiqlaydi. Bu holat alangada nanozarrachalar shakllanishi va o‘shining optik xususiyatlarga ta’sirini ko‘rsatadi.



4-rasm. Energiyasi 3,5 mJga teng bo‘lgan damlash impulslari yordamida (a) havoda, (b) sham va (c) etanol alangasida hosil bo‘lgan uchinchi garmonika generatsiyasining fazoviy taqsimoti.

Shu bilan birgalikda, nanozarralarning mavjudligini skanerlovchi elektron mikroskopi (SEM), dispersli rentgen spektroskopiyasi (EDS) va atom-kuch mikroskopi (AKM) orqali tekshirish maqsadida shisha plastinka alanga ustida 1-10 minut davomida alangadan 50 mm balanlikda tutib turildi (5-rasm).

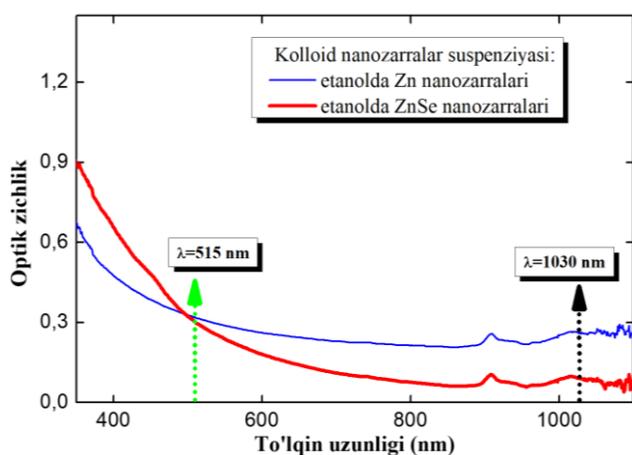


5-rasm. (a) uglerod tarkibli yupqa plyonkaning SEM tasviri va uning (b) tarkibiy EDS spektri, va (c) yupqa plyonkaning sirtiy AKM tasvirlari

Ushbu tajribada shisha sirtida hosil bo‘lgan qoplamalarning SEM, EDS va AKM tasvirlari nano va mikro tuzilmalar mavjudligini ko‘rsatdi. Ushbu natijalar yonish alangasida o‘tkazilgan tadqiqotlarni tasdiqlaydi, chunki alanganing markaziy qismida harorat yuqori bo‘lib, bu hududda nanozarrachalar hosil bo‘ladi.

Alanganing chekka qismlarida va balanligi bo'yicha esa harorat pasayishi natijasida ushbu nanozarrachalar yirik nanozarrachalarga birlashadi yoki agregatlar hosil qiladi. Ayniqsa, sham alangasida kuzatilgan SEM tasvirlari bu jarayonning yaqqol dalili sifatida xizmat qiladi (5.a-rasm). Uchinchi garmonika generatsiyasi bilan olib borilgan tajribalar ham alanga bilan olib borilgan tadqiqotlarni tasdiqlaydi. Uglarod nanozarrachalarini tashkil topgan alanga muhiti bilan yuqori tartibli garmonika generatsiyasini olish uchun albatta vakuum muhitini hosil qilish talab etiladi, ammo alanga bilan bunday shart-sharoitlarni yaratish imkoni yo'q. Shu sababli, yuqori tartibli noxiziqli jarayonlarda o'ziga xos xususiyatlari bilan ajralib turadigan metall va yarim o'tkazgich materiallaridan lazer ablyatsiyasi usuli bilan olingan nanozarrachalar bilan tadqiqotni davom ettirish zarur. Vaqt davomiyligi femtosekund bo'lgan lazer ablyatsiyasi yordamida suyuq faza (etanol, suv va hokazo) ichida nanozarrachalar sintezi samarali usullardan biri hisoblanadi. Ushbu ishda, lazer ablyatsiyasi jarayonida impuls davomiyligi 40 fs, markaziy to'lqin uzunligi 1030 nm, takrorlanish chastotasi 50 kHz ega bo'lgan lazer nurlanishi yordamida amalga oshirildi. Etanol suyuqligida joylashtirilgan, o'lchami  $3 \times 3 \text{ sm}^2$  bo'lgan Zn va ZnSe nishonlariga fokuslangan lazer nurlanishi nishon sirtida 50 mm/s tezlikda skanerlandi. Ablyatsiya jarayoni 5 minut davomida olib borildi. Bunda ablyatsiya jarayonida lazer impulslarining o'rtacha quvvati 5 W bo'lib, etanol ichidagi nishon sirtiga fokuslangan nurlanishning energiya zichligi esa  $13 \text{ J/sm}^2$  ni tashkil etdi. Yuqori intensivlikdagi lazer impulslari nishon sirtida plazma ablyatsiyaga olib keladi va bu issiq plazma buluti suyuqlik ichida sovib, turli shakl va o'lchamlardagi nanozarrachalar shaklida parchalanadi. Bu jarayonda nishon ustidagi taxminan 5 mm qalinlikdagi suyuqlik qatlami plazmaning tarqalishini nazorat qiladi, natijada nanozarrachalar etanol hajmida sochilib, kolloid suspenziya hosil bo'ladi.

6-rasmda Zn va ZnSe nanozarrachalaridan iborat kolloid suspenziyalarining optik zichligi tasvirlari aks ettirilgan. Kolloid suspenziyalarda yirik nanozarrachalar mavjudligi sababli yutilish spektrlarida sirt plazmon rezonansi maksimumlari aniqlanmadi. Biroq, har ikkala suspenziyaning yutilish spektrida 900 nm atrofida maksimum kuzatildi. Bu ehtimol etanolning ablyatsiya jarayonida oz miqdorda



6-rasm. Zn va ZnSe nanozarrachalarining yutilish spektrlari.

ifloslanishi bilan bog'liq bo'lib, Z-skannerlash metodida qo'llanilgan lazer impulslarining to'lqin uzunliklari (1030 nm va 515 nm) ushbu maksimumdan uzoq bo'lganligi sababli, bu maksimum nanozarrachalar suspenziyalarining noxiziqli optik parametrlariga ta'sir ko'rsatmaydi. Shuningdek, sintez qilingan Zn va ZnSe nanozarrachalarining o'lchamlari va morfologiyasi mikroskopik usullar – SEM va AFM

yordamida o'rganildi. SEM tasvirlari Zn nanozarrachalarining o'rtacha diametri taxminan 100 nm atrofida ekanligini, ZnSe nanozarrachalarining esa o'rtacha diametri 200 nm ga yetishini ko'rsatdi. Bundan tashqari, zarrachalar shakli asosan sferik va ellipsoid bo'lib, ba'zi hollarda ular o'zaro agregatsiyalanib yirik aglomeratlar hosil qilishi kuzatildi. O'lcham va shakllarning bunday farqi lazer impulsi parametrlari (intensivlik, impuls davomiyligi) hamda materialning fizik xossalariga (erish harorati, issiqlik o'tkazuvchanligi) bevosita bog'liq.

Zn va ZnSe nanozarrachalarning kolloid suspenziyalari 1 mm qalinlikdagi kvarts idishga joylashtirildi va Z-skanerlash texnikasi yordamida ularning quyi tartibli nochiziqli optik xususiyatlari tadqiq etildi. Tajribalar asosiy lazer impulsi (1030 nm) va uning ikkinchi garmonikasidan (515 nm) foydalangan holda amalga oshirildi. Z-skanerlash jarayonida suspenziyalik kvarts idishlar z o'qi bo'ylab harakatlantirilib, fokus nuqtasi atrofida lazer nurlanishining intensivligi o'zgarishi bilan bog'liq holda nanozarrachalar bilan o'zaro ta'siri tahlil qilindi va ularning nochiziqli optik parametrlari aniqlandi. 1-jadvalda Z-skanerlash natijasida aniqlangan nochiziqli sindirish ko'rsatkichi ( $\gamma$ ) va ikki fotonli yutilish koeffitsienti ( $\beta$ ) kabi nochiziqli optik parametrlar keltirilgan. Mazkur natijalar 50 kHz chastotali yuqori takrorlanish tezligiga ega lazer nurlanishi ta'sirida manfiy nochiziqli sindirish ko'rsatkichi ( $\gamma < 0$ ) aniqlandi.

### 1-jadval.

**Etanolda ablyatsiya qilingan Zn va ZnSe nanozarralari suspenziyalarida nochiziqli sindirish ko'rsatkichlari va ikki fotonli yutilish koeffitsientlari.**

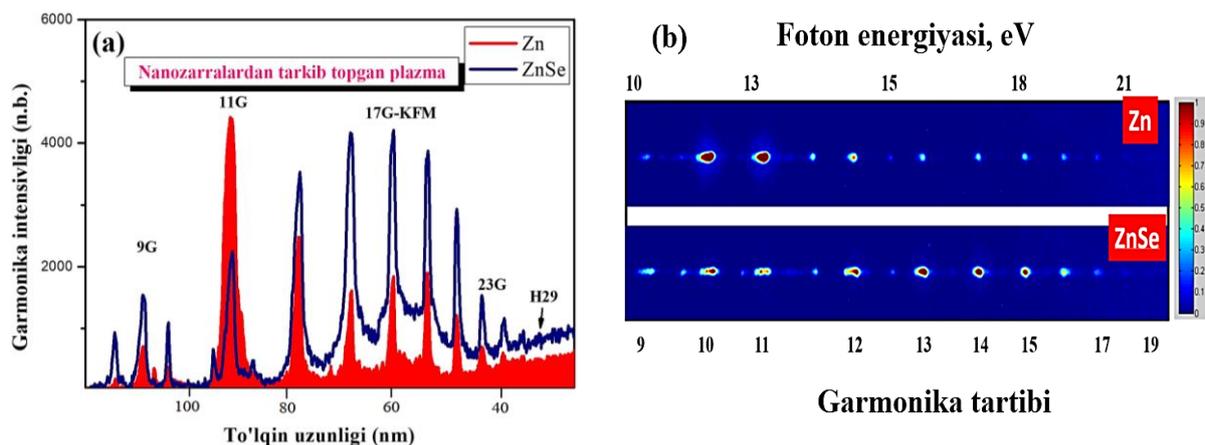
Namuna	$\lambda=1030$ nm		$\lambda=515$ nm	
	$\gamma$ ( $sm^2 \cdot W^{-1}$ )	$\beta$ ( $sm \cdot W^{-1}$ )	$\gamma$ ( $sm^2 \cdot W^{-1}$ )	$\beta$ ( $sm \cdot W^{-1}$ )
Zn nanozarralari	$-1,4 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$-1,7 \times 10^{-14}$	$1,0 \times 10^{-11}$
ZnSe Nanozarralari	$-4,9 \times 10^{-14}$	$0,5 \times 10^{-11}$	$-2,4 \times 10^{-14}$	$2,1 \times 10^{-11}$

Ushbu effekt faqatgina sindirish ko'rsatkichining intensivlikka bog'liq o'zgarishi bo'lmasdan, balki issiqlik ta'sirida termo-optik effektlarning kuchayishi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, Zn nanozarrachalarining nochiziqli sindirish ko'rsatkichi to'liq uzunligi 1030 nm lazer nurlanishida ZnSe nanozarrachalarining sindirish ko'rsatkichiga nisbatan taxminan 2,5 baravar farq qildi. Shuningdek, Zn nanozarrachalari uchun ikki fotonli yutilish koeffitsienti ZnSe nanozarrachalariga nisbatan 5 baravar katta ekanligi aniqlandi. Ushbu farqlar asosan Zn nanozarrachalarining kichikroq o'lchamlari bilan izohlanadi, chunki kichik o'lchamli zarrachalar kattaroq o'lchamli zarrachalarga nisbatan yuqoriroq nochiziqli optik parametrlarni namoyish etadi. Ikkinchi garmonika (515 nm) bilan olib borilgan Z-skanerlash natijalarida Zn va ZnSe nanozarrachalarining nochiziqli sindirish ko'rsatkichlarining qiymati deyarli farq qilmasligini, biroq ZnSe nanozarrachalarining ikki fotonli yutilish koeffitsienti Zn nanozarrachalariga nisbatan 2 baravar kattaroq ekanligi kuzatildi. Aniqlangan Zn va ZnSe nanozarrachalarining manfiy nochiziqli sindirish ko'rsatkichlari ushbu nanozarrachalar asosida shakllangan plazmada dispersiya sharoitlarini o'zgartirib, fazaviy moslashishni optimallashtirishi mumkin.

Dissertatsiya ishining “**Nanozarralar va modulyatsiyalangan plazmada yuqori tartibli garmonikalarni hosil qilish va optimallashtirish**” deb atalgan to‘rtinchi bobida bitta (1030 nm) va ikkita zondlash (1030 nm + 515 nm) nurlanishlar kombinatsiyasi yordamida Zn va ZnSe nanozarrachalari asosida shakllangan plazmada yuqori tartibli garmonikalarning hosil bo‘lish jarayoni hamda ularning tahlili keltirildi. Bundan tashqari, turli materiallar sirtida lazer ablyatsiyasi orqali shakllangan plazma alangasining bo‘laklari orasidagi masofa va ularning o‘lchamlarini o‘zgartirishga imkon beradigan texnikalar namoyish etildi.

Zn va ZnSe nanozarrachalarining suspenziyasi yuqori tozalikdagi taglikka tomchi usulida qoplandi va 60°C haroratda ehtiyotkorlik bilan quritildi. Ushbu usul nanozarrachalarning sirt bo‘ylab bir tekis taqsimlanishini ta’minladi. Jarayon bir necha marta takrorlangandan so‘ng, 0,2 – 0,8 mm qalinlikdagi qatlam hosil qilindi. Tayyorlangan taglik yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasini o‘rganish maqsadida  $3 \times 10^{-6}$  mbar bosimli vakuum kamerasiga joylashtirildi. Bu tagliklar sirtida plazma hosil qilish maqsadida vaqt davomiyligi 235 fs, to‘lqin uzunligi 1030 nm bo‘lgan qizdiruvchi lazer nurlanishidan foydalanildi. Ushbu lazer nurlanishi 200 mm fokusli linza orqali nishon sirtida  $10^{10} - 10^{11}$  W/sm<sup>2</sup> intensivlik diapazonda fokuslandi. Zondlash impulslari hosil bo‘lgan plazmaga nishon manbasi tekisligiga parallel ravishda yo‘naltirildi va ularning maksimal intensivligi  $I \approx (1 - 3) \times 10^{14}$  W/sm<sup>2</sup> oralig‘ida tanlandi. Bunday tanlangan qizdiruvchi va zondlash impulslarining intensivliklari kuchsiz ionlangan, nanozarrachalar konsentratsiyasi ko‘proq bo‘lgan optimal plazma hosil qilishni ta’minlaydi.

7.a-rasmda to‘lqin uzunligi 1030 nm bo‘lgan zondlash nurlanishining Zn va ZnSe nanozarrachalaridan shakllangan plazmalar bilan o‘zaro ta’sirida hosil bo‘lgan yuqori tartibli garmonika spektrlari keltirilgan. Har ikkala plazma muhitida olingan spektrlardagi 17G-KFM belgisi kvazi-fazaviy moslashish sharoitida maksimal kuchaygan 17-garmonika intensivligini ifodalaydi.



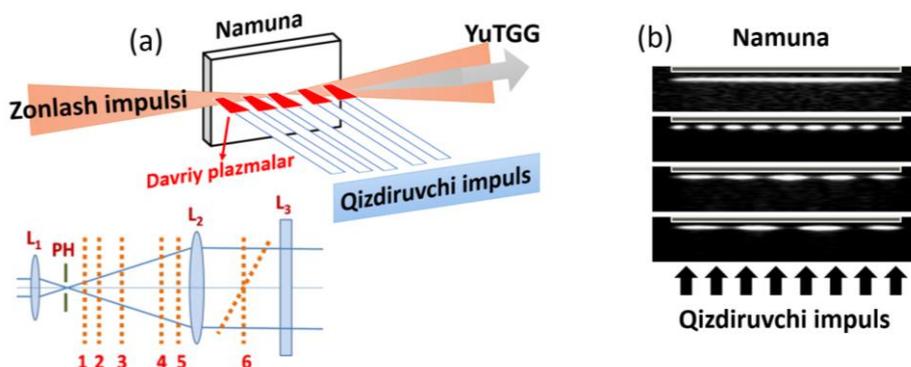
7-rasm: a) asosiy lazer nurlanishida ( $\lambda = 1030$  nm) Zn (qizil to‘la chiziq) va ZnSe nanozarralaridan (ko‘k chiziq) shakllangan lazer plazmalarida hosil bo‘lgan yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi spektrlari; b) asosiy lazer nurlanishi va uning ikkinchi garmonikasi (1030 nm + 515 nm) kombinatsiyasi yordamida Zn (yuqori tasvir) va ZnSe (pastki tasvir) nanozarralaridan shakllangan plazmalarda hosil qilingan garmonikalar generatsiyasining ishlov berilmagan tasviri.

Zn va ZnSe nanozarrachalardan tashkil topgan plazmalardagi ushbu garmonikalar intensivligining nisbati 2,2 ga teng bo‘lib, bu natija Z-skanerlash usuli yordamida aniqlangan manfiy nochizikli sindirish ko‘rsatkichlari nisbati (2,5) bilan deyarli mos keladi. Ushbu o‘xshashlik, manfiy nochizikli sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi natijasida yuzaga kelgan defokuslanish jarayonlari orqali yuqori tartibli garmonika generatsiyasi jarayonidagi dispersiya sharoitlarini o‘zgartirib, fazaviy moslashish optimallashtirishga xizmat qilishini ko‘rsatadi. Shuningdek, rasmda Zn nanozarralarining lazer ablyatsiyasi natijasida hosil bo‘lgan plazma muhitida 11-garmonika rezonans kuchayishi kuzatildi. Ushbu rezonans mexanizmi Zn atomlarining ionlanishi natijasida shakllangan  $Zn^+$  yoki  $Zn^{2+}$  ionlarining elektron o‘tishlari bilan bog‘liq. Biroq, ZnSe nanozarralarida bunday rezonans kuchayishi kuzatilmagan. Buning sababi ZnSe nanokristall tuzilishga ega bo‘lib, unda Zn va Se atomlari kimyoviy bog‘lanish orqali mustahkam kristall panjara hosil qiladi. Natijada Zn atomining individual energiya darajalari o‘zgarib, u  $Zn^+$  ionlarida kuzatiladigan rezonans o‘tishlarni hosil qila olmaydi.

7.b-rasmda plazma muhitida to‘lqin uzunliklari mos ravishda 1030 nm va 515 nm bo‘lgan zondlovchi lazer impulslarining kombinatsiyasi asosida hosil bo‘lgan yuqori tartibli garmonikalarning dastlabki ishlov berilmagan tasvirlari keltirilgan. Ushbu spektrlarda qo‘llanilgan ikki to‘lqin uzunlikli (1030+515 nm) sxemada zondlovchi nurlarning vaqt bo‘yicha sinxronizatsiyasi muhim ahamiyat kasb etadi. Tajribada qalinligi 0,1 mm bo‘lgan BBO kristali orqali ikkilamchi garmonika (515 nm) generatsiyasi amalga oshirilgan. Guruh tezligi dispersiyasi natijasida asosiy (1030 nm) va ikkinchi garmonika (515 nm) impulslar orasida 12 femtosekund vaqt kechikishi yuzaga kelgan. Mazkur kechikish ikkala impulsning plazma bilan bir vaqtda o‘zaro ta’sirlanishini buzib, natijada toq ( $2n+1$ ) va juft ( $2n$ ) tartibli garmonikalar hosil bo‘lishiga olib keladi. Bunday holat spektral simmetriyaning buzilishi bilan xarakterlanib, noan’anaviy spektral taqsimotga sabab bo‘ladi. Ayniqsa, ikkita impulsning vaqt bo‘yicha moslashuvining yo‘qligi tufayli energiyaning garmonika tartiblari bo‘yicha notekis taqsimlanishi yuz beradi. Biroq, ikki to‘lqinli zondlashda 515 nm da Zn va ZnSe nanozarrachalarining manfiy nochizikli sindirish ko‘rsatkichlari kichik bo‘lganligi sababli, ushbu sharoitda kvazi-fazaviy moslashuv yuzaga kelmadi. Bu esa fazaviy moslashuv shartlarining buzilishiga olib kelib, yuqori tartibli juft sonli garmonikalar (masalan, H16, H20) intensivligining keskin pasayishiga sabab bo‘ldi. Aksincha, toq sonli garmonikalar (masalan, H9, H13, H17) yuqori intensivlikda generatsiyalangan bo‘lib, bu holat ikki to‘lqinli nurlanishning nochizikli muhit bilan to‘liq vaqt bo‘yicha sinxronlashmagan holda o‘zaro ta’sirlashuvi bilan izohlanadi. Shuningdek, impulslar orasidagi vaqt va fazaviy moslashuvlar buzilishi natijasida  $2(2n+1)$  tartibli garmonikalar  $4(n+1)$  tartiblilarga nisbatan yuqori intensivlikni namoyon qildi.

Yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining samaradorligini oshirishda asosiy to‘siqlardan biri bu – nurlanishning garmonika tartibiga o‘tish jarayonida yuzaga keladigan fazaviy moslashuvning buzilishi hisoblanadi. Aynan shuning uchun ham kvazi-fazaviy moslashuv konsepsiyasi garmonika samaradorligini oshirishda muhim usullardan biri sifatida qaralmoqda. Ushbu usulning mazmuni –

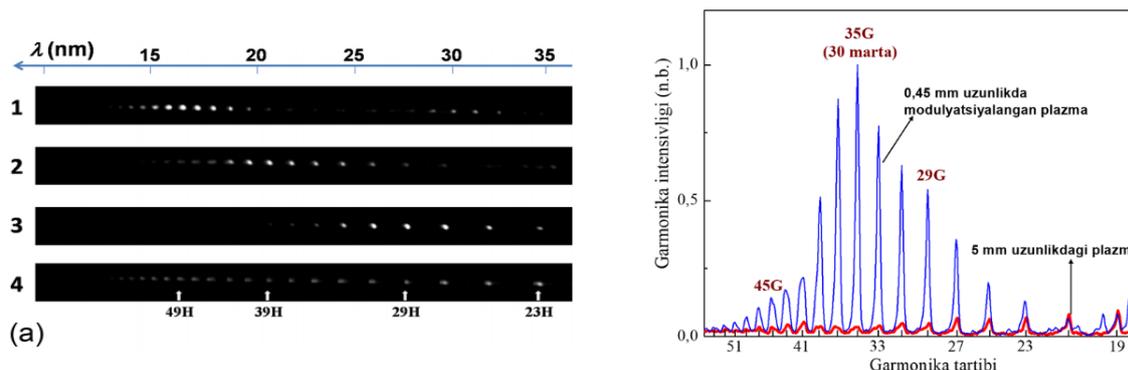
lazer nurlanishi va hosil bo'layotgan garmonikalar orasida fazaviy farqni kompensatsiyalovchi muhitni shakllantirishdan iborat. Kvazi-fazaviy moslashtirish shartlarini lazer nurlanishi ta'sirida nishon sirtida hosil bo'ladigan plazmalarda amalga oshirish ham mumkin. Buning uchun plazma fazoviy jihatdan davriy modulyatsiyalangan bo'lishi kerak. Bunday modifikatsiyalangan plazma muhitida zarrachalar konsentratsiyasi nazorat qilinib, zondlovchi lazer nurlanishi va hosil bo'layotgan garmonikalar orasida fazaviy moslashish shartlari ta'minlanadi. Shu sababli, avvalgi tajribalarda Mn va Ag nishon materiallari garmonikalar generatsiyasida o'ziga xos xususiyatlarni namoyon qilganligi uchun sirt plazmasini davriy ravishda hosil qilish tajribalarida qo'llash uchun tanlangan. 8.a-rasmda qizdiruvchi impulsni nishon sirtiga fokuslovchi silindrik linza va teleskop orasiga, hamda teleskop ichiga joylashtirilgan ko'p tirqishli niqob yordamida davriy sirt plazmasini hosil qilish usuli tasvirlangan. Natijada plazma bo'laklari hosil bo'lib, uzunligi 5 mm bo'lgan nishon namunasida o'lchamlari 0,1 mm dan 0,8 mm gacha o'zgaruvchi modulyatsiyalangan plazma shakllari hosil qilindi (8.b-rasm). Hosil bo'lgan davriy plazmalarga ortogonal yo'nalishda zondlash impulsini fokuslandi. Bu impuls 400 mm fokus masofaga ega sferik linza orqali yo'naltirilib, namuna sirtidan taxminan 200  $\mu\text{m}$  balandlikda joylashtirildi. Zondlash impulsini intensivligi taxminan  $3 \cdot 10^{14} \text{ W}/\text{sm}^2$  sifatida tanlangan. Ushbu balandlik va intensivlik qiymati plazmaning ionizatsiya darajasi hamda zarrachalar zichligini fazaviy moslashuv uchun optimal sharoitni ta'minlab, erkin elektron dispersiyasining garmonikalar samaradorligiga salbiy ta'sirini kamaytiradi.



**8-rasm. a) Kumush nishonida ko'p tirqishli niqob orqali davriy plazma bo'laklarini hosil qilish va b) uning shakllanishi.**

9.a-rasmda yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining dastlabki, ishlov berilmagan spektral taqsimoti tasvirlangan. Rasmning 4-tasvirida uzunligi 5 mm bo'lgan kengaygan plazmada olingan garmonikalarning spektral taqsimoti aks ettirilgan bo'lib, eng yuqori tartibli garmonika 51-tartib bilan chegaralangan. Rasmning qolgan tasvirlarida ko'p tirqishli niqob yordamida hosil qilingan davriy plazmalar uchun garmonikalar spektri ko'rsatilgan. 9.a-rasmning 3-tasvirida har biri 0,5 mm uzunlikdagi to'rtta davriy plazma bo'lagida 29-tartibli garmonikalar intensivligi oshganligi kuzatildi. 2-tasvirda esa oltita 0,38 mm uzunlikdagi davriy plazmalar natijasida 39-tartibli garmonikalar intensivligi oshgani aniqlandi. 1-tasvirda sakkizta 0,3 mm uzunlikdagi plazma bo'laklarida 49-tartibli garmonikalar

intensivligi kuchaygani qayd etildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, plazmaning modifikatsiyalanishi garmonikalar spektrining kengayishiga va ayrim tartiblarning intensivligi oshishiga olib keladi. Bu esa plazmadagi zarrachalar zichligining optimal taqsimlanishi va kvazi-fazaviy moslashuv shartlarining yaxshilanishi bilan izohlanadi. Shuningdek, maksimal kuchaytirilgan garmonikalar tartibi  $q_{kog}$  va bitta plazma bo'lagining uzunligi  $L_{kog}$  elektron zichligi  $N_e$  bilan  $L_{kog} \times q_{kog} = 1.4 \times 10^{18}/N_e$  munobat bilan harakterlanadi. Agar elektron zichligi doimiy bo'lsa, plazma bo'lagining uzunligi va maksimal kuchaytirilgan garmonikalar tartibi o'zaro teskari bog'liq bo'lib, ularning ko'paytmasi doimiy qiymatga ega bo'ladi.



**9-rasm: a) ko'p tirqishli niqob yordamida hosil qilingan kumush plazmasining modifikatsiyalangan bo'laklaridan hosil qilingan garmonika spektrlarining dastlabki ishlov berilmagan tasvirlari keltirilgan. Bunda 0,3 mm uzunlikdagi sakkizta plazma bo'lagida (1-tasvir), 0,38 mm uzunlikdagi oltita plazma bo'lagida (2-tasvir), 0,5 mm uzunlikdagi to'rtta plazma bo'lagida (3-tasvir) va 5 mm uzunlikdagi kengaytirilgan bitta plazmada (4-tasvir) hosil qilingan yuqori tartibli garmonika spektrlari ko'rsatilgan; b) 5 mm uzunlikdagi plazma va 0,38 mm uzunlikdagi oltita plazma bo'laklari holatida bir xil sharoitda o'lichangan garmonikalarning spektr taqsimoti tasvirlangan.**

Bu bog'liqlik yuqori tartibli garmonikalar samaradorligini oshirish uchun plazma tuzilishini nazorat qilish imkoniyatini beradi. Shunga o'xshash experiment natijalari Mn nishon sirt plazmasi holatida ham kuzatilgan. Bundan tashqari, isitish va zondlovchi impulslari orasidagi kechikish vaqti 35–45 ns oralig'ida optimal bo'lib, plazma bo'laklarida garmonikalar generatsiyasini samarali ravishda optimallashtirgan. Plazmaning hosil bo'lishining dastlabki bosqichlarida zarrachalar (atom va bir karrali ionlar) konsentratsiyasi garmonikalar generatsiyasi uchun yetarli emas. Zarrachalar tezligi taxminan  $10^4$  m/s bo'lganda, zondlovchi nurlanishning optik o'qiga, ya'ni, nishon sirtidan 200  $\mu\text{m}$  balandlikka yetib kelishi uchun ma'lum vaqt talab etiladi. Shuningdek, 70 ns va undan ortiq kechikishlarda garmonikalar generatsiyasining samaradorligi asta-sekin pasaya boshladi, chunki bu vaqtda plazma zichligi kamayib, ionizatsiya darajasi oshadi.

Asosiy impulslarni yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasiga aylantirish samaradorligini baholash murakkab vazifa bo'lib, bu jarayon bir qator omillar bilan bog'liq. Xususan, detektorni kalibrashda difraksion panjaraning spektral xususiyatlari, ekstremal ultrabinafsha spektrometrining funksional xususiyatlari, mikrokanal plastinka va CCD kamerada qayd etilgan signalni har bir garmonikaga mos keladigan fotonlar soniga aylantirish kabi omillar muhim rol o'ynaydi. Shu

sababli, har bir eksperiment uchun to'liq kalibrlashni amalga oshirish qiyin bo'lib, odatda ilgari o'tkazilgan shunga o'xshash eksperimentlarning almashtirish samaradorligini baholovchi ma'lumotlariga tayaniladi. Ushbu ma'lumotlar asosida qilingan hisob-kitoblarga ko'ra, mazkur ishda aniqlangan garmonikalar samaradorligi  $10^{-5}$  ga teng deb baholandi.

## XULOSA

Xulosa qilib aytganda, ushbu dissertatsiya ishida uglerod, rux, rux selenid, kumush va marganets kabi elementlarni o'z ichiga olgan nishon manbalarida uchinchi tartibli garmonika va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi samaradorligini oshirish imkoniyatlari o'rganildi. Shuningdek, yuqori garmonika generatsiyasida plazma bo'laklarining o'lchamlari va joylashuvini o'zgartirishning muhim ahamiyati ko'rsatildi. Ushbu yondashuv garmonika samaradorligini oshirishda yangi imkoniyatlarni taqdim etdi va plazma bo'laklarining geometrik xususiyatlarini optimallashtirish orqali yuqori darajadagi kogerent nurlanishni hosil qilish imkonini berdi.

1. Impuls davomiyligi 28 ps bo'lgan infraqizil lazer ( $\lambda_w=1064$  nm) nurlanishining uglerod tarkibli gaz holatidagi muhitlarda uchinchi tartibli garmonika ( $\lambda_{3w}= 354,67$  nm) generatsiyasi o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, normal havo sharoitida generatsiyalangan uchinchi garmonikaga nisbatan etanol alangasida 24 baravar yuqori samaradorlikka erishildi. Ushbu yuqori samaradorlik hodisasi uglerod tarkibli gazlarda nanoo'lchamli zarrachalarning mavjudligi va ularda yuz beruvchi nochiziqli optik jarayonlarning kuchayishi bilan izohlandi.

2. Sham alangasida uchinchi garmonikani generatsiyasining tahlili davomida shisha tagliklarga yotqizilgan uglerod tarkibli mikrotuzilmalar  $155^\circ$  suv tomchisi kontakt burchagi bilan supergidrofobik xususiyatlarni namoyon qildi. Bu natija gidrofobik qoplamalar yaratish va amaliy qo'llash uchun keng imkoniyatlarni ochadi.

3. Lazer ablyatsiyasi orqali sintez qilingan Zn va ZnSe nanozarralarning nochiziqli optik xususiyatlari tizimli ravishda ilk bor tadqiq etildi. 1030 nm da Zn nanozarralari uchun nochiziqli sindirish  $\gamma$  va nochiziqli yutilish  $\beta$  koeffitsientlari mos ravishda  $-1.4 \times 10^{-13}$  sm<sup>2</sup>/W va  $2,7 \times 10^{-11}$  sm/W ni tashkil etgan bo'lsa, ZnSe nanozarralari uchun  $\gamma=-4,9 \times 10^{-14}$  sm<sup>2</sup>/W va  $\beta = 0,5 \times 10^{-11}$  sm/W ekanligi aniqlangan. Aniqlangan nochiziqli sindirish ko'rsatkichlari, yuqori tartibli garmonika generatsiyasi jarayonida fazaviy moslashuv sharoitlarini optimallashtirish hamda lazer-nanozarra o'zaro ta'sirini chuqurroq tushunish uchun muhim ahamiyatga ega.

4. Z-skannerlash usuli yordamida o'lchangan Zn va ZnSe nanozarrachalarning nochiziqli optik xossalari, mazkur nanozarrachalardan tashkil topgan plazma muhitlarida yuqori tartibli garmonikalarining yuqori samaradorlikka erishishda muhim ahamiyat kasb etishi tajribada va nazariy hisoblashlarda ko'rsatildi. Masalan, tarkibida ZnSe nanozarralari bo'lgan lazer plazmasining manfiy nochiziqli refraksiya effektiga ega ekanligi to'lqin uzunliklari 40 – 80 nm garmonikalar

samaradorligini oshirishga ijobiy ta'siri qayd etildi. Uch-qadamli modeliga asosan, Zn nanozarralaridan tashkil topgan plazmada garmonikalar maxsimal tartibi 33-garmonika va ZnSe nanozarralaridan tarkib topgan plazmada esa uning qiymati 27-garmonikaga teng ekanligi aniqlandi.

5. Asosiy lazer nurlanishi ( $\lambda_w=1030$  nm) va uning ikkinchi garmonikasidan ( $\lambda_w+\lambda_{2w}= 1030+515$  nm) foydalanib, Zn va ZnSe nanozarralarini o'z ichiga olgan plazmalarda yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi jarayoni o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, fundamental lazer nurlanishi va uning ikkinchi garmonikasining Zn atomlari bilan o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'lgan 9- va 10-tartibli garmonikalar intensivligi sezilarli darajada oshdi. Ushbu intensivlikning ortishi Zn nanozarrachalarda rezonans ta'sirlashuvning mavjudligi bilan izohlandi.

6. Mn va Ag metall nishonlari sirtlarida qizdiruvchi lazer nurlanishi yordamida davriy plazmalarni hosil qilish, ularning o'lchamlarini va bir-biriga nisbatan masofalarini boshqarish imkonini beruvchi usul ishlab chiqildi. Ushbu usulda ko'p tirqishli niqobning Galiley teleskopi va fokuslovchi linzalarga nisbatan joylashuvini o'zgartirish orqali turli materiallar yuzasida davriy plazmalarni hosil qilish va ularning geometrik parametrlarini boshqarish imkoniyati namoyish etildi. Rivojlantirilgan usul lazer plazma bo'laklarining o'lchamlarini 0,1–1 mm diapazonida boshqarishga imkon yaratdi.

7. Davriy plazmalarda generatsiyalanuvchi yuqori tartibli garmonikalar intensivligidagi o'zgarishlarni tahlil qilish orqali lazer plazmasining tarkibini, xususan, erkin elektronlar zichligini aniqlash usuli taklif etildi. Shuningdek, davriy (0,45 mm) va davriy bo'lmagan plazmalarda kvazi-fazoviy moslashishni optimallashtirish natijasida 35-garmonika intensivligining 30 barobar oshishi kuzatildi. Ushbu usul yordamida davriy o'zgaruvchi muhitlarda kvazi-fazoviy moslashish jarayonini optimallashtirish orqali generatsiyalangan yuqori tartibli garmonikalar intensivligini sezilarli darajada oshirish imkoniyati ko'rsatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ УРГЕНЧСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

---

**ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**РЕЙИМБАЕВ ШЕРЗОД БОЗОРБОЕВИЧ**

**НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НИЗШЕГО ПОРЯДКА И ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСШИХ  
ГАРМОНИК В НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ**

**01.04.11- Лазерная физика**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

**Ургенч – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2024.3.PhD/FM1162.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.urdu.uz](http://www.urdu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** Болтаев Ганжабой Сапаевич  
доктор физико-математических наук

**Официальные оппоненты:** Юсупов Жавдат Бакиджанович  
доктор физика-математических наук, профессор

Матназаров Анвар Рустамович  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** Национальный Университет Узбекистана

Защита диссертации состоится «24» июня 2025 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 при Ургенчском государственном университете. (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х. Алимджана, дом 14. Тел.: (99862)224-66-11, факс: (99862) 224-67-00).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ургенчского государственного университета (зарегистрирована за №2024). (Адрес: 220100, г. Ургенч, ул. Х.Алимджана, дом 14. Тел.: (99862) 224-66-11, факс: (99862) 224-67-00).

Автореферат диссертации разослан «13» июня 2025 года.  
(Реестр протокола рассылки 8 от «13» 06 2025 года).



**У.О. Кутлиев,**  
Председатель научного совета по  
присуждению ученых степеней, доктор  
физико-математических наук, профессор

**К.Р. Якубов,**  
Ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученой степени, кандидат  
физико-математических наук, доцент

**У.К. Сапаев**  
Председатель научного семинара при  
Научном совете по присуждению ученой  
степени, доктор физико-математических  
наук, доцент

## **ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации на соискание степени доктора философских наук (PhD)).**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В научных исследованиях, проводимых в мире в области оптоэлектроники, биофотоники и квантовой оптики, а также при разработке лазерных устройств и синтезе наноструктур, нелинейные оптические эффекты занимают одно из ведущих мест. В мировом масштабе результаты научных исследований, направленных на изучение нелинейных оптических свойств наноструктур на основе квантово-размерных эффектов, требуют внедрения в практику для создания новых оптических материалов и передовых технологических устройств. С этой точки зрения, уникальные свойства наноструктур имеют важное значение для повышения эффективности создаваемых устройств.

В мире научные исследования, направленные на изучение нелинейных оптических свойств наноматериалов, ориентированы на создание новых типов когерентных источников света с высокой фотонной энергией и разработку на их основе компактных микрофотографических установок. В этом направлении особое внимание уделяется достижению высокой эффективности генерации когерентных источников за счёт управления квантово-размерными оптическими свойствами наночастиц, что способствует созданию высокоточных систем визуализации, а также развитию инновационных решений в таких областях, как биотехнологии и квантовые вычисления.

В нашей Республике внедрение инновационных технологий в экономику, повышение энергоэффективности и снижение расхода ресурсов определены в качестве важных стратегических направлений, в рамках которых реализуются масштабные меры и достигаются определённые результаты. В Стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022–2026 годы, в частности, обозначены задачи по «...стимулированию спроса на инновации за счёт обеспечения комплексной системы создания новых видов продукции и инновационных технологий — от идеи до конечного потребителя»<sup>1</sup>. В выполнении этих задач особое значение приобретает получение значимых научных результатов и развитие новых методов, в том числе путём изучения процессов низкоуровневой нелинейности и генерации высоких гармоник в наноразмерных средах.

Указ Президента Республики Узбекистан № PF-60 от 28 февраля 2022 года, а также постановления Кабинета Министров № PQ-5011 от 2 марта 2021 года и № PQ-5032 от 19 марта 2021 года определяют приоритетные задачи по развитию электротехнической промышленности, повышению конкурентоспособности отечественной продукции, улучшению качества образования в области физики и развитию научных исследований. Кроме того, настоящее диссертационное исследование в определённой степени способствует реализации задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № PF-6097 от 29 октября 2020 года «О утверждении

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 6 июля 2022 года № ПФ-165

концепции развития науки до до 2030 года»<sup>2</sup>, Указом Президента Республики Узбекистан № PF-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»<sup>3</sup>, а также другими нормативно-правовыми актами, относящимися к данной сфере деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Данное исследование было выполнено по II приоритетному направлению развития науки и технологий Республики Узбекистан — в областях «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время решён ряд актуальных проблем в направлении данного диссертационного исследования, в том числе китайскими учеными (Hong-Wei Zang, He-Long Li, Yue Su, Yao Fu, Meng-Yao Hou, Andrius Baltuska, Kaoru Yamanouchi и Huailiang Xu), мексиканскими учеными (P. Zaca-Moran, R. Ramos-Garcia, J. G. Ortega-Mendoza, F. Chavez, G. F. Perez-Sanchez и C. Felipe), узбекскими и японскими учеными (R. A. Ganeev, M. Baba, M. Suzuki, S. Yoneya и H. Kuroda), индийскими учеными (H. Singhal, V. Arora, B. S. Rao, P. A. Naik, U. Chakravarty, R. A. Khan и P. D. Gupta), а также учеными Узбекистана (G.S. Boltayev и др.).

Однако низко- и высокопорядковые нелинейные оптические свойства наночастиц цинка (Zn) и селенида цинка (ZnSe), полученных методом лазерной абляции, систематически не изучены. Кроме того, эффективность гармоник в диапазоне длин волн 8–40 нм, сгенерированных в лазерной плазме, сформированной на поверхностях различных сред, оказалась низкой из-за нарушения условий фазового согласования.

Таким образом, учитывая актуальность проблемы и ее недостаточную изученность, автор выбрал направление исследования низко- и высокопорядковых нелинейных процессов в средах с углеродсодержащими пламенами горения и средах в плазменном состоянии.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены в рамках государственных научно-технических программ: F2-FA-F160 «Изучение оптического параметрического усиления chirпированных лазерных импульсов и нелинейного взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом» (2012–2016), OT-F2-49 «Разработка методов усиления фемтосекундного лазерного излучения субпеттаваттной мощности и исследование их взаимодействия с веществом» (2017–2020) и MRU-FA-21/2017 «Генерация гармоник и рентгеновского излучения в фемтосекундной лазерной плазме широких кластеров и приповерхностных областей» (2017–2019).

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года № PF-6097

<sup>3</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № PF-60

**Цель исследования** заключается в определении нелинейных оптических параметров плазменных состояний и углеродсодержащих сред, а также в изучении закономерностей возникающих нелинейных процессов.

**Задачи исследования:**

исследование нелинейных оптических процессов в углеродсодержащих средах и механизмов генерации третьей гармоники;

анализ формирования наночастиц при лазерной абляции Zn и ZnSe в жидкой фазе под воздействием лазерного излучения;

исследование нелинейных оптических свойств наноразмерных частиц Zn и ZnSe методом Z-сканирования, а также определение значений нелинейного поглощения и коэффициентов нелинейного преломления среды;

экспериментальное исследование генерации высоких гармоник инфракрасного лазерного излучения в плазменных средах, содержащих наночастицы Zn и ZnSe, сформированные под воздействием лазерного излучения;

разработка метода управления размерами и параметрами плазменной среды для повышения эффективности генерации высоких гармоник в плазменных состояниях.

**Объект исследования** – наночастицы Zn и ZnSe, углеродсодержащие горючие вещества, а также плазменные среды, полученные в результате лазерной абляции различных материалов.

**Предмет исследования** – нелинейные оптические свойства наночастиц Zn и ZnSe, нелинейные процессы, возникающие в углеродсодержащих средах, а также механизмы генерации высоких порядков оптических гармоник в условиях лазерной плазмы и методы повышения их эффективности.

**Методы исследования.** В диссертационной работе исследование проводилось с использованием методов лазерной абляции, Z-сканирования, атомно-силовой микроскопии, генерации гармоник лазерного излучения, спектрального анализа в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне, оптической спектроскопии и электронной микроскопии.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые изучены нелинейные механизмы эффективной генерации третьей гармоники короткого лазерного излучения в нелинейных средах на основе углерода, а также выявлены сильные нелинейные эффекты в углеродных наночастицах;

впервые проанализирован процесс формирования наночастиц Zn и ZnSe в жидкой среде методом лазерной абляции, при этом получен раствор сферических наночастиц с размерами 100 и 200 нм;

методом Z-сканирования исследованы нелинейные оптические свойства растворов, содержащих наночастицы Zn и ZnSe, при этом наблюдалось увеличение показателя преломления и коэффициента поглощения растворов за счёт сильных квантово-размерных нелинейных эффектов, возникающих в наномасштабных частицах, а также измерены значения соответствующих нелинейных параметров;

впервые в плазменных средах, сформированных из наночастиц Zn и ZnSe, экспериментально исследована генерация высоких порядков гармоник под действием сверхкороткого инфракрасного лазерного излучения, при этом наблюдалась генерация когерентного излучения с высокой фотонной энергией, в частности, с энергией 32 эВ и 40 эВ;

впервые разработан метод, позволяющий повысить энергетическую эффективность когерентных источников излучения высокоэнергетичных фотонов, генерируемых в плазменных средах.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

Показана возможность значительного повышения эффективности генерации третьей гармоники в нелинейных средах, содержащих углеродные наночастицы.

Сверхгидрофобные свойства углеродных наночастиц, полученных из пламени свечи, открывают новые возможности для создания практических покрытий.

Показано, что повышение эффективности генерации высоких порядков гармоник в плазменных средах, содержащих наночастицы Zn и ZnSe, может быть достигнуто за счёт квазисогласования фаз взаимодействующих излучений.

**Достоверность результатов исследования.** Экспериментальные методы, использованные в исследовании, обладают высоким уровнем точности и воспроизводимости, а полученные результаты подтверждаются сравнением с ранее опубликованными научными статьями и исследованиями, а также их соответствием основным теоретическим принципам.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость полученных результатов объясняется обоснованностью механизмов, направленных на обеспечение параметров лазерного излучения и физических свойств растворов при синтезе наночастиц Zn и ZnSe, а также возможностью использования разработанных методов и их математических оснований при изучении других нелинейных процессов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности использования полученных в экспериментах наночастиц Zn и ZnSe для создания оптических ограничивающих устройств на основе мощного лазерного излучения, а также в повышении качества нелинейных оптических устройств.

**Внедрение результатов исследования.**

На основе полученных результатов по синтезу наночастиц Zn и ZnSe, а также созданию когерентных источников излучения:

Полученные результаты были использованы в рамках прикладного исследования ЁОТ-Фтех-2018-161, выполненного в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова в 2018–2019 годах, по теме “Повторное исследование и спектральное разделение плотных частотных оптических каналов в двухъядерном оптоволокне”. В ходе данного исследования был проведён углублённый анализ нелинейных

оптических процессов в оптоволокне, разработаны оптимизированные модели частотных преобразований и усовершенствованы технологии передачи оптических сигналов с высокой скоростью (справка №01/914-1715 Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова от 11 сентября 2024 года). Результаты данного исследования способствовали расширению возможностей передачи широкополосного излучения через параллельные спектральные каналы в двухъядерных оптоволоконках, повышению эффективности процессов частотного преобразования, а также совершенствованию технологий высокоточного спектрального разделения оптических сигналов.

Результаты экспериментов по генерации низкоуровневой нелинейности и высоких гармоник, выявленных в различных оптических средах, были использованы в рамках научных проектов FRG21-M-S34, FRG19-L-S61 и FRG-C-S56, реализованных в исследовательском центре Американского университета Шарджи (American University of Sharjah, ОАЭ). В результате использование данных научных достижений позволило усилить генерацию высших гармоник в диапазоне 15–100 нм за счёт взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с плазменной средой, содержащихся наночастиц металлов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований были обсуждены на 11 научно-практических конференциях, включая 3 международных и 8 республиканских научно-практических конференций.

**Публикация результатов исследования.** Научные результаты, полученные по теме диссертации, изложены в 15 научных работах, из которых 4 являются научными статьями. При этом 4 статьи опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторской диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 119 страниц, включая основную текстовую часть, которая содержит 21 рисунок и одну таблицу.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

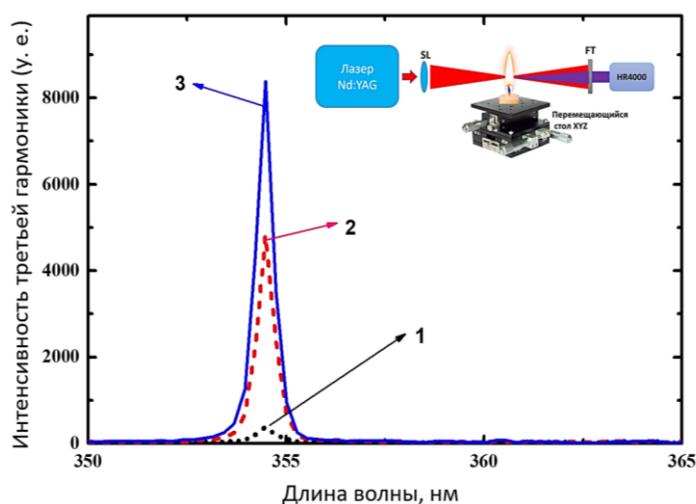
**Во введении** обоснованы актуальность и необходимость темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, приведены научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Также представлена информация о достоверности исследования, внедрении результатов исследования, апробации работы и краткое описание структуры диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Обзор литературы по современным методам генерации гармоник с использованием наночастиц и плазмы»** подробно проанализированы современные методы, направленные на повышение эффективности нелинейных оптических процессов и генерации

высоких гармоник. В частности, исследована роль нелинейных явлений, таких как нелинейный показатель преломления, двухфотонное поглощение, насыщаемое и обратное насыщаемое поглощение, возникающих при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения со средой, а также влияние этих параметров на амплитуду и условия фазового согласования генерируемых гармоник. Кроме того, проанализировано влияние оптимизации параметров лазерно-плазменного взаимодействия на поверхности мишени, управления процессами ионизации и пространственным распределением свободных электронов на эффективность генерации когерентного рентгеновского излучения. В конце главы, на основе литературного обзора, определены цели и задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе диссертации, названной **«Методика получения процессов низкопорядковой нелинейности и генерации гармоник высокого порядка, а также описание экспериментальных устройств»**, освещаются методологические основы экспериментальных исследований, проведённых в различных средах. В данной главе в первую очередь представлена оптическая схема, предназначенная для генерации третьей гармоники в воздухе в условиях горения углеродсодержащих пламён, в частности, пламени свечи и этанола, а также описаны методы, применённые для выявления наночастиц, возникающих в этом процессе. Также подробно освещены оптическая схема синтеза наночастиц методом фемтосекундной лазерной абляции из металлических и полупроводниковых материалов, таких как Zn и ZnSe, с целью комплексного изучения генерации высоких гармоник, результаты морфологической и спектральной характеристики полученных частиц, а также методы регистрации этих характеристик. Кроме того, представлены элементы экспериментальной установки и принцип их работы, предназначенные для определения низкоуровневых нелинейных оптических свойств коллоидной суспензии, полученной методом лазерной абляции, с использованием техники Z-сканирования. Также в данной главе представлены методы формирования подложек, состоящих из наночастиц, а также схема спектрометра, использованного для генерации и регистрации высоких гармоник в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне в плазме, образующейся как на этих подложках, так и на поверхности твёрдого тела. Данный спектрометр состоит из цилиндрического зеркала с золотым покрытием, направляющей дифракционной решётки, микроканальной пластины, интегрированной с фосфорным экраном, а также CCD-камеры. Кроме того, проанализирована методика формирования периодических плазменных структур на поверхности твёрдого тела с использованием многослойной маски, что позволяет улучшить фазовое согласование в модулированной среде и достичь высокой эффективности генерации гармоник. Описанные методы и экспериментальные установки позволили оптимизировать процесс генерации высоких гармоник, оценить пространственно-распределённые характеристики и повысить интенсивность излучения.

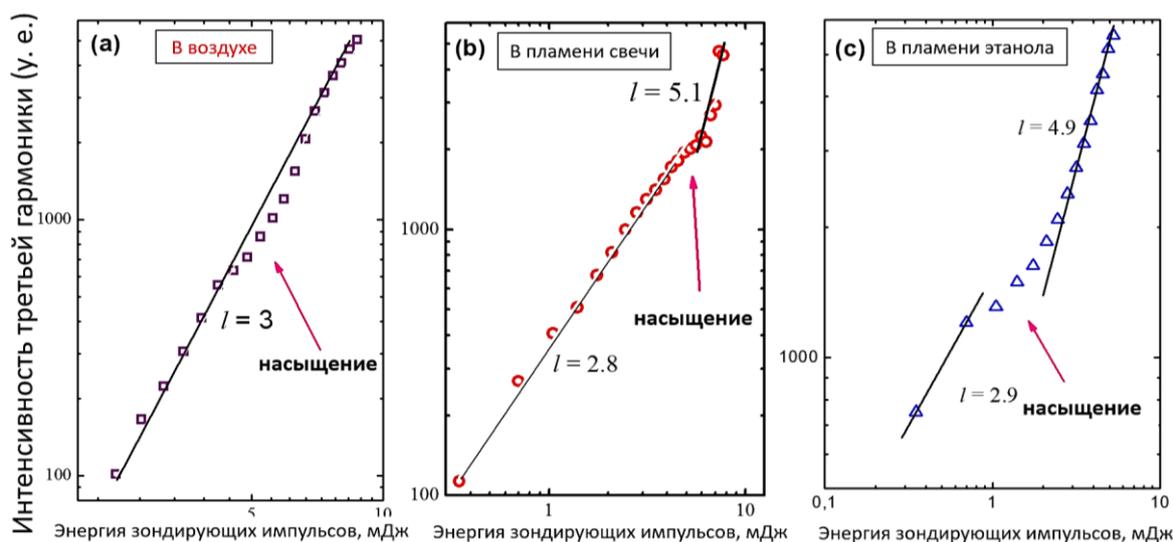
В третьей главе диссертации, названной «**Нелинейность низкого порядка в наночастицах, синтезированных в пламени горения и с помощью лазерной абляции**», исследованы свойства низкопорядковой нелинейности наночастиц, полученных в пламени горения и посредством лазерной абляции. Проанализированы экспериментальные результаты по генерации третьей гармоники в свечных и этанольных пламени под воздействием лазерного излучения с длиной волны 1064 нм и длительностью 28 пс. На рис. 1 представлены спектры третьей гармоники, полученные в воздухе (1), в пламени свечи (2) и в пламени этанола (3). Результаты исследования показали, что по сравнению с эффективностью третьей гармоники, полученной в воздухе ( $1,1 \times 10^{-5}$ ), эффективность увеличивается в 12 раз в пламени свечи ( $1,2 \times 10^{-4}$ ) и в 24 раза в пламени этанола ( $2,4 \times 10^{-4}$ ).



**Рис. 1. Генерация третьей гармоники в воздухе (1), пламени свечи (2) и пламени этанола (3). Во всех случаях энергия лазерного излучения с длиной волны 1064 нм составляла 3,6 мДж. Экспериментальная схема: фокусирующие линзы (SL), система фильтров (FT); волоконный спектрометр HR4000.**

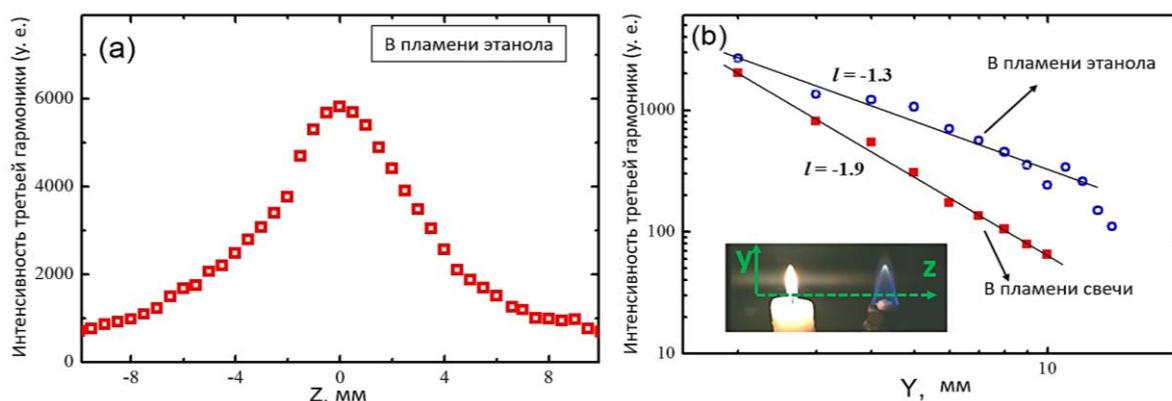
В результате, из-за низкого вклада компонентов воздуха в эффективность генерации третьей гармоники в пламени, их влияние не учитывалось. Основным фактором повышения эффективности гармоники в пламени оценено наличие углеродных наночастиц, образующихся внутри пламени. Вместе с тем зависимость эффективности генерации третьей гармоники от энергии зондирующего импульса имеет важное значение для выявления ограничивающих механизмов процесса. На рис. 2 показана зависимость интенсивности генерации третьей гармоники от различных энергий импульсов в воздухе, пламени свечи и пламени этанола. Результаты исследования показали состояние насыщения эффективности генерации третьей гармоники во всех трех средах, что объясняется увеличением концентрации свободных электронов при высокой интенсивности зондирующих импульсов. Изменения в отклонении интенсивности генерации третьей гармоники при увеличении энергии лазера в пламени свечи и этанола объясняются фазовым сдвигом, возникающим под воздействием нелинейного эффекта Керра.

Для анализа расположения образцов в фокальной плоскости линзы и наличия углеродных наночастиц, образующихся в пламени, был применен метод сканирования вдоль осей z и y. Рис. 3а демонстрирует зависимость эффективности генерации третьей гармоники в этанольном и свечном пламени от положения лазерного фокуса и формирования частиц в пламени.



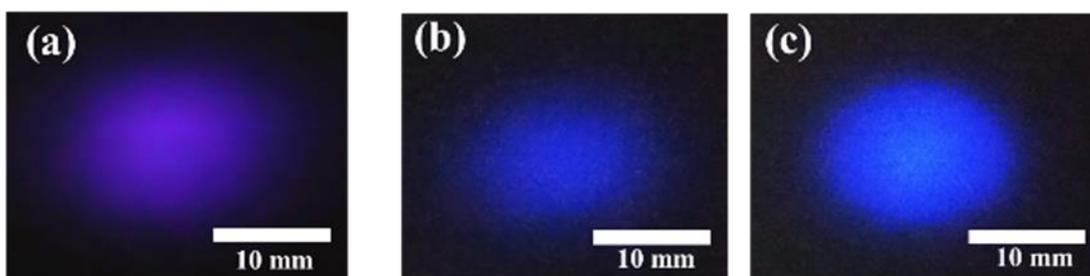
**Рис. 2. Зависимость интенсивности третьей гармоники от энергии зондирующего импульса в (а) воздухе, (b) пламени свечи и (с) пламени этанола.**

Здесь ось  $z$  представляет собой оптический путь лазерного излучения (перпендикулярно плоскости пламени), тогда как ось  $y$  (рис. 3.б) соответствует направлению, параллельному пламени, начиная от фитиля, вдоль которого проводились эксперименты. В обоих измерениях было установлено, что концентрация наночастиц наиболее высока в центре пламени. Этот результат подтверждает, как отмечено в литературе, что в пламени, содержащем углерод, то есть в точке с самой высокой температурой, происходит формирование наночастиц.



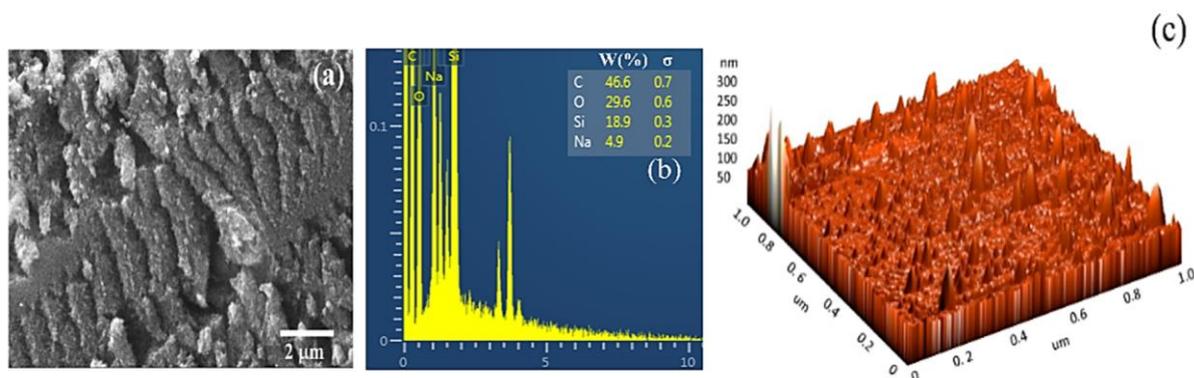
**Рис. 3. а) Изменение интенсивности третьей гармоники в этанольном пламени в зависимости от положения относительно фокальной плоскости линзы. б) Зависимость эффективности гармоники от расстояния  $Y$  от источника этанольного и свечного пламени.**

Более значительное монотонное снижение вдоль оси  $y$  в пламени свечи по сравнению с этанольным пламенем объясняется тем, что в результате снижения температуры в пламени образовавшиеся наночастицы сливаются друг с другом, переходя в агрегатное состояние, и их концентрация уменьшается. Кроме того, изменения фазового распределения третьей гармоники при одинаковых условиях горения (рис. 4.б) подтверждают образование крупных наночастиц в пламени свечи.



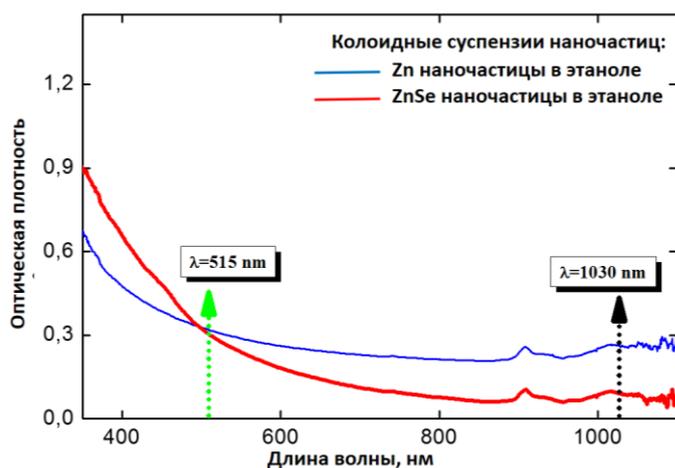
**Рис. 4.** Пространственное распределение генерации третьей гармоники, полученной в (а) воздухе, (b) пламени свечи и (с) пламени этанола при использовании зондирующих импульсов энергии 3,5 мДж.

Это явление показывает влияние формирования и роста наночастиц в пламени на оптические свойства. Одновременно, с целью проверки наличия наночастиц с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЕМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), стеклянная пластинка удерживалась над пламенем на расстоянии 50 мм в течение 1–10 минут (рисунок 5). СЕМ, ЭРС и АСМ изображения покрытий, образованных на поверхности стекла в этом эксперименте, показали наличие нано- и микроструктур. Эти результаты подтверждают анализы, проведенные с пламенем, поскольку в центре пламени температура высока, и именно в этом месте образуются наночастицы. В периферийных областях пламени и по его высоте температура снижается, в результате чего эти наночастицы объединяются в более крупные наночастицы или образуют агрегаты. СЕМ-изображения, связанные со свечой, также служат явным доказательством этого (рис. 5.а). Эксперименты по генерации третьей гармоники также подтверждают исследования, проведенные с пламенем. Для получения генерации гармоник высокого порядка в пламени, содержащем углеродные наночастицы, необходимо создать вакуумную среду, однако с пламенем создать такие условия невозможно. Поэтому необходимо продолжить исследование с наночастицами, полученными методом лазерной абляции из металлических и полупроводниковых материалов, которые отличаются своими уникальными свойствами в высокопорядковых нелинейных процессах. Синтез наночастиц в жидкой фазе (этанол, вода и т.д.) с помощью фемтосекундной лазерной абляции является одним из эффективных методов.



**Рис. 5.** а) СЭМ-изображение тонкой пленки, содержащей углерод, и ее б) составной ЭДС-спектр, и с) поверхностные АСМ-изображения тонкой пленки

В данной работе процесс лазерной абляции осуществлялся с использованием лазерного излучения с длительностью импульса 40 фс, центральной длиной волны 1030 нм и частотой повторения 50 кГц. Лазерное излучение, сфокусированное на мишенях Zn и ZnSe размером  $3 \times 3$  см<sup>2</sup>, помещённых в этанольную жидкость, сканировалось по поверхности мишени со скоростью 50 мм/с. Процесс абляции проводился в течение 5 минут. При этом средняя мощность лазерных импульсов в процессе абляции составила 5 Вт, а плотность энергии излучения, сфокусированного на поверхности мишени в этаноле, – 13 Дж/см<sup>2</sup>. Импульсы лазерного излучения высокой интенсивности вызывают плазменную абляцию на поверхности мишени, и этот горячий плазменный облак, охлаждаясь в жидкости, распадается на наночастицы различной формы и размеров. В этом процессе слой жидкости толщиной примерно 5 мм над мишенью контролирует распространение плазмы, в результате чего наночастицы рассеиваются в объеме этанола, формируя коллоидную суспензию. На рис. 6 представлены изображения оптической плотности коллоидных суспензий, содержащих наночастицы Zn и ZnSe.



**Рис. 6.** Спектры поглощения наночастиц Zn и ZnSe.

используемых в методе Z-сканирования, значительно отстоят от данного максимума, он не оказывает влияния на нелинейные оптические параметры суспензий наночастиц. Кроме того, размеры и морфология синтезированных наночастиц Zn и ZnSe были изучены с помощью микроскопических методов – SEM и AFM. SEM-изображения показали, что средний диаметр наночастиц Zn составляет примерно 100 нм, тогда как средний диаметр наночастиц ZnSe достигает 200 нм. Кроме того, форма частиц в основном была сферической и эллипсоидной, при этом в некоторых случаях наблюдалась их агрегация с образованием крупных агломератов. Различие в размерах и формах частиц напрямую зависит от параметров лазерного импульса (интенсивность, длительность импульса), а также от физических свойств материала (температура плавления, теплопроводность).

В коллоидных суспензиях из-за наличия крупных наночастиц максимумы поверхностного плазмонного резонанса в спектрах поглощения не были выявлены. Однако в спектрах поглощения обеих суспензий наблюдался максимум в районе 900 нм. Это, вероятно, связано с незначительным загрязнением этанола в процессе абляции. Поскольку длины волн лазерных импульсов (1030 нм и 515 нм),

Коллоидные суспензии наночастиц Zn и ZnSe были помещены в кварцевую кювету толщиной 1 мм и исследованы методом Z-сканирования для изучения их низкопорядковых нелинейных оптических свойств. Эксперименты проводились с использованием основного лазерного импульса (1030 нм) и его второй гармоники (515 нм). В процессе Z-сканирования кварцевые кюветы с суспензией перемещались вдоль оси z, и на основе изменения интенсивности лазерного излучения в области фокусировки был проанализирован их взаимодействие с наночастицами, а также определены их нелинейные оптические параметры.

Таблица 1.

**Нелинейные показатели преломления и коэффициенты двухфотонного поглощения суспензий наночастиц Zn и ZnSe, полученных методом абляции в этаноле.**

Образцы	$\lambda=1030$ нм		$\lambda=515$ нм	
	$\gamma$ (см <sup>2</sup> · Вт <sup>-1</sup> )	$\beta$ (см · Вт <sup>-1</sup> )	$\gamma$ (см <sup>2</sup> · Вт <sup>-1</sup> )	$\beta$ (см · Вт <sup>-1</sup> )
Наночастицы Zn	$-1.4 \times 10^{-13}$	$2.7 \times 10^{-11}$	$-1.7 \times 10^{-14}$	$1.0 \times 10^{-11}$
Наночастицы ZnSe	$-4.9 \times 10^{-14}$	$0.5 \times 10^{-11}$	$-2.4 \times 10^{-14}$	$2.1 \times 10^{-11}$

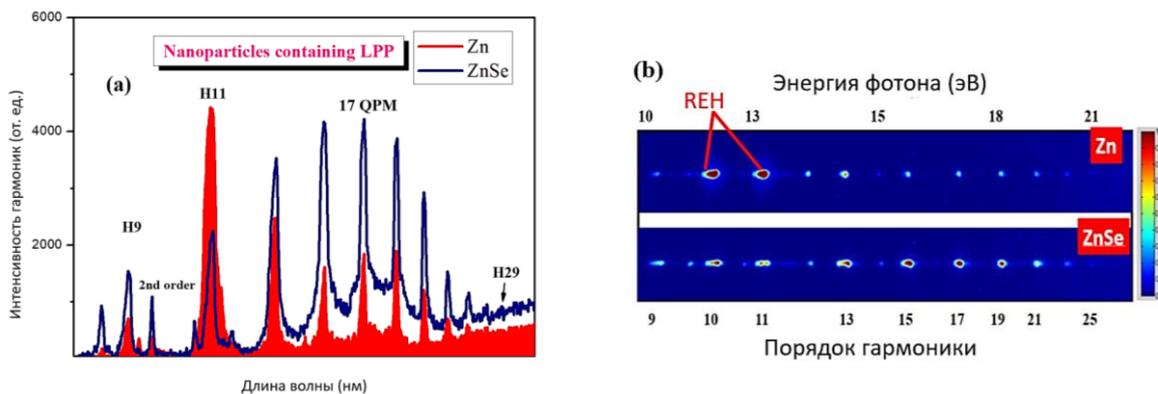
В таблице 1 приведены нелинейные оптические параметры, такие как коэффициент нелинейного преломления ( $\gamma$ ) и коэффициент двухфотонного поглощения ( $\beta$ ), определенные в результате Z-сканирования. Эти результаты показывают, что под воздействием лазерного излучения с высокой частотой повторения 50 кГц был определен отрицательный нелинейный коэффициент преломления ( $\gamma < 0$ ). Этот эффект объясняется не только изменением показателя преломления в зависимости от интенсивности, но и усилением термо-оптических эффектов под воздействием тепла. Кроме того, нелинейный показатель преломления наночастиц Zn при лазерном излучении с длиной волны 1030 нм примерно в 2,5 раза отличался от показателя преломления наночастиц ZnSe. В то же время коэффициент двухфотонного поглощения для наночастиц Zn оказался в 5 раз выше, чем для наночастиц ZnSe. Эти различия в основном объясняются меньшими размерами наночастиц Zn, так как частицы меньшего размера демонстрируют более высокие нелинейные оптические параметры по сравнению с более крупными частицами. Результаты Z-сканирования с использованием второй гармоники (515 нм) показали, что значения нелинейного показателя преломления наночастиц Zn и ZnSe практически не различаются, однако коэффициент двухфотонного поглощения наночастиц ZnSe оказался в 2 раза выше, чем у наночастиц Zn. Выявленные отрицательные нелинейные показатели преломления наночастиц Zn и ZnSe могут изменять условия дисперсии в плазме, сформированной на основе этих наночастиц, способствуя оптимизации фазового согласования.

В четвертой главе диссертационной работы, названной «Генерация и оптимизация высоких гармоник в наночастицах и модулированной плазме», рассмотрены процессы формирования высоких гармоник в плазме, созданной на основе наночастиц Zn и ZnSe, с использованием комбинации

одного (1030 нм) и двух зондирующих излучений (1030 нм + 515 нм), а также проведен их анализ. Кроме того, продемонстрированы техники, позволяющие изменять расстояние между струями плазменного факела, сформированного при лазерной абляции на поверхности различных материалов, а также их размеры.

Суспензия наночастиц Zn и ZnSe была нанесена на подложку высокой чистоты методом капельного осаждения и аккуратно высушена при температуре 60°C. Этот метод обеспечил равномерное распределение наночастиц по поверхности. После многократного повторения процесса был сформирован слой толщиной 0,2–0,8 мкм. Подготовленная подложка была помещена в вакуумную камеру с давлением  $3 \times 10^{-6}$  мбар для исследования генерации высоких гармоник. Для формирования плазмы на поверхности этих подложек использовалось нагревающее лазерное излучение с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 235 фс. Данное лазерное излучение фокусировалось на поверхности мишени с помощью линзы с фокусным расстоянием 200 мм в диапазоне интенсивностей  $10^{10} - 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>. Зондирующие импульсы направлялись параллельно плоскости мишени в сформированную плазму, а их максимальная интенсивность выбиралась в диапазоне  $I \approx (1 - 3) \times 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Такие выбранные интенсивности нагревающих и зондирующих импульсов обеспечивают формирование оптимальной плазмы, характеризующейся слабой ионизацией и повышенной концентрацией наночастиц.

На рис. 7.а представлены спектры высоких гармоник, образованных при взаимодействии зондирующего излучения с длиной волны 1030 нм с плазмами, сформированными наночастицами Zn и ZnSe. Обозначение 17QPM на спектрах, полученных в обеих плазменных средах, соответствует интенсивности 17-й гармоники, максимально усиленной в условиях квазифазового согласования. Отношение интенсивностей этих гармоник в плазме, сформированной наночастицами Zn и ZnSe, составляет 2,2, что практически совпадает с отношением отрицательных нелинейных показателей преломления (2,5), определенных методом Z-сканирования. Это сходство показывает, что изменения отрицательного нелинейного показателя преломления вызывают процессы дефокусировки, которые, в свою очередь, изменяют условия дисперсии в процессе генерации высоких гармоник, способствуя оптимизации фазового согласования. Помимо этого, на рисунке наблюдается резонансное усиление 11-й гармоники в плазменной среде, образованной в результате лазерной абляции наночастиц Zn. Данный резонансный механизм связан с электронными переходами ионов Zn<sup>+</sup> или Zn<sup>2+</sup>, образованных в результате ионизации атомов Zn. Однако в наночастицах ZnSe такое резонансное усиление не наблюдалось. Это связано с тем, что ZnSe обладает нанокристаллической структурой, в которой атомы Zn и Se образуют прочную кристаллическую решетку за счет химических связей. В результате индивидуальные энергетические уровни атома Zn изменяются, и он не может образовывать резонансные переходы, наблюдаемые в ионах Zn<sup>+</sup>.



**Рис. 7:** а) спектры генерации высоких гармоник в лазерных плазмах, сформированных наночастицами Zn (красная сплошная линия) и ZnSe (синяя линия) при основном лазерном излучении ( $\lambda = 1030$  нм); б) необработанные изображения генерации гармоник в плазмах, сформированных наночастицами Zn (верхнее изображение) и ZnSe (нижнее изображение) при комбинации основного лазерного излучения и его второй гармоники (1030 нм + 515 нм).

На рис. 7.б представлены необработанные первоначальные изображения высоких гармоник, сформированных в плазменной среде в результате комбинации зондирующих лазерных импульсов с длинами волн 1030 нм и 515 нм. В представленных спектрах важное значение имеет временная синхронизация зондирующих импульсов в двухволновой схеме (1030 + 515 нм), использованной в эксперименте. Генерация второй гармоники (515 нм) осуществлялась с использованием ВВО-кристалла толщиной 0,1 мм. В результате дисперсии групповой скорости возникает временная задержка в 12 фемтосекунд между импульсами основной волны (1030 нм) и второй гармоники (515 нм). Эта задержка нарушает их одновременное взаимодействие с плазмой, что приводит к формированию как нечётных ( $2n+1$ ), так и чётных ( $2n$ ) порядков гармоник. Подобная ситуация характеризуется нарушением спектральной симметрии и приводит к нетрадиционному спектральному распределению. Особенно следует отметить, что из-за отсутствия временной согласованности между двумя импульсами наблюдается неравномерное распределение энергии по порядкам гармоник. Однако при двухволновом зондировании, из-за малых отрицательных значений нелинейного показателя преломления наночастиц Zn и ZnSe на длине волны 515 нм, в данных условиях квазифазовое согласование не реализовалось. Это, в свою очередь, привело к нарушению условий фазового согласования и вызвало резкое снижение интенсивности высоких чётных порядков гармоник (например, H16, H20). Напротив, нечётные гармоники (например, H9, H13, H17) генерировались с высокой интенсивностью, что объясняется несовершенной временной синхронизацией двухволнового излучения при его взаимодействии с нелинейной средой. Кроме того, в результате нарушения временного и фазового согласования между импульсами гармоники порядка  $2(2n+1)$  проявили более высокую интенсивность по сравнению с гармониками порядка  $4(n+1)$ .

Одним из основных препятствий для повышения эффективности генерации высоких гармоник является нарушение фазового согласования, возникающее в процессе перехода излучения к более высокому порядку гармоник. Именно по этой причине концепция квазифазового согласования рассматривается как один из эффективных методов повышения эффективности генерации гармоник. Суть данного подхода заключается в формировании среды, компенсирующей фазовое расхождение между лазерным излучением и порождаемыми гармониками. Условия квазифазового согласования могут быть реализованы и в плазмах, формирующихся на поверхности мишени под воздействием лазерного излучения. Для этого плазма должна быть пространственно периодически модулирована. В такой модифицированной плазменной среде обеспечивается контроль концентрации частиц, что позволяет достигнуть фазового согласования между зондирующим лазерным излучением и генерируемыми гармониками. По этой причине материалы мишеней  $Mn$  и  $Ag$  были выбраны для экспериментов по периодическому формированию поверхностной плазмы, так как в предыдущих исследованиях они продемонстрировали уникальные характеристики в процессе генерации гармоник. На рисунке 8.а показан метод формирования периодической поверхностной плазмы с использованием многоцелевой маски, размещенной между цилиндрической линзой и телескопом, а также внутри телескопа, фокусирующего нагревающий импульс на поверхность мишени. В результате были сформированы плазменные фрагменты, и на мишени длиной 5 мм образовались модулированные плазменные структуры с размерами, варьирующимися от 0,1 мм до 0,8 мм (рис. 8.б). Зондирующий импульс фокусировался в ортогональном направлении к сформированной периодической плазме. Данный импульс направлялся через сферическую линзу с фокусным расстоянием 400 мм и размещался на высоте примерно 200 мкм от поверхности образца. Интенсивность зондирующего импульса была выбрана около  $3 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>.

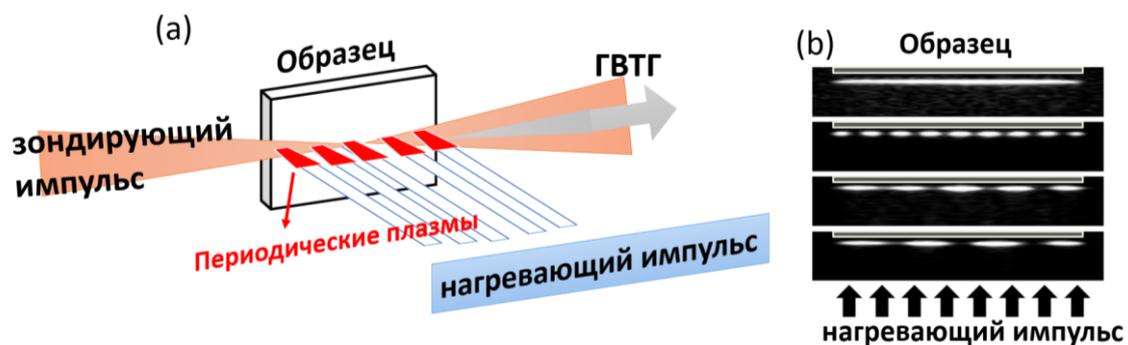
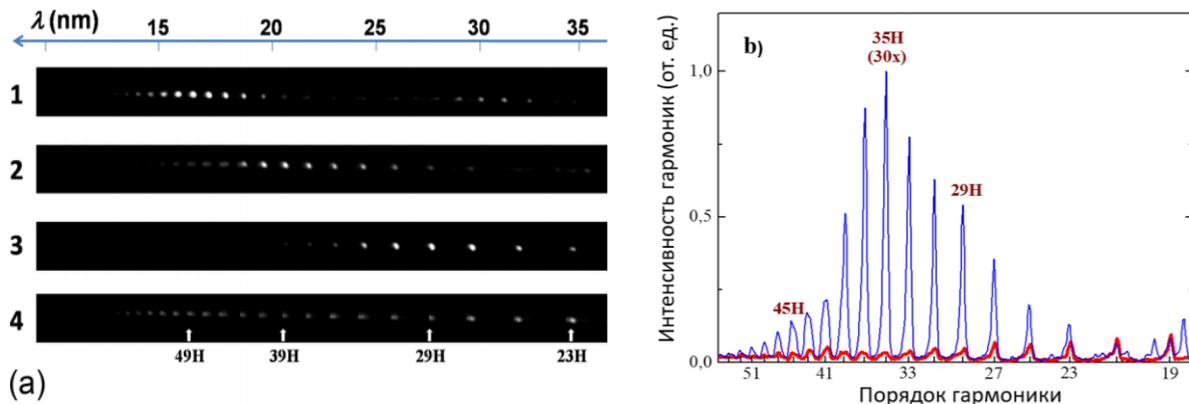


Рис. 8: а) Формирование периодических плазменных струй на мишени из серебра с помощью многоцелевой маски и б) их структура.

Данное значение высоты и интенсивности обеспечивает оптимальные условия для фазового согласования, регулируя степень ионизации плазмы и плотность частиц, что снижает негативное влияние дисперсии свободных электронов на эффективность генерации гармоник. На рисунке 9.а

представлено исходное, необработанное спектральное распределение генерации высоких гармоник. На четвертом изображении рисунка показано спектральное распределение гармоник, полученных в расширенной плазме длиной 5 мм, где максимальный порядок гармоники ограничен 51-м. На остальных изображениях рисунка представлен спектр гармоник для периодических плазм, сформированных с использованием многощелевой маски. На третьем изображении рисунка 9.а наблюдалось увеличение интенсивности 29-й гармоники в четырех периодических плазменных фрагментах, каждый длиной 0,5 мм.



**Рис. 9:** а) представлены исходные необработанные изображения спектров гармоник, сформированных из модифицированных фрагментов серебряной плазмы, созданной с помощью многощелевой маски. Показаны спектры высоких гармоник, полученные в восьми плазменных фрагментах длиной 0,3 мм (изображение 1), шести фрагментах длиной 0,38 мм (изображение 2), четырех фрагментах длиной 0,5 мм (изображение 3) и одной расширенной плазме длиной 5 мм (изображение 4); б) представлено спектральное распределение гармоник, измеренное в одинаковых условиях для плазмы длиной 5 мм и шести плазменных фрагментов длиной 0,38 мм.

На втором изображении установлено усиление интенсивности 39-й гармоники в результате формирования шести периодических плазм длиной 0,38 мм. На первом изображении зафиксировано усиление интенсивности 49-й гармоники в восьми плазменных фрагментах длиной 0,3 мм. Результаты показывают, что модификация плазмы приводит к расширению спектра гармоник и увеличению интенсивности отдельных порядков. Это объясняется оптимальным распределением плотности частиц в плазме и улучшением условий квазифазового согласования. Кроме того, порядок усиленных гармоник  $q_{\text{ког}}$  и длина одного плазменного фрагмента  $L_{\text{ког}}$  характеризуются взаимосвязью с электронной плотностью  $N_e$  согласно выражению  $L_{\text{ког}} \times q_{\text{ког}} = 1.4 \times 10^{18} / N_e$ . Если электронная плотность остается постоянной, длина плазменного фрагмента и порядок максимально усиленных гармоник находятся в обратно пропорциональной зависимости, и их произведение остается постоянной величиной. Эта взаимосвязь позволяет контролировать структуру плазмы для повышения эффективности генерации высоких гармоник. Аналогичные экспериментальные результаты были получены и в случае поверхностной плазмы мишени Mn. Кроме того, оптимальное значение временной задержки между нагревающим и

зондирующим импульсами составляло 35–45 нс, что эффективно оптимизировало генерацию гармоник в плазменных фрагментах. На начальных этапах формирования плазмы концентрация частиц (атомов и однократно ионизованных ионов) недостаточна для генерации гармоник. При скорости частиц порядка  $10^4$  м/с требуется определенное время, чтобы они достигли оптической оси зондирующего излучения, то есть высоты 200 мкм от поверхности мишени. Помимо этого, при задержках 70 нс и более эффективность генерации гармоник постепенно снижалась, так как в этот момент плотность плазмы уменьшалась, а степень ионизации возрастала.

Оценка эффективности преобразования основных импульсов в генерацию высоких гармоник является сложной задачей, поскольку этот процесс зависит от целого ряда факторов. В частности, при калибровке детектора важную роль играют спектральные характеристики дифракционной решётки, функциональные особенности экстремального ультрафиолетового спектрометра, а также перевод зарегистрированного на микроканальной пластине и ПЗС-камере сигнала в число фотонов, соответствующих каждой гармонике. Поэтому выполнить полную калибровку для каждого эксперимента затруднительно, и обычно опираются на данные об эффективности пересчёта, полученные в предыдущих аналогичных экспериментах. Согласно расчётам на основе этих данных, эффективность обнаруженных в данной работе гармоник была оценена как  $10^{-5}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, в данной диссертационной работе исследованы возможности повышения эффективности генерации третьей и высоких гармоник на мишенях, содержащих элементы, такие как углерод, цинк, селенид цинка, серебро и марганец. Также была показана важность изменения размеров и расположения плазменных участков для генерации высоких гармоник. Этот подход предоставил новые возможности для повышения эффективности гармоник и позволил создавать высококогерентное излучение путем оптимизации геометрических характеристик плазменных шлейфов.

1. Была изучена генерация третьей гармоники ( $\lambda_{3w} = 354,67$  нм) инфракрасного лазерного излучения ( $\lambda_w = 1064$  нм) с длительностью импульса 28 пс в газообразных средах, содержащих углерод. Результаты исследования показали, что эффективность генерации третьей гармоники в этих средах была в 24 раза выше по сравнению с генерацией в нормальных условиях воздуха. Это высокое значение эффективности объясняется присутствием наночастиц в углеродсодержащих газах и усилением нелинейных оптических процессов в них.

2. При анализе генерации третьей гармоники в пламени свечи углеродные микроструктуры, размещенные на стеклянных подложках, проявили супергидрофобные свойства с углом контакта капли воды  $155^\circ$ . Этот результат открывает широкие возможности для создания гидрофобных покрытий и их практического применения.

3. Впервые систематически исследованы нелинейные оптические свойства наночастиц Zn и ZnSe, синтезированных методом лазерной абляции. Для наночастиц Zn на длине волны 1030 нм нелинейные коэффициенты преломления  $\gamma$  и поглощения  $\beta$  составляют соответственно  $-1,4 \times 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/Вт и  $2,7 \times 10^{-11}$  см/Вт, тогда как для наночастиц ZnSe  $\gamma = -4,9 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/Вт и  $\beta = 0,5 \times 10^{-11}$  см/Вт. Выявленные нелинейные показатели преломления имеют важное значение для оптимизации условий фазового согласования в процессе генерации высоких гармоник, а также для более глубокого понимания взаимодействия лазера с наночастицами.

4. Используя метод Z-сканирования, были измерены нелинейные оптические свойства наночастиц Zn и ZnSe, и показано, что эти свойства имеют важное значение для достижения высокой эффективности генерации высокопорядковых гармоник в плазменной среде, образованной данными наночастицами. В частности, экспериментальные и теоретические расчёты продемонстрировали, что лазерная плазма с наночастицами ZnSe обладает эффектом отрицательной нелинейной рефракции, что положительно влияет на повышение эффективности генерации гармоник с длинами волн 40–80 нм. Согласно трёхшаговой модели, в плазме, образованной наночастицами Zn, максимальный порядок гармоник достигает 33-й, тогда как в плазме с наночастицами ZnSe этот показатель равен 27-й гармонике.

5. Изучен процесс генерации высших гармоник в плазмах, содержащих наночастицы Zn и ZnSe, с использованием основного лазерного излучения ( $\lambda_w = 1030$  нм) и его второй гармоники ( $\lambda_w + \lambda_{2w} = 1030 + 515$  нм). Результаты исследования показали, что интенсивность 9-й и 10-й гармоник, возникающих вследствие взаимодействия фундаментального лазерного излучения и его второй гармоники с атомами Zn, значительно увеличивается. Увеличение интенсивности объясняется наличием резонансного взаимодействия лазерного излучения с наночастиц Zn в лазерной плазме.

6. Разработан метод формирования периодических лазерных плазменных структур на поверхностях металлических мишеней Mn и Ag с использованием нагревающего лазерного излучения, который позволяет управлять их размерами и взаимным расстоянием. При этом продемонстрирована возможность создания периодических плазменных структур на поверхностях различных материалов, а также управления их геометрическими параметрами путём изменения положения многощелевой маски относительно телескопа Галилея и фокусирующих линз. Разработанный метод обеспечивает управление размерами периодических лазерных плазменных структур в диапазоне 0,1–1 мм.

7. Предложен метод определения состава лазерной плазмы, в частности, плотности свободных электронов, посредством анализа изменений интенсивности генерируемых высших гармоник в периодических плазменных структурах. Кроме того, установлено, что оптимизация квазифазового согласования в периодических (0,45 мм) и непериодических плазмах приводит к 30-кратному увеличению интенсивности 35-й гармоники. Представленный

метод демонстрирует возможность значительного повышения интенсивности генерируемых высших гармоник за счёт оптимизации процесса квазифазового согласования в средах с периодически изменяющимися параметрами.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES  
PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 OF URGENCH STATE UNIVERSITY  
NAMED AFTER ABU RAYHAN BIRUNI**

---

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

**REYIMBAEV SHERZOD BOZORBOYEVICH**

**LOW-ORDER NONLINEARITIES AND HIGH HARMONIC  
GENERATION IN NONLINEAR MEDIA**

**01.04.11 – Laser physics**

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

**Urganch – 2025**

The theme of doctor of philosophy (PhD) dissertation was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.3.PhD/FM1162.

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

The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) Is placed on the web page of the Scientific Council (www.urdu.uz) and on the Information and Educational Portal "Ziyonet" (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Boltayev Ganjaboy Sapayevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Official opponents:** **Yusupov Djavdat Bakijanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Matnazarov Anvar Rustamovich**  
candidate of physical and mathematical sciences, dotsent

**Leading organization:** **National University of Uzbekistan**

The defense will take place on « 24 » June 2025 at 14<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council number PhD.03/30.09.2020.FM.55.04 at Urgench State University. (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862)224-66-11, fax: (99862)224-67-00.)

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Urgench state university (is registered №     ) (Address: 14 Kh. Olimjan str., Urgench city, 220100, Uzbekistan, Ph.: (99862) 224-66-11, fax: (99862)224-67-00).

Abstract of dissertation sent out on « 13 » 06 2025 year  
(Mailing report № 8 on « 13 » 06 2025 year)



**U.O. Kutliev,**  
Chairman of the scientific council on award of scientific degree, doctor of physical and mathematical sciences, professor

**K.R. Yakubov,**  
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degree, candidate of physical and mathematical sciences, dotsent

**U.K. Sapaev,**  
Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degree, doctor of physical and mathematical sciences, dotsent

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**Relevance and necessity of the dissertation topic.** In scientific research conducted worldwide in the fields of optoelectronics, biophotonics, and quantum optics, as well as in the production of laser devices and the synthesis of nanostructures, the application of nonlinear optical effects occupies a leading position. On a global scale, the results of scientific studies aimed at investigating the nonlinear optical properties of nanostructures necessitate practical implementation for the development of new optical materials and advanced technological devices. In this regard, the specific properties of nanoscale structures are of great importance for improving the efficiency of the developed systems.

Extensive scientific research is being conducted worldwide to investigate the nonlinear optical properties of nanoscale materials and to develop new types of light sources. In this regard, particular attention is being paid to utilizing high-order harmonic generation techniques to control the optical properties of nanoparticles, to the advancement of nano-optics, the development of high-resolution imaging systems, and the promotion of innovative solutions in fields such as biotechnology and quantum computing.

**The purpose of the research work** is to determine the nonlinear optical parameters of plasma and carbon-containing media and to study the patterns of the arising nonlinear processes.

### **Objectives of the research:**

studying nonlinear optical processes and third-harmonic generation mechanisms in carbon-based media;

analysis of the formation of nanoparticles during the laser ablation of Zn and ZnSe targets in a liquid phase using laser irradiation;

investigation of the nonlinear optical properties of nano-sized Zn and ZnSe particles using the Z-scan technique, as well as determination of the values of nonlinear absorption and the nonlinear refractive index of the medium;

experimental study of high-order harmonic generation of infrared laser radiation in a plasma medium containing Zn and ZnSe nanoparticles produced by laser irradiation;

developing a method for controlling the size and parameters of the plasma medium to enhance the efficiency of generated high-order harmonics in plasma environments.

### **The scientific novelty of the research is as follows:**

for the first time, nonlinear mechanisms responsible for the efficient third harmonic generation of short laser radiation in carbon-based nonlinear media have been studied, and strong nonlinear effects in carbon nanoparticles have been identified;

for the first time, the formation of Zn and ZnSe nanoparticles during the laser ablation process in liquid media has been analyzed, and a solution containing spherical nanoparticles with sizes of 100 and 200 nm has been obtained;

the nonlinear optical properties of solutions containing Zn and ZnSe nanoparticles were studied using the Z-scan technique, revealing an increase in the refractive index and absorption coefficients of the solutions due to strong quantum size-induced nonlinear effects occurring in the nanoscale particles, and the values of the nonlinear parameters were measured;

for the first time, the generation of high-order harmonics of ultrashort infrared laser radiation in plasma media formed from Zn and ZnSe nanoparticles was experimentally investigated, and the generation of coherent radiation with high photon energies, specifically at 32 eV and 40 eV, was observed;

for the first time, a method has been developed to enhance the energy efficiency of coherent radiation sources of high-energy photons generated in plasma media.

**Scientific and practical importance of research results.**

The scientific significance of the research results is explained by the validity of the mechanisms aimed at ensuring the laser radiation parameters and physical properties of Zn and ZnSe nanoparticle solutions during synthesis, as well as by the possibility of using the developed methods and their mathematical foundations in the study of other nonlinear processes.

The practical significance of the research results lies in the possibility of using the Zn and ZnSe nanoparticles obtained in the experiments for the development of optical limiting devices based on high-power laser radiation, as well as in the improvement of the performance of nonlinear optical systems.

**Structure and volume of dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a bibliography, including 21 figures and 1 table. The text of the dissertation is presented on 119 pages.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**E'LON QILINGANISHLAR RO'YXATI**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; Part I)**

1. R.A. Ganeev, G.S. Boltaev, B. Sobirov, S. Reyimbaev, H. Sherniyozov, T. Usmanov, M. Suzuki, S. Yoneya, and H. Kuroda, "Modification of modulated plasma plumes for the quasi-phase-matching of high-order harmonics in different spectral ranges," *Physics of Plasma*, vol. 22, No. 1, pp.012302 (2015), <https://doi.org/10.1063/1.4905524> (01.00.00, №3, IF=2.0).

2. G.S. Boltaev, R.A. Ganeev, Sh. Reyimboyev, B.R. Sobirov, T.Y. Shermatov, N.S. Khalilova, V.V. Kim, Z.T. Azamatov, M. Iqbal, Sh. A. Khan, Ali Alnaser, "Application of combustion flames for generation of third harmonic and hydrophobic properties of deposited films carbon nanoparticles," *Journal of Physics D* (2019), <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab58ec> (01.00.00, №3, IF=3.1).

3. G.S. Boltaev, A. M. Abu Baker, M. Iqbal, N. A. Abbasi, Sh. B. Reyimboev, R. A. Ganeev, and A. S. Alnaser "Low-order nonlinearities and high-order harmonics generation in Zn and ZnSe nanoparticles synthesized during femtosecond laser ablation at a 50 kHz pulse repetition rate", *Journal of the Optical Society of America B* Vol. 39, Issue 10, pp. 2794-2803 (2022), <https://doi.org/10.1063/1.4905524> <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab58ec> (01.00.00, №3, IF=1.4).

4. G.S. Boltaev, R.A. Ganeev, Sh.R. Kamalov, B.R. Sobirov, Sh.B. Reyimbaev, V.V. Gorbushin, N.S. Khalilova, I.B. Sapaev, F.F. To'yboyev, and A.S. Alnaser, "Ablation of metal nanoparticles in liquids during nanosecond laser ablation and analysis of their nonlinear optical properties," *Journal of Fundamental and Applied Research*, vol. 2, no. 2, pp. 20220008 (2022), (01.00.00, №3).

**II bo'lim (II часть; Part II)**

5. G.S. Boltaev, Sh.B Reyimboyev, Y.A. Bo'riyev, A.M. Abu Baker, M. Iqbal, N. Abbasi, R.A. Ganeev and A.S. Alnaser "Low-order nonlinear optical properties of Zn and ZnSe nanoparticles synthesized by ablation using laser pulses", «Проблемы фотоники и перспективы развития», Ургенч - 27-28 мая, 2022г., ст.134-138.

6. G.S. Boltaev, Sh.B Reyimboyev, Y.A. Bo'riyev, A.M. Abu Baker, M. Iqbal, N. Abbasi, R.A. Ganeev and A.S. Alnaser "High-order harmonic generation of Zn and ZnSe nanoparticles synthesized by laser ablation", «Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА-II) материаллари», Тошкент - 20-21 май, 2022 й., 116-119-бетлар

7. Y.A. Buriev, Sh. B. Reyimboyev, B.R. Sobirov, Sh.D. Payziev and G.S. Boltaev "Nonlinear optical properties of HgS and PbSe quantum dots in the nanosecond laser field", « Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва

истикболлари» мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий конференцияси, Тошкент - 26 октябр, 2023 й., 50-51-бетлар.

8. Sh.B. Reyimbaev, V.V. Gorbushin, Sh.R. Kamalov, B.R. Sobirov, Sh.D. Payziev, G.S. Boltaev “A combined q-switching using Cr<sup>4+</sup>:YAG and LBO crystals” , «Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва истикболлари» мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий конференцияси, Тошкент - 26 октябр, 2023 й., 67-68-бетлар.

9. G.S.Boltaev, R.A.Ganeev, Sh.Reyimboyev, B.R.Sobirov, T.Y.Shermatov, B.R.Kutlimuratov, T.Usmanov, V.V.Kim, N.Y.Iskandarov, Z.T.Azamatov, N.S.Khalilova, M.Iqbal, S.A.Khan, A.S.Alnaser “Application of combustion flames for generation of third harmonic and super-hydrophobic coating of glasses by deposited carbon films”, Республиканская конференция по физической электронике и фотонике // Сборник тезисов докладов, Ташкент - 26 октября, 2019 г., 139 – 141 с.

10. Sh. Reyimboyev, V.V. Gorbushin, Sh.R. Kamalov, B.R. Sobirov, Y.A. Boriev va G.S. Boltaev, SESAM asosidagi modulyatsiyalangan lazerlarda samaradorlikni oshirish uchun damlash pozitsiyasini optimallashtirish // Когерент оптика ва лазер физикасининг dolzarb muammolari mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman, Toshkent davlat texnika universiteti, O‘zbekiston, 2024-yil 6-7-noyabr.159-161-b.

11. Ganjaboy S. Boltaev, Rashid A. Ganeev, Vyacheslav V. Kim, Pavel V. Redkin, Sherzod B. Reyimboev, and Chunlei Guo “High-order harmonics generation at quasi-phase matched conditions in silver, boron, and silver sulfide plasmas of different configuration” XXI асп – интеллектуал ёшлар асри мавзусидаги республика илмий-амалий конференцияси, Тошкент 29 март, 2019 й. 49-50-бетлар.

12. Б.Р.Собиров, Ш.Рейимбоев, Х.О.Шерниёзов, Ш.Р.Хайдаров. Металл нанозаррачларини олишнинг лазер абляция усули ва уларнинг физикавий хусусиятлари. “XXI асп – интеллектуал авлод асри” шиори остидаги Самарқанд худудий илмий-амалий конференцияси, 2015 йил, 3-4 июнь, 184-186 б.

13. Г.С.Болтаев, Ю.Джумаев, Ш.Хайдаров, Б.Собиров, Ш.Рейимбоев, Х.Шерниёзов. Исследование наночастиц меди, полученных методом лазерной абляции в вакууме // Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни” илмий-амалий конференция, Тошкент, 2015 йил, 24-25-апрел, б.156-158.

14. Sh. Reyimboyev, G.S. Boltaev. Third harmonic generation of picosecond laser pulses in combustion flames. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on the Topic: “Energy Innovations: Fundamentals and Innovative Engineering Solutions”. Urgench, April 9–10, 2025. – Pp. 1442–1443.

15. Sh. Reyimboyev, G.S. Boltaev. Modification of modulated plasma plumes for the quasi-phases matching of high-order harmonics in different spectral ranges. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on the Topic: “Energy Innovations: Fundamentals and Innovative Engineering Solutions”. Urgench, April 9–10, 2025. – Pp. 1444–1445.

Avtoreferat “O‘zbekiston to‘qimachilik jurnali” ilmiy texnikaviy jurnali  
tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi  
tekshirildi (04.06.2025-y.)

Bosishga ruxsat etildi: 10.06.2025-yil.  
Bichimi 60x45 1/8, “Times New Roman”  
garniturada, raqamli bosma usulida bosildi.  
Shartli bosma tabog‘i 3,25. Adadi: 60. Buyurtma №72.  
TTYSI bosmaxonasida chop etildi.  
Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Shohjahon ko‘chasi, 5-uy