

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O‘RTA MAXSUS
TA‘LIM VAZIRLIGI
DENOV TADBIRKORLIK VA PEDOGOGIKA INSTITUTI**

**REYIMBAYEV SHERZOD BOZORBOYEVICH, BOLTAYEV
GANJABOY SAPAYEVICH**

**LAZER ABLYATSIYASI YORDAMIDA OLINGAN
NANOZARRALARNING NOCHIZIQLI OPTIK XOSSALARI**

Denov – 2025

UDK 535.37:621.375.826:620.3

KBK: 22.336 + 22.386

R 36

Reyimbayev Sh.B., Boltayev G. S. Lazer ablyatsiyasi yordamida olingan nanozarralarning nochiziqli optik xossalari. Monografiya. Termiz, TERMIZ PUBLISHING CENTER, 118-bet

Taqrizchilar:

- Ro‘ziyev Z. J** O‘zbekiston milliy universiteti, “Umumiy fizika” kafedrasida katta oqituvchisi (PhD)
- O‘ljayev. O. B** Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti “Umumiy fizika va qurilish muhandisligi” kafedrasida, v.b. dotsenti (PhD)

*Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti Ilmiy kengashi qarori bilan
nashr etilgan*

Denov tadbirkorlik va pedagogika instituti Kengashining 28.11.2025- yildagi 4-sonli majlis bayoniga asosan nashrga tavsiya etilgan.

ISBN: 978-9910-624-20-9

**© Reyimbayev Sh.B., Boltayev G. S.
© TERMIZ PUBLISHING CENTER, 2025-yil**

Muqaddima

Jahonda optoelektronika, biofotonika va kvant optikasi sohaslarida olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlarda, lazer qurilmalari ishlab chiqarishda va nanoo'lchamli strukturalarni sintez qilishda noxiziqli optik effektlarni qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida, nanoo'lchamli strukturalarda kvant o'lchamli effektlarga asoslangan noxiziqli 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 noxiziqli 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» vazifalari belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, nanoo'lchamli muhitlarda quyi tartibli noxiziqlilik va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi jarayonlarini o'rganish orqali muhim ilmiy natijalarga erishish

va yangi usullarni rivojlantirish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

Mazkur monografiyada nanozarrachalardan tashkil topgan muhitlarda kuzatiluvchi quyi tartibli nochiziqli optik jarayonlar hamda yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining nazariy, eksperimental va hisoblash modellari keng qamrovda tahlil qilinadi. Tadqiqotda ushbu jarayonlarni boshqarish va optimallashtirishning ilmiy asoslari ishlab chiqilib, ularning zamonaviy optik texnologiyalarda qo‘llanilish imkoniyatlari hamda xalqaro tajribalar bilan o‘zaro bog‘liqligi yoritiladi.

SHARTLI QISQARTMALAR RO‘YXATI

Atom kuch mikroskopi	AKM
Skanerlovchi elektron mikroskopi	SEM
Energiya dispersiv rentgen spektroskopiyasi	EDS
Yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi	YuTGG
Ochiq apertura	OA
Yopiq apertura	YA
Femtosekund	fs
Rux	Zn
Rux selenid	ZnSe
Nanometr	nm
Pikosekund	ps
Beta barium borat kristali	BBO
Litiy borat kristali	LBO
Neodim ittriy alyuminiy granati	Nd: YAG
Garmonikalar keskin kesish energiyasi	E_c
Ammosov-Delon-Krainov modeli	ADK

I-BOB. NANOZARRALAR VA PLAZMALAR YORDAMIDA GARMONIKALAR GENERATSIYASINI HOSIL QILISHNING ZAMONAVIY USULLARI BO‘YICHA ADABIYOTLAR SHARHI

Ushbu bobda nochiziqli optik jarayonlar va yuqori tartibli garmonika generatsiyasining samaradorligini oshirish bo‘yicha zamonaviy usullar tahlil qilinadi. Ikki fotonli yutilish, to‘yinuvchi va teskari to‘yinuvchi yutilish kabi jarayonlar, shuningdek, yuqori tartibli garmonika generatsiyasida nanozarralar va plazma muhitlarining roli muhokama qilinadi. Ushbu tadqiqotlar natijalari yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasida energiya samaradorligini oshirish va yuqori energiyali garmonikalarni olishda nanozarralar va lazer nurlanishining o‘zaro ta‘sirining yangi imkoniyatlarini ochib beradi. Kogerent rentgen nurlarini yaratishda garmonikalar jarayonining samaradorligini oshirish maqsadida kelgusi tadqiqotlar uchun istiqbolli yo‘nalishlar ko‘rsatib beriladi.

1.1. § Nochiziqli optik jarayonlar (umumiy tushunchalar)

Zamonaviy optikada yorug‘lik nurlari va modda o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir turlicha shakllarda namoyon bo‘ladi. Agar nur kuchsiz bo‘lsa, muhit unga oddiy tarzda javob beradi – bu holat chiziqli optika deb ataladi. Ammo lazer nurlari kabi kuchli yorug‘lik manbalari muhitga ta‘sir qilganda, bu ta‘sir oddiy chiziqli munosabatdan farqli bo‘ladi. Bunday sharoitda modda nochiziqli hodisalarni namoyon qila boshlaydi. Nochiziqli optik jarayonlar – bu kuchli lazer maydonining muhit bilan o‘zaro ta‘siri natijasida yuzaga keladigan murakkab optik hodisalar bo‘lib, ular muhitning nochiziqli javob xususiyatlarini ifodalaydi. Ushbu jarayonlar doirasida yuqori intensivlikdagi lazer nurlanishi natijasida muhitning sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi (masalan, Kerr effekti) va yutilish koeffitsientining o‘zgarishi (optik cheklash, yutilishning to‘yinish holati, ko‘p fotonli yutilish va boshqalar) kabi hodisalar kuzatiladi. Bundan tashqari, lazer nurlanishining chastotasini o‘zgartirish bilan bog‘liq jarayonlar, masalan, ikkinchi va uchinchi tartibli, shuningdek, yuqori tartibli garmonika generatsiyasi, nochiziqli optikaning yorqin namunalari hisoblanadi. Ushbu jarayonlarning mohiyati shundan iboratki, lazer intensivligining oshishi moddaning qutblanish xususiyatlariga kuchli ta‘sir ko‘rsatadi. Natijada, moddaning chiziqli qutblanish xususiyatlaridan farqli

ravishda, ikkinchi, uchinchi va undan yuqori tartibli nochiziqli javoblar shakllanadi. Nochiziqli optik hodisalarni matematik ifodalash uchun moddaning qutblanish zichligi $P(t)$ ni Teylor qatoriga yoyilgan ko‘rinishda yoziladi:

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3(t) + \dots, \quad (1.1)$$

bu yerda $E(t)$ -lazer nurlanishining elektr maydoni, ε_0 - dielektrik singdiruvchanlik doimiysi, $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ va boshqalar esa moddaning mos ravishda chiziqli va nochiziqli optik singdiruvchanlik koeffitsientlarini ifodalaydi. Ushbu koeffitsientlar muhitning kuchli lazer nurlanishiga qanday javob berishini belgilaydi, ya’ni lazer intensivligi oshgani sari moddaning qutblanishi qanday kuchayishini va qanday optik effektlar yuzaga kelishini aniqlaydi. Muhitning inversiya simmetriyasi (markaziy simmetriyasi) mavjud yoki mavjud emasligi yuqori tartibli nochiziqlik darajalarining faolligiga bevosita ta’sir qiladi. Agar muhit inversiya simmetriyaga ega bo‘lsa (masalan, gazlar, suyuqliklar, amorf moddalarda), u holda faqat toq tartibli nochiziqlik (ya’ni $\chi^{(3)}$, $\chi^{(5)}$, va hokazo) namoyon bo‘ladi. Bunday muhitlarda $\chi^{(2)}$ kabi juft tartibli sezuvchanliklar nolga teng bo‘ladi. Aksincha, anizotrop kristallar (ya’ni kristall simmetriyasi buzilgan muhitlar) ikkinchi tartibli nochiziqlikni ($\chi^{(2)}$) ham ko‘rsatishi mumkin [1; 5–10-b.].

Nochiziqli optikaning eng muhim hodisalaridan biri bu garmonika generatsiyasi bo‘lib, u lazer nurlanishining chastotasini o‘zgartirishga imkon beradi. Masalan, uchinchi garmonika generatsiyasi (3ω) jarayonida muhit lazer nurlanishining uchta fotonini yutadi va ular asosida bitta yuqori chastotali foton hosil qiladi. Bunda chastota uch baravar oshadi, lekin umumiy energiya saqlanadi. Shu sababli bu jarayon parametrik hodisa deb ataladi. Ushbu fizik jarayonni sodda matematik model orqali tushuntirish mumkin. Buning uchun elektr maydonini monoxromatik (bitta chastotali) to‘lqin sifatida quyidagicha tasvirlaymiz: $E(t) = A \cos(\omega t + kz)$. Bu yerda A – elektr maydon amplitudasi, ω – burchak chastota, k – to‘lqin vektori, z – to‘lqin yo‘nalishi bo‘yicha fazoviy koordinata. Endi ushbu ifodani uchinchi tartibli nochiziqlik ($\chi^{(3)}$) uchun qutblanishga qo‘llasak, quyidagi ko‘rinishni olamiz:

$$P_{uch}(t) \propto \chi^{(3)} A^3 \cos(3\omega t + 3kz) + \chi^{(3)} A^2 A \cos(\omega t + kz) + \dots \quad (1.2)$$

Bu yerda trigonometrik almashtirishlar asosida $\cos^3(\omega t)$ quyidagicha ifodalanadi: $\cos^3(\omega t) = \frac{3}{4} \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(3\omega t)$, uchinchi tartibli nohiziqlik nafaqat asosiy chastotani (ω) balki uning uch baravar chastotasini (3ω) ham o'z ichiga olgan uchinchi garmonikani hosil qiladi. Bu hodisa yuqori tartibli chastotali komponentlarning lazer nurlanishi ta'sirida qanday shakllanishini sodda tarzda tushuntiradi. 1.2-ifodaning birinchi qismi lazer nurlanishining asosiy chastotasidan uch barobar yuqori bo'lgan uchinchi garmonikani (3ω) tavsiflaydi. Ushbu jarayon natijasida to'lqin uzunligi uch marta qisqaradi va kogerent nurlanish shakllanadi. Ikkinchi qism esa maydon chastotasidagi nohiziqli optik javobni, masalan, optik Kerr effekti va nohiziqli yutilish kabi hodisalarni ifodalaydi. Ushbu jarayon lazer nurlanishining intensivligi bilan bevosita bog'liq bo'lib, materialning yorug'likka bo'lgan reaksiyasi tushayotgan nurlanish intensivligiga muvofiqligini aniqlaydi. Umuman olganda, nohiziqli yutilish va sindirish ko'rsatkichiga ega bo'lgan muhitdagi uchinchi tartibli nohiziqli singdiruvchanlikni odatda kompleks miqdor sifatida ko'rib chiqiladi:

$$\chi^{(3)} = \text{Re}\chi^{(3)} + i \cdot \text{Im}\chi^{(3)}, \quad (1.3)$$

bu yerda $\text{Re}\chi^{(3)}$ – muhitning sindirish ko'rsatkichini tavsiflovchi haqiqiy qismini, $\text{Im}\chi^{(3)}$ esa nohiziqli yutilish koeffitsientini harakterlovchi mavhum qismi bo'lib, lazer intensivligi ortishi bilan ortib boradi va quyidagi formula orqali ifodalanadi:

$$\text{Im}\chi^{(3)} = \frac{n^2 \varepsilon_0 c \lambda \beta}{2\pi}, \quad (1.4)$$

bu yerda n – muhitning nur sindirish ko'rsatkichi, c – yorug'likning vacuum muhitidagi tezligi, λ – lazer to'lqin uzunligi, β – nurlanish ta'sirida yuzaga kelgan muhitning nohiziqli yutilish koeffitsienti. Haqiqiy qism esa quyidagicha yoziladi:

$$\text{Re}\chi^{(3)} = 2n^2 \varepsilon_0 c \gamma \quad (1.5)$$

bu yerda γ – nohiziqli sindirish ko'rsatkichi. Ushbu formulalar yordamida lazer nurlanishining kuchli intensivligi ta'sirida muhitning nohiziqli

xususiyatlarini aniq va batafsil tasvirlash mumkin. Yuqori quvvatli lazer nurlanishining muhitga ta'siri natijasida uning optik parametrlari sezilarli darajada o'zgaradi va bu nochiziqli optik hodisalarning shakllanishiga olib keladi. Ayniqsa, kuchli intensivlik nurlanish ta'sirida, lazer nurining elektr maydoni materialning atom va molekulalaridagi elektron bulutini qutblanishiga olib keladi. Buning natijasida, materialning nur sindirish ko'rsatkichi o'zgaruvchan bo'lib qoladi.

1.1.1. Nochiziqli sindirish ko'rsatkichi

Nochiziqli sindirish ko'rsatkichi – lazer nurlanishining intensivligi oshganda muhitning sindirish ko'rsatkichi (n) ham intensivlikka bog'liq holda o'zgaradigan jarayon bo'lib, kuchli yorug'lik maydoni ta'sirida yuzaga keladi. Ushbu effektini eng ko'p namoyon qiladigan hodisa bu optik Kerr effektidir. Kerr effekti shuni ko'rsatadiki, nur sindirish ko'rsatkichi faqat muhitning tabiiy xossalari bilan emas, balki unga tushayotgan yorug'likning intensivligi bilan ham belgilanadi. Agar lazer nurlanishining intensivligi yetarlicha yuqori bo'lsa, materialning nur sindirish ko'rsatkichi qiymati sezilarli darajada ortadi yoki kamayadi, bu esa nurlanish yo'nalishini o'zgartiradi, fokuslash yoki defokuslash kabi xususiyatlarni kuchaytiradi. Shunday qilib, 1.2-ifodadagi uchinchi tartibli nochiziqli jarayonning intensivlikka bog'liq bo'lgan ikkinchi qismini 1.1-formulada berilgan chiziqli hadi bilan umumlashtirilsa, nochiziqli muhit tomonidan hosil qilingan Kerr nochiziqligi deb ataluvchi nur sindirish koeffitsientining matematik ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1.3)$$

bu yerda n_0 chiziqli nur sindirish ko'rsatkichi va n_2 nochiziqli nur sindirish koeffitsienti, u uchinchi tartibli nochiziqli qutblanish $\chi^{(3)}$ bilan bog'langan bo'lib, quyidagicha ifodalanadi: $n_2 = \frac{3}{8n_0^2 \varepsilon_0 c} \text{Re}(\chi^{(3)})$, ε_0 – vakuum dielektrik doimiysi, c — yorug'lik tezligi. (1.3)-ifoda shuni anglatadiki, sindirish ko'rsatkichi yorug'lik intensivligiga proporsional tarzda o'zgaradi. Agar $n_2 > 0$ bo'lsa, muhit **musbat nochiziqlilikka** ega bo'ladi va u **fokuslovchi linza** sifatida nurni yig'adi. Aksincha, agar $n_2 < 0$ bo'lsa, muhit **manfiy nochiziqlilikka** ega bo'lib, **sochuvchi linza** vazifasini bajaradi. Shunday qilib, nochiziqli sindirish ko'rsatkichi **nurning**

yo‘nalishini, fokuslash yoki defokuslash darajasini belgilovchi muhim parametr hisoblanadi.. O‘z-o‘zini fokuslash hodisasi yordamida ultratezkor lazer tizimlarining yuqori energiyali impuls olish uchun foydalaniladi.

Materialning n_2 sindirish ko‘rsatkichi, Kerr effekti ta‘sirida dinamik xususiyatga ega bo‘lib, uning qiymati materialning lazer nurlanishining o‘zgaruvchan elektr maydoniga javob berish mexanizmlariga bog‘liq holda shakllanadi. Bu mexanizmlar fotonlarning atom va molekulalar bilan o‘zaro ta‘sirida elektronlarning fazoviy holatini qisqa vaqt davomida modulyatsiya qilishni, shuningdek, optik qutblanishning vaqt bo‘yicha tezkor o‘zgarishlarini o‘z ichiga oladi:

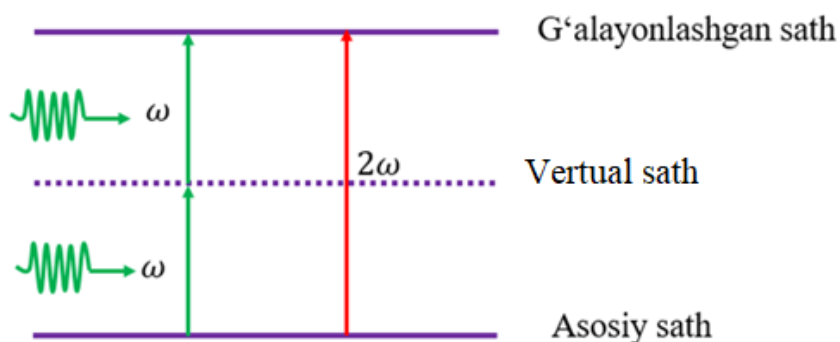
- ✓ elektronlar lazer impulsining o‘zgaruvchan elektr maydoniga tez javob beradi, odatda, 10^{-17} s tartibida sodir bo‘ladi;
- ✓ material ichidagi molekulyar tuzilmalarda elektr maydoniga javoban qayta tashkil etilishi mumkin, bu jarayon odatda 10^{-14} s miqyosida sodir bo‘ladi;
- ✓ kuchli lazer impulslari materialni ionlashtirib, plazma hosil qilishi mumkin, u elektr maydoniga 10^{-13} s tartibida xarakterli vaqt shkalasi bilan javob beradi;
- ✓ ayrim materiallar molekulyar tuzilmalarga ega bo‘lib, ular lazer impulsining elektr maydoniga javoban aylanishi yoki yo‘nalishini o‘zgartirishi mumkin. Ushbu aylanish dinamikasi odatda 10^{-12} s tartibida bo‘ladi [2; 1218-b.].

Umuman olganda, yuqori intensivlikdagi lazer nurlanishi ta‘sirida plazma muhitlaridagi sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishi muhitning nohiziqli optik javobini shakllantirishda asosiy rol o‘ynaydi. Bu jarayonlar natijasida, ultratezkor lazer-plazma o‘zaro ta‘sirida yuqori tartibli garmonikalar hosil qilinadi. Plazmaning sindirish ko‘rsatkichidagi vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchanlikni tushunish va boshqarish nohiziqli optikani lazer asosidagi qurilmalarda samarali qo‘llash, yuqori tartibli garmonikalarni hosil qilish jarayonini optimallashtirish va kerakli spektral xususiyatlarga erishish uchun juda muhim hisoblanadi.

1.1.2. Ikki fotonli yutilish

Yuqorida aytib o‘tilganidek, ikki fotonli yutilish uchinchi darajali nohiziqli optik jarayon bo‘lib, bu jarayonda atom yoki molekula asosiy

energetik holatdan uygʻotilgan holatga oʻtishi uchun bir vaqtning oʻzida ikkita fotonning yutilishi evaziga yuzaga keladi. Bu jarayonda atom yoki molekuladagi elektronlarning yuqori energiyali holatga oʻtishiga olib keladi. 1- rasmda koʻrsatilganidek, birinchi foton atom yoki molekula bilan oʻzaro taʼsirlashadi va elektronni mavjud energetik sathlar orasida mavjud boʻlmagan, vertual sath deb ataladigan oraliq energetik holatga olib chiqadi. Agar ikkinchi foton vertual holatning yashash vaqti ichida yetib kelsa, uning energiyasi elektronni haqiqiy yuqori energetik sathga koʻchirish uchun yetarli boʻladi. Aksi boʻlsa, vertual holatdagi elektron asosiy holatga qaytib, yutilish hodisasi sodir boʻlmaydi [3; 460-b.]. Demak, ikki fotonli yutilish ehtimoli, avvalo, vertual holatning yashash vaqti va fotonlar oqimiga bogʻliq boʻlib, nazariy hisoblashlarga koʻra vertual holatning yashash vaqti $\sim 1/\Delta E$ ga proporsional, bunda ΔE vertual holat va eng yaqin haqiqiy (real) energiya sath orasidagi energiya farqini ifodalaydi. Shu sababli, tashqi maydon chastotasi molekulyar tizimning rezonans chastotasiga yaqinlashganda, ikki fotonli yutilish ehtimoli sezilarli darajada ortadi. Bundan tashqari, ikki fotonli yutilish ehtimoli foton oqimiga bogʻliq boʻlganligi sababli, ushbu effektini kuzatishda yuqori intensivlikdagi lazer impulslarining qoʻllanilishi zarur hisoblanadi [3; 465-b., 4; 117-b., 5; 120701-3-b.]. Nur sindirish koʻrsatkichi va yutilish koeffitsienti singdiruvchanligining haqiqiy va mavhum qismlari bilan bogʻliq boʻlib, yutilish koeffitsientining intensivlikka chiziqli bogʻliqligi 1.3- ifodada bayon qilinganidek, nur sindirish koʻrsatkichi va intensivlik orasidagi bogʻliqlikka oʻxshash tarzda ifodalanadi:



1.1- rasm. Ikki fotonli yutilish jarayonini tushuntiruvchi sxema.

Nur sindirish koʻrsatkichi va yutilish koeffitsienti singdiruvchanligining haqiqiy va mavhum qismlari bilan bogʻliq boʻlib,

yutilish koeffitsientining intensivlikka chiziqli bog'liqligi 1.3- ifodada bayon qilinganidek, nur sindirish ko'rsatkichi va intensivlik orasidagi bog'liqlikka o'xshash tarzda ifodalanadi:

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \beta I \quad (1.4)$$

bu yerda α_0 - chiziqli yutilish koeffitsienti, β - nochiziqli yutilish koeffitsienti (ikki fotonli yutilish ham deyiladi). Nochiziqli yutilish jarayonini ikkinchi bobda Z- skanerlash metodini tavsiflashda batafsil to'xtalamiz.

Shu o'rinda ikki fotonli yutilish va ikkinchi garmonika generatsiyasi hosil bo'lish jarayonlari o'rtasidagi farq borasida savol yuzaga kelishi tabiiy hol. Ikkala jarayonda ham ikkita ω chastotali fotonlar yutiladi, lekin natijaviy hodisalar va ularning tabiatlari farq qiladi. Ikki fotonli yutilish – bu uchinchi tartibli nochiziqli jarayon bo'lib, bunda ikkita foton yutilishi natijasida elektron yuqori energiya holatiga ko'tariladi va bu jarayon rezonansga yaqin chastotada sodir bo'lganda ikki foton yutilish ehtimolligi yuqori holat bo'ladi. Ushbu jarayon davomida, yutilgan fotonlar asosiy tashqi maydonning chastotasi ω ga ega bo'lib, lekin bu fotonning chastotasi 2ω dan kichik bo'lishi mumkin va tushayotgan nurlanish bilan kogerentlikka ega bo'lmasligi mumkin. Ikkinchi garmonika generatsiyasi esa ikkinchi tartibli nochiziqli jarayon hisoblanib, bunda ikkita foton bir vaqtda yutilishi natijasida yuqori energiyali 2ω chastotali bitta foton hosil bo'ladi. Bu jarayonda atom yoki molekulaning ichki rezonans holatiga bog'liq bo'lmaydi, balki kuchli elektromagnit maydon va muhitning ikkinchi tartibli nochiziqli qutblanishiga asoslangan holda sodir bo'ladi [6; 210007-4-b.]. Hosil bo'lgan ikkinchi garmonika generatsiyasi hosil bo'lishiga turtki bergan lazer nurlanishi bilan kogerent bo'ladi. Shu sababli, ikki fotonli yutilish va ikkinchi garmonika generatsiyasining spektral va fazaviy xususiyatlari ham farq qiladi. Yuqori tartibli yutilish va garmonika generatsiyasi jarayonlariga ham shunday mulohazalarni qo'llash mumkin. Bunda rezonans yoki rezonanssiz tabiatni farqlash orqali ushbu jarayonlar hosil qilgan fotonlarning kogerentligini va energetik samaradorligini haqida xulosalar chiqariladi.

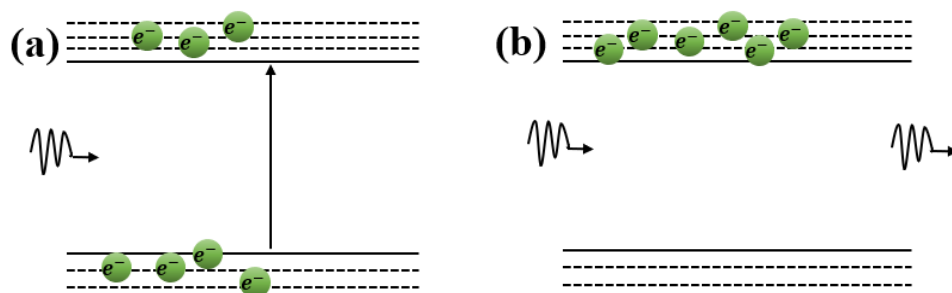
1.1.3.To'yinuvchi yutilish

To'yinuvchi yutilish jarayoni – bu lazer optikasida uchraydigan

muhim nohiziqli jarayonlardan biridir. Bu jarayonda muhitning yutilish koeffitsienti kuchli yorug‘lik intensivligi ta‘sirida pasayishni boshlaydi. Odatda, kichik intensivliklarda material o‘zgarmas yutilish ko‘rsatkichi bilan tavsiflanadi, lekin lazer nurlanishining kuchayishi bilan yuqori energitik sathdagi uyg‘otilgan elektronlar pastki energitik sathdagi elektronlar soniga teng bo‘lib, to‘yinish holatiga yetishi mumkin. Ushbu jarayon quyidagi shaklda matematik formula bilan ifodalanadi:

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_{sat}}} \quad (1.5)$$

bu yerda $\alpha(I)$ - intensivlikka bog‘liq yutilish koeffitsienti, I_{sat} - to‘yinish intensivligi bo‘lib, u muhitning to‘yinuvchan xossasini ifodalaydi va material xususiyatlariga bog‘liq bo‘ladi. Bu formuladan ko‘rinadiki, yuqori intensivliklarda elektronlar kuchli optik maydon ta‘sirida yuqori energetik holatlarga ko‘tariladi, natijada material ichida qo‘shimcha fotonlar yutilishi uchun zarur bo‘lgan quyi sathda elektronlar konsentratsiyasi kamayadi (1.2-rasm) va lazer nurlanishi intensivligi to‘yinish intensivligiga yaqinlashgan sayin yutilish koeffitsienti kamaya borishini ko‘rsatadi, ya‘ni yuqori energetik sathlarning ko‘pchiligi band bo‘lib, yangi fotonlarni yutish ehtimoli kamayadi. Bu jarayonga ega nohiziqli materiallar lazer sistemalarining samaradorligini oshirish va yuqori chastotali garmonika generatsiyasini optimallashtirish kabi vazifalarni hal qilishda xizmat qiladi.



1.2- rasm. To‘yinuvchi yutilish jarayonini tushuntiruvchi sxemasi.

Bu o‘z navbatida yuqori energiyali lazer impulslarini hosil qilish imkoniyatini beradi. Shuningdek, optik qisqartirish – bu texnologiya optik signalni samarali qayta ishlash uchun ishlatiladi, masalan, telekommunikatsiya tarmoqlarida to‘yinuvchi yutilish optik komponentlarda ishlatiladigan muhim hodisa bo‘lib, u asosan optik signalni modulyatsiya qilish, optik filtrlar yaratish va passiv modulyatsiyalash texnologiyalarida qo‘llaniladi.

Teskari to'yinuvchi yutilishLazer ixtiro qilingandan so'ng, ko'plab tadqiqotchilar lazer rezonatorlari ichida modulyator sifatida to'yinuvchi yutilishga asoslangan bo'yoqlarni o'rganishga kirishdilar. 1967 yilda ba'zi bo'yoq turlari uchun rezonator ichida lazer intensivligi oshishi bilan to'yinish pasayishi o'rniga ortishini kuzatdilar [7; 118-b.]. Bunday hodisada elektron dastlabki asosiy holatga qaytish o'rniga, qo'shimcha fotonni yutish orqali yangi, yuqoriroq energiya holatiga o'tadi. Agar uyg'otilgan holatdagi yutilish asosiy holatdagi yutilishdan katta bo'lsa, yutilish darajasi lazer intensivligi oshishi bilan ortadi va lazer impulsining intensivligi kamayishi bilan pasayadi. Ushbu hodisa teskari to'yinuvchi yutilish deb ataladi. Shuni ta'kidlash joizki, uyg'otilgan holatdagi elektronlarning yuqoriroq energetik sathga chiqishi lazer impulsining davomiyligiga ham bog'liq. Teskari to'yinuvchi yutilish nurlanish manbasining quvvatini cheklovchi, impuls amplitudasini kamaytiruvchi va energiya cheklovchi sifatida ishlatilishi mumkin. Shuningdek, teskari to'yinuvchi yutilish va to'yinuvchi yutilishning kombinatsiyasi yuqori quvvatli lazer kuchaytirgichlarining osilyator kuchaytirgich zanjirida rejimni qulflash va impulsni shakllantirishda qo'llaniladi. Bundan tashqari, teskari to'yinuvchi yutilish optik kompyuterlarda kirish va chiqish moslamasi vazifasini bajaradigan molekulyar fazoviy yorug'lik modulyatorini yaratishda foydalaniladi [8; 522-b.].

1.1.4. Yuqori tartibli nochizikli jarayonlar: yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi

Lazer impulslarining muhit bilan o'zaro ta'siri natijasida, nochizikli optik jarayonlar odatda uch guruhga ajratiladi [9;02403-3-b., 10; 210007-1-b.]:

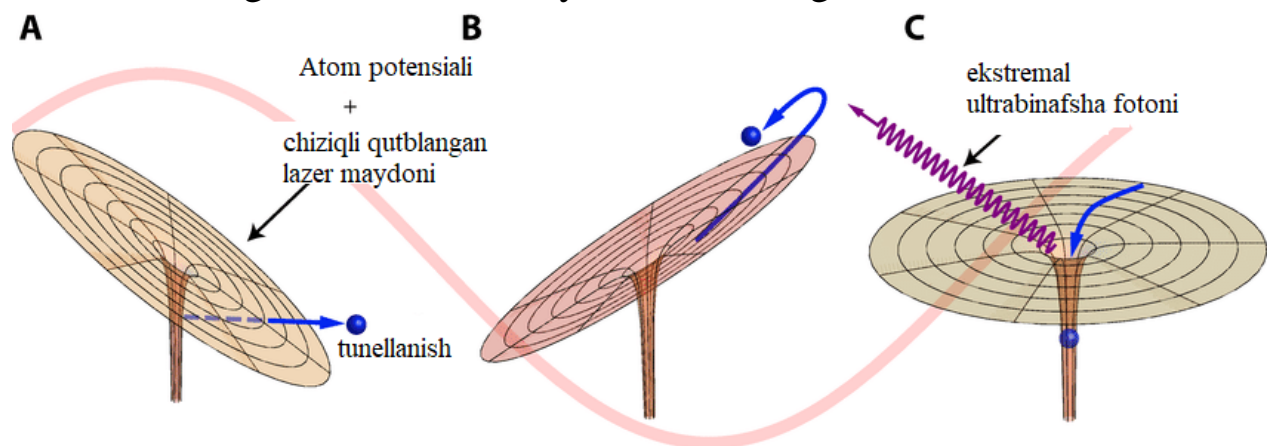
yorug'lik ta'sirida nur sindirish ko'rsatkichining o'zgarishiga olib keladigan nochizikli jarayonlar;

yorug'likning amplituda yoki intensivligini o'zgartiruvchi nochizikli jarayonlar;

yorug'likning to'lqin uzunligini o'zgartiruvchi nochizikli jarayonlar. Yuqorida birinchi va ikkinchi guruh nochizikli ta'sirlar tahlil qilindi. Uchinchi guruhdagi jarayonlar esa ultraqisqa lazer impulslarining muhit bilan o'zaro nochizikli ta'sirini qamrab oladi. Bu ta'sirlar natijasida asosiy

lazer chastotasidan bir necha marta katta bo'lgan, lekin to'liq uzunligi kichikroq bo'lgan yuqori energiyali fotonlarning kogerent nurlanishi yuzaga keladi. Vujudga kelgan yuqori chastotali nurlanish ekstremal ultrabinafsha sohasidagi spektrlarni shakllantiradi. Ushbu hodisa yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi (YuTGG) deb nomlanadi va hozirgi kunda dolzarb bo'lgan ultrabinafsha va rentgen nurlanish sohasida kogerent yorug'lik manbalarini yaratishda katta ahamiyat kasb etadi.

Garmonikalar hosil qilish jarayoni odatda lazer maydonining ta'siri ostida bitta atom bilan bog'liq ravishda izohlanadi, hamda yarim klassik yondashuv bo'lgan "uch qadam modeli" bilan tushuntiriladi [11; 1996-b.]. Bu model 1.3- rasmda sxemasi tasvirlangan bo'lib, unga ko'ra (A) kuchli elektromagnit maydon ta'sirida atomning tunnel ionlanishi natijasida erkin elektron hosil bo'ladi. (B) elektron potensial to'siqdan ozod bo'lgandan so'ng, tebranuvchi lazer maydoni ta'sirida yuqori energiya oladi – tezlashadi va (C) qaytadan ion bilan kuchli to'qnashadi. Nihoyat, elektron rekombinatsiyalashganda, tashqi maydondan olgan har qanday ortiqcha kinetik energiya yuqori energiyali foton sifatida chiqariladi. Bu uch bosqichli modelning xarakterli xususiyatlaridan biri garmonika



1.3-rasm. Uch qadam modelining prinsipial sxemasi [15; 315-b.].

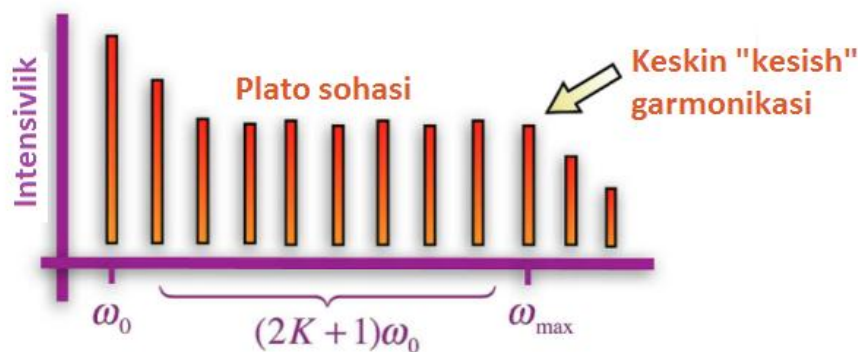
intensivligining keskin pasayishi (E_c – cuttof) bo'lib, keskin pasayish jarayoni orqali maksimal garmonika foton energiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$E_c = I_p + 3,17U_p \quad (1.6)$$

bu yerda I_p - namuna atomining ionlanish potentsiali, $U_p(eV) = 9.337 \cdot 10^{-14} \cdot I(W/cm^2) \cdot \lambda^2(\mu m^2)$ – pondermativ potentsiali, u lazer nurlanishining intensivligi va to'liq uzunligiga bog'liq bo'lib, lazer

maydonining elektron kinetik energiyasiga ta'sirini tavsiflaydi. Ushbu potensial energiya kuchli elektromagnit maydon ta'sirida elektronning harakatini tavsiflashda muhim rol o'ynaydi [12; 310-b.].

Izotrop muhitlarda hosil bo'lgan toq tartibli garmonikalar intensivligi dastlabki bir necha tartibda juda tez kamayadi. Keyingi tartiblarda esa intensivlik deyarli o'zgarmas bo'lib qoladi va ushbu barqarorlik sohasini "intensivlik platosi" deb ataladi. Intensivlik platosidan so'ng esa garmonikalar intensivligi keskin pasayishi - "kesish" jarayoniga uchraydi, bunda intensivlik bir necha garmonika tartiblari ichida tezda nolga tushadi. Bu jarayon YuTGG spektrida maksimal energiya chegarasini ko'rsatib beradi (1.6-formula qarang) va ushbu garmonikalarning intensivligidagi o'zgarishlarni harakterlovchi 1.4- rasmda tasvirlangan. Bu intensivlik platosi YuTGG spektrida muhim rol o'ynaydi, sababi uning davomiyliigi va garmonika intensivligining balandligi YuTGG jarayonining samaradorligini belgilab beradi. Plato davomida maksimal energiyaga yaqin garmonikalar hosil bo'ladi, bu esa qo'llanilgan lazer nurlanishi energiyasining optimal o'zlashtirilishini bildiradi. Intensivlik platosining oxiriga yetganidan so'ng, YuTGG spektrida keskin "kesish" jarayoni sodir bo'ladi. Ushbu kesish



1.4- rasm. Gaz holatidagi muhitda yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining prinsipial spektri [13; 97-b.].

nuqtasi YuTGG ning maksimal energiya chegarasini belgilaydi. Ushbu chegara "kesish energiyasi" (E_c) deb ataladi va uch bosqichli modelda yuqorida keltirilgan 1.6- formula bilan ifodalanadi.

Intensivlik platosi va keskin kesilish sohasi YuTGG spektridagi maksimal energiya chegaralarini belgilaydi, bu esa o'z navbatida, kogerent nurlanish sohasini yuqori energiyali rentgen nurlanishigacha kengaytirishga xizmat qiladi. Yuqori energiyali kogerent yumshoq rentgen nurlanishining tadbirlari, biologik tasvirlash va yarimo'tkazgich materiallar ishlab

chiqarishda foydalaniladigan texnologiyalar uchun diqqatga sazovor hisoblanadi. Ushbu kogerent nurlanishlar mikroskopiya sohasida noyob imkoniyatlar yaratib, 10-20 nanometrgacha bo'lgan aniqlikni ta'minlaydi. Xususan, "suv ko'zgusi" spektral diapazoni (284-543 eV) biologik tuzilmalarni yuqori kontrast bilan tasvirlash uchun katta ahamiyatga ega bo'lib, oqsillar va lipidlar o'rtasidagi farqni aniq ko'rsatadi [13; 95-b.]. Bunday kichikroq kogerent to'lqin uzunligidagi nurlanishga bo'lgan ehtiyoj esa fotolitografiya va integral mikrosxema ishlab chiqarish sohalarida yanada ixcham o'lchamdagi xususiyatlarni yaratishga yordam beradi. Shu bilan birga, fotolitografiya sohasidagi tadqiqotlar qisqa to'lqin uzunlikdagi yorug'lik manbalaridan foydalanish imkoniyatlarini rivojlantirishga qaratilgan bo'lib, zamonaviy yarimo'tkazgichlar ishlab chiqarishda yangi texnologik yutuqlarga erishish imkonitiga olib keladi [14; 810-b].

Shu bilan birga, cheklash mexanizmlarining YuTGG samaradorligiga ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, YuTGG hosil qilish jarayonida lazer nurlanishi va moddalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirning optik mexanizmlarini chuqur tadqiq qilish muhim ahamiyat kasb etadi. Ayniqsa, garmonikalar samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatuvchi omillarni aniqlash va ularni minimallashtirishga qaratilgan strategiyalarni ishlab chiqish orqali cheklash mexanizmlarni kamaytirish mumkin. Ushbu omillarni hisobga olgan holda, ko'p fotonli va tunnel ionlashishi mexanizmlarining YuTGG jarayonlarida ta'sirini o'rganish talabi yuzaga keladi.

1.1.5 Ko'p fotonli va tunnel ionlashishi

YuTGG samaradorligini oshirishda ko'p fotonli va tunnellanish ionlashuv jarayonlari hal qiluvchi rol o'ynaydi. Lazer intensivligining ma'lum bir qiymatlarida elektronlar atom yoki molekulani ionlashishi bilan lazer fotonlarini o'zlashtiradi yoki kuchli elektr maydonlari ta'sirida tunnellanish orqali ionlanish chegarasini oshib o'tadi. YuTGG jarayonlariga ta'sir etuvchi ko'p fotonli va tunnel ionlashuvi mexanizmlarini, shuningdek, Keldish parametri orqali bu ikki rejimni tavsiflash imkoniyatlarini ko'rib chiqamiz. Ushbu yondashuvlar YuTGG spektridagi yuqori tartibli garmonikalarni olish uchun lazer intensivligi va muhit parametrlarini tanlashda ilmiy asos yaratadi. YuTGG jarayonida lazer intensivligining darajasi ionlashuv mexanizmini tanlashda hal qiluvchi omil hisoblanadi.

Lazer intensivligini nazorat qilish uchun Keldish parametri γ qo'llaniladi, u elektronning Kulon to'sig'i orqali tunnellanish vaqti (τ) va lazer davri (T_0) orasidagi nisbatni ifodalaydi [15; 150-b.]:

$$\gamma = \frac{\tau}{T_0} = \sqrt{\frac{I_p}{2U_p}}. \quad (1.6)$$

Keldish parametri orqali yuqori garmonikalarni hosil qilish uchun optimal sharoitlarni aniqlash, intensivlik darajasini nazorat qilish va qaysi ionlashuv mexanizmi ustunlik qilishini nazariy va eksperimental kuzatish imkoniyatini taqdim etadi. Agar Keldish parametri $\gamma > 1$ bo'lsa, bu ko'p fotonli ionlashuv jarayonining ustunligini bildiradi. Bunday rejimda lazer intensivligi past darajada bo'lib, lazer maydoni elektronni kuchli tezlashtira olmaydi. Ko'p fotonli ionlashuv jarayonida ionlashish ehtimoli lazer maydonining intensivligiga eksponentsial bo'lmagan holda bog'liq bo'ladi [16; 1226-b.]. Bunda ionlashuv ehtimoli lazer intensivligi ortgani sari keskin oshmaydi, balki yutilgan fotonlar soniga proporsional tarzda, asta-sekin ortib boradi.

Agar Keldish parametri $\gamma < 1$ bo'lsa, bu kuchli elektr maydoni ta'sirida elektronning to'g'ridan-to'g'ri tunnellar jarayonini boshlashini ko'rsatadi. Tunnel ionlashuvi yuqori intensivlikka ega lazer maydonida amalga oshadi va elektron potentsial to'siqni lazer maydoni ta'sirida yengib o'tadi. Ushbu jarayon YuTGG jarayonlari uchun muhim bo'lib, yuqori intensivlikli lazer nurlanishi uchun ideal hisoblanadi, chunki tunnellar jarayoni kogerent nurlanish hosil bo'lishi uchun zarur bo'lgan qayta rekombinatsiyani ta'minlaydi. Tunnel ionlashuvi ko'pincha eksponentsial qonuniyatga asoslangan va lazer maydoni intensivligiga yuqori sezgirlik bilan tavsiflanadi. YuTGG samaradorligini oshirish uchun lazer maydoni shunday tanlanishi kerakki, Keldish parametri γ tunnel ionlashuv rejimiga mos bo'lishi kerak.

Lazer intensivligi $\gamma \ll 1$ bo'lishidan ham yuqori darajaga yetib, lazer maydonining magnit komponenti ham e'tiborga olinadigan darajaga yetsa, to'siqni yengib o'tish ionlashuvi (*Barrier Suppression Ionization*) yuzaga keladi. Bu holatda lazer maydoni shunchalik kuchli bo'ladiki, elektron Kulon to'sig'ini to'liq yengib o'tib, deyarli to'siqsiz ionlanadi. Bunday yuqori intensivlikda YuTGG samaradorligi pasayadi, chunki elektronlar

qayta rekombinatsiyalashmaydi va kogerent nurlanish hosil bo'lmaydi. Ushbu intensivlik qiymatida Lorenz kuchi ham elektron traektoriyasiga ta'sir eta boshlaydi, natijada elektron ona iondan uzoqlashadi va qaytib kelmaydi [17;01243-2-b.].

Ko'p fotonli ionlashuv past intensivliklarda ishlaydi va boshqarilishi oson, biroq yuqori energiyali garmonikalarni hosil qilishda tunnellanish ionlashuvida yuzaga keladigan YuTGG dek yetarli samaradorlik bermaydi. Bu jarayonlarni yanada aniqroq tasvirlash uchun Ammosov-Delon-Krainov (ADK) formulasi keng qo'llaniladi [18; 139-b.]. ADK modeli tunnellanish ionlashuvi tezligini hisoblash uchun qulay usul bo'lib, kuchli lazer maydonlarida elektron tunnellanish dinamikasini aniqroq tavsiflash imkonini beradi. Shuning uchun YuTGG samaradorligini oshirish uchun nafaqat muhitning ionlanish potentsiali, balki lazer parametrlarini ham ehtiyotkorlik bilan tanlash zarur, bu esa YuTGG jarayonining samaradorligini oshirishga yordam beradi. Shu bilan birgalikda, yuqori tartiblarni hosil qilishda faza moslashuvi va rezonans kuchayishi kabi o'xshash talablarni qo'yadi. Quyi garmonika jarayonlarni turli muhitlarda o'rganish orqali YuTGG parametrlarini optimallashtirish va yuqori samaradorlikka erishish uchun muhim yo'nalishlar aniqlash mumkin.

1.2. § Yonish alangalarida uchinchi tartibli nochiziqli jarayonlar

Nochiziqli jarayonlar ichida uchinchi garmonikaning generatsiyasi lazer nurlanishining chastotasini uch marta oshirish orqali ultrabinafsha spektr sohasida kogerent va yuqori intensivlikka ega nurlanishni hosil qilishga imkon beradigan samarali usul hisoblanadi. Ushbu usul infraqizil chastotadagi lazer nurlanishini ultrabinafsha (quyi tartibli garmonikalar) va ekstremal ultrabinafsha (yuqori tartibli garmonikalar) diapazonlarga o'zgartirish imkonini yaratadi. Ayniqsa, YuTGG lazer impulslaridan attosekund davomiylikdagi yuqori chastotali nurlanishni olishda foydalaniladi, bu esa zamonaviy ilmiy va texnologik tadqiqotlarda muhim o'rin tutadi [19; 143901-1-b.]. Ushbu imkoniyat yuqori tezlikda o'zgaruvchan va ultratezkor jarayonlarni tadqiq qilishda, shuningdek, yuqori aniqlik talab qiladigan mikroskopiya, spektroskopiya va optik hisoblash texnologiyalarida muhim ahamiyat ega [20; 168-b.].

Yonish jarayonida uglerodli nanozarralar hosil bo'lishi samaradorlikni oshirish va ifloslanishni kamaytirish imkonini beruvchi dolzarb texnologik yondashuvlardan hisoblanadi [21; 109-114-b.]. Ushbu nanozarralarning o'ziga xos strukturaviy va morfologik xususiyatlarini o'rganish orqali ularning yonish jarayoniga ta'sirini chuqur tushunish va samarali boshqarish imkoniyati yaratadi. Shu maqsadda, zarrachalarning konsentratsiyasi, hajmi, va kimyoviy tarkibini aniqlash uchun optik diagnostika usullari, masalan, dinamik yorug'lik sochilishi va yuqori chastotali lazer nurlanishidan foydalaniladi [22; 616-b.]. Ultrabinafsha sohasidagi lazerlar orqali sochilish texnikasi nanozarralarning yorug'lik bilan o'zaro ta'sirini aniqlash uchun keng qo'llaniladi va bu bilan zarrachalarning morfologik xususiyatlarini samarali baholashga imkon beradi. So'nggi tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, filamentatsiya shaklidagi nochiziqli spektroskopiya usuli nanozarralar va plazmalarni yuqori aniqlikda tahlil qilishda samarali vosita bo'lib, yonish mahsulotlarini aniqlashda foydali hisoblanadi. Bu yondashuv nanozarralarning o'sish jarayonini va ular bilan bog'liq optik nochiziqli jarayonlarni boshqarishda yangi imkoniyatlar eshigini ochadi va yonish samaradorligini oshirish uchun istiqbolli usullarni rivojlantirishga xizmat qiladi [23; 729-b.]. Boshqa tomondan, kuchli va qisqa lazer impulslarining ta'siri natijasida hosil bo'ladigan filamentatsiyada yuqori intensivlik darajasi nochiziqli garmonika chastotalarini hosil qilishga olib keladi [24; 800-b., 25; 436-b.]. Filamentatsiya ichidagi yuqori intensivlikli nurlanish lazer spektrining kengayishiga yordam beradi va yuqori chastotali yorug'lik komponentlarini shakllantiradi [26; 011111-1-b.]. Ultrabinafsha spektral diapazonidagi ultraqisqa impulslarni ishlab chiqarish sohasida uchinchi garmonikalar generatsiyasi samaradorligi yuqori bo'lgan usullardan biri hisoblanadi. Masalan, femtosekundli yaqin infraqizil (800 nm) asosiy lazer impulslarining havo muhitida filamentatsiyasi natijasida uchinchi garmonika generatsiyasi uchun 0,2% gacha almashtirish samaradorligiga erishilgan [21; 109-114-b.]. Shu bilan birga, uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligiga uchinchi tartibli Kerr nochiziqliliklarining katta ta'siri kuzatilgan. Kerr nochiziqlilik jarayoni natijasida muhitning sindirish ko'rsatgichi o'zgaradi va lazer nurlanishi uchun muhit qo'shimcha linza vazifasini bajaradi, bu esa muhitda hosil bo'layotgan nochiziqli

jarayonlar kuchayishini ta'minlaydi. Buni hisobga olgan holda, uchinchi garmonika generatsiyasining yanada samarali kechishini ta'minlovchi optimal parametrlar tadqiq etilmoqda. Xususan, lazer nurlanishi shaklining o'zgarishi va izotrop muhitning qo'shimcha linza vazifasini bajarish asnosida kuchsiz energiya almashinuvi jarayonlarini shakllantirish uchun nazariy hisob-kitoblar orqali tahlil qilingan [27; 1092-1096-b.]. Yonish alangalarida nochiziqli jarayonlarning paydo bo'lishi, ayniqsa, uglerod asosidagi nanozarralarning mavjudligi bilan bog'liq. Uglerod tarkibli nanozarralar yonish jarayonlarida asosiy rol o'ynaydi va ushbu zarrachalar yuqori darajadagi gidrofobik xususiyatlarni namoyish etadigan qatlamlar hosil qiladi. Xususan, nanozarralarning alanga harorati ta'sirida yig'ish mexanizmi batafsil o'rganilgan [28; 1-11-b.].

Kelajakdagi optoelektronik qurilmalar uchun yuqori samaradorlikka ega va ixcham dizayn talablari asnosida, bu texnologiyalarni qulay foydalanish imkoniyatlari bilan ta'minlashga qaratilgan yondashuvlarni talab qilmoqda. Bunday maqsadlarga erishish uchun nanomateriallar istiqbolli yechim sifatida namoyon bo'ladi [29; 114304-2-b.]. Nanomateriallar sezgirlikning yuqoriligi, tashqi optik ta'sirga qisqa javob berish vaqtlari va energiya tejamkorligi bilan yuqori ishlash ko'rsatkichlarini ta'minlaydi, bu esa ularni zamonaviy optoelektronik tizimlar uchun optimal yechim sifatida qaraladi.

1.3. § Nanozarralarning nochiziqli va termo-optik xossalari

Yonish alanagari ta'sirida hosil bo'ladigan uglerodli nanozarralar yuqori samarali chastota almashtirishiga ega bo'lsada, bu nanozarralarni alangadan ajratib olish hozirgi kundagi dolzarb muommalardan biri hisoblanadi. Shu sababli, an'anaviy usul, ya'ni qattiq jismlar sirtidan lazer ablatsiyasi yordamida suyuqliklarda olinadigan nanozarralar ham o'ziga xos optik va nochiziqli xossalari bilan ajralib turadi. Bu nanozarralar turli spektral diapazonlarda yuqori sezgirlikka ega bo'lib, lazer ablatsiyasi orqali ularning o'lchami, shakli va konsentratsiyasini boshqarish imkoniyati mavjud. Ayniqsa, ablatsiya jarayonida kolloid suspenziyalarda shakllangan nanozarralar lazer nurlanish impulslari bilan o'zaro ta'sirida yuqori sezuvchanlik xossalari ko'rsatadi, bu esa nochiziqli jarayonlarning

samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etadi. So‘nggi yigirma yil ichida metall nanozarralar o‘ziga xos fizik va kimyoviy xususiyatlari tufayli ilmiy jamoatchilik orasida keng qiziqish uyg‘otdi. Ushbu ablatsiya usuli bilan olingan nanozarralar yuqori sezgirliги, kichik o‘lchamlari va optik o‘zgaruvchanligi sababli ilmiy tadqiqotlarda va turli texnologik qo‘rilmalarda muhim ahamiyat kasb etdi [30; 45129-b.]. Nanozarralardagi kvant cheklash effekti ularning yuqori nochiziqli optik javobini sezilarli darajada oshiradi, hamda optik va nochiziqli optik tajribalarda keng foydalanish imkoniyatlarini taqdim etadi [31; 571–576-b.]. Masalan, oltin va kumush kabi qimmatbaho metall nanozarralari yorug‘likning ko‘rinadigan spektr sohasida o‘ziga xos sirt plazmon rezonansi (SPR) bilan ajralib turadi. SPR xususiyatlari tufayli bunday metall nanozarralari past va yuqori tartibli nochiziqli javoblarni kuchaytirishga imkon beradi [32; 31066-b.]. Bunga qo‘shimcha ravishda, Zn metali va uning oksidlari kabi boshqa metall nanozarralari ham o‘ziga xos optik xususiyatlari bilan ilmiy va texnologik qiziqish uyg‘otmoqda [33; 12-b., 34; 76-b.]. Zn nanozarralari nafaqat qishloq xo‘jaligi sohasida, balki antibaktrial xususiyatlari sababli tibbiyotda, kimyo, to‘qimachilik va oziq-ovqat mahsulotlarini qayta ishlash kabi sohalarda, shuningdek yuqori elektr o‘tkazuvchanligi tufayli elektronikada keng qo‘llanilmoqda [7; 119-b., 10; 210007-3-b.]. Zn va rux ZnSe nanozarralari tarkibi, morfologiyasi va kristall xossalari bilan ajralib turadi. ZnSe 300 K haroratda to‘g‘ridan-to‘g‘ri keng polosali (2,68 eV) bo‘lib, istiqbolli optoelektrik va elektr xususiyatlari tufayli II-VI guruhiga mansub yarimo‘tkazgichlar orasida muhim o‘rin tutadi. Uning bu xususiyatlari uni turli texnologik qurilmalar uchun, xususan, optik va elektron komponentlari ishlab chiqarishda muhim ahamiyat kasb etadi. ZnSe nanozarralarini olish uchun bir necha usullar, jumladan, kimyoviy qaytarilish [36; 35-b.], bug‘ sintezi [37; 3314-b.] va lazer ablatsiyasi [38; 472-b.] kabi usullar keng qo‘llaniladi. Ayniqsa, kimyoviy qo‘shimchalarsiz sof ZnSe nanokristallarini yaratish uchun impulsli lazer ablatsiya usuli alohida e‘tiborga loyiq bo‘lib, bu usul yordamida yuqori chastotali Nd:YAG lazerining asosiy garmonikasi orqali ikki xil suyuq muhit – etanol va aseton ichida ZnSe nanozarralarini olish mumkinligi aniqlangan. [39, 905–914-b.]. Bu muhitlar nanokristallar morfologiyasi va kristall tuzilishiga ta’sir

ko'rsatadi, hamda hosil bo'lgan nanozarralarning o'lchamlari, shakli va xususiyatlarini boshqarish imkoniyatini beradi. Aseton va etanolda sintez qilingan ZnSe nanozarralarining o'rtacha o'lchamlari 17 nm va 25 nm, standart og'ishlari mos ravishda 13 nm va 12 nm. Bundan tashqari, asetonda sintezlangan ZnSe nanozarralari etanolda sintezlanganlarga nisbatan torroq o'lchamdagi taqsimotni namoyish etadi. ZnSe nanozarralarining sezilarli cho'kishi etanolga nisbatan asetonda kuzatiladi, bu etanolning yuqori yopishqoqligi bilan bog'liq.

Quyi va yuqori tartibli noxiziqli optik xarakteristikalar nanozarralarni fotonika qurilmalari uchun potensial maqsadlar sifatida tasniflash va kogerent extremal ultrabinafsha nurlanishini yaratish uchun muhim hisoblanadi [40; 325-b.]. Zn atomidan tashkil topgan nanokristallar lazer spektroskopiyasida, nurlanish chastotasini almashtirishda va yorug'lik chiqaradigan diodlarda [41; 2-b.], shuningdek, biotasvir va kimyoviy zondlashda qo'llanish imkoniyatlarini kengaytiradi [42; 10721-b.].

Nanozarralarning termo-optik xususiyatlari lazer rezanatorida nurlanishni boshqarish, quyosh energiyasini almashtirish, fotokatalizator qurilmalarida, fototermik terapiyada qo'llanilishi tufayli olimlar tamonidan kata e'tiborga sazovor bo'lmoqda [44; 783-b.]. Tadqiqotchilar fototermik saraton terapiyasi uchun optimal plazmonik nano-isitgichlarni aniqlash uchun sichqonlarda sinovdan o'tkazishdi. Bu tajribalar nanozarralarning termo-optik xususiyatlarini, ularning o'lchamlarini, hamda qanday materialdan olingani va yorug'lik to'lqin uzunligi o'rtasidagi to'g'ri kombinatsiyaga bog'liq [45; 3729–3745-b.]. Nanozarralarda termik linzalar effektini tushunish va to'g'ri modellashtirish noxiziqli optik tajribalarida, ayniqsa yuqori quvvatli uzluksiz lazerlaridan foydalanganda bu bilimlar muhim hisoblanadi. Shunday tadqiqotlardan birida yuqori chastotali lazerlar bilan Z-skanerlash usulini qo'llashda hosil bo'ladigan issiqlik ta'sirlarini boshqarish uchun sodda va samarali yondashuv taklif etilgan [46; 7976-b.]. Bu usul Z-skanerlash signalining vaqt bo'yicha o'zgarishini aniq qayd etib, ma'lumotlarni vaqt korrelyatsiyasi texnikalari yordamida tahlil qilishga imkoniyat yaratadi. Bu orqali namunaning noxiziqli optik xossalari haqida ma'lumotlar olinadi va o'lchash yanada aniqroq amalga oshiriladi. Ushbu usul, ayniqsa, past takrorlash chastotali yorug'lik manbalari bilan olingan

qiymatlarni yuqori aniqlikda moslashtirish imkonini beradi.

Bu kabi eksperimentlar lazer impulslari bilan o‘zaro ta’sirning murakkab tomonlarini samarali tushunishga yordam beradi va nanozarralarning yuqori quvvatli lazer tizimlarida va fotonika sohalarida qo‘llanilishi uchun qimmatli ma’lumotlarni taqdim etadi. Bundan tashqari, yuqori garmonikalar generatsiyasi jarayonida kvazi-fazaviy moslashishni ta’minlash uchun zarur sharoitlarni yaratishda nanozarralarning termo-optik va quyi nohiziqli parametrlarining roli alohida ahamiyatga ega ekanligini ta’kidlash joiz. Ushbu xususiyatlar lazer plazmasida qo‘lanilayotgan lazer nurlanishi va hosil qilinayotgan garmonikalar orasida kvazi-fazaviy moslashishiga olib kelishi mumkin, bu esa o‘z navbatida yuqori samarali garmonikalar hosil qilish imkonini yaratadi va nanozarralar asosidagi yangi texnologik yondashuvlarning rivojlanishiga xizmat qiladi.

1.4. § Yuqori tartibli garmonika generatsiyasini samaradorligini oshirish

Rentgen nurlanishi sohasida kogerent manbalarni yaratishdagi yutuqlar DNK va oqsillarning tuzilishini aniqlashdan boshlab, atomlar, molekulalar va materiallarni nano-miqyosda kuzatishga imkon beruvchi dolzarb kashfiyotlarga yo‘l ochadi. Bunday kashfiyotlarga bo‘lgan intilish orqali rentgen nurlanishli erkin elektron lazer manbalarining rivojlanishi jadallashdi; bu lazerlar muhitning o‘ta uyg‘otilgan holatini yaratish yoki bitta biomolekulaning tuzilishini aniq tasvirlash kabi yangi ilmiy yutuqlarga zamin yaratishi mumkinligi kutilmoqda [47; 5612-b., 48; 711-bet, 49; 1853-bet]. Sinxrotronga asoslangan manbalar juda qimmat bo‘lib, tajribalar faqat katta mablag‘lar hisobiga qurilgan maxsus inshootlarda o‘tkazilishi mumkin. Shunga qaramay, kogerent rentgen nurlarini yaratish uchun bir qator yangi usullar ishlab chiqilmoqda. Bunday rentgen nurlanishini hosil qilish uchun lazerning juda yuqori quvvatga ega bo‘lishi zarur, chunki rentgen chastotalarida energiya nurlanish intensivligi chastota oshgan sari sezilarli darajada ortadi. Bunga qo‘shimcha ravishda, vakuum ultrabinafsha yoki rentgen chastotalarida rezonator ko‘zgusi sifatida foydalanish uchun mos materiallarni topish ham katta qiyinchilik tug‘diradi. Shu sababli, rentgen manbasi sifatida gaz yoki qattiq jism sirtida hosil qilingan plazma

ishlatiladi va rezonator zarur bo‘lmaydi, chunki bu chastotalarda yuqori aks ettiruvchi materiallar mavjud emas [50; 023255-1-bet]. Ushbu “rentgen lazerlari” sinxrotron manbalariga nisbatan kamroq joy talab qiladi va nisbatan arzon narxlarda samarali rentgen nurlanishini hosil qilish imkoniyati mavjud. YuTGG texnikasidan foydalanib ishlab chiqarilgan rentgen nurlari ba’zi klassik manbalar bilan raqobatlashadigan spektral yorqinlikka ega [51; 1515-bet]. YuTGG yordamida femtosekunddan attosekundgacha bo‘lgan qisqa impuls davomiyligi elektronlar, atomlar va molekulalarning birgalikdagi dinamik harakatini real vaqtda kuzatish imkoniyatini beradi. Shuningdek, YuTGG boshqa ilmiy tadqiqot sohaslarida yuqori energiyali fotonlar manbai sifatida ham muvaffaqiyatli qo‘llanilmoqda [52; JM1A.2-b.].

An’anaviy YuTGG usulida manba sifatida gazsimon muhitlardan foydalanilgan. Biroq, gaz manbalarning cheklanganligi sababli, gaz xossalari asoslangan YuTGG jarayonidagi garmonikalarning xususiyatlarini o‘rganish imkoniyatlari ham chegaralangan. Shu sababli, YuTGG yaratish jarayonida gaz oqimi o‘rniga lazer nurlanishini qattiq jisimli nishonlar yuzasiga yo‘naltirish orqali plazma holatidagi muhitlardan foydalanish afzalligini ko‘rsatadi [30; 45129–45144-b.]. Bu usul yordamida plazmalarda hosil bo‘layotgan YuTGG ga ta’sirini yanada kengroq miqyosda o‘rganishga imkon beradi va lazer nurlanishi energiyasini yuqori energiyali fotonlarga almashtirish samaradorligini oshirishda turli xossalarga ega nishon materiallarini tadqiq qilish imkoniyatini taqdim etadi. Xususan, uglerod nanostrukturalari (masalan, fullerenlar va uglerod nanotrubkalar) va boshqa metallar asosidagi nanoo‘lchamli zarrachalardan iborat nishonlarda hosil bo‘lgan plazma YuTGG uchun samarali manba sifatida yangi imkoniyatlar yaratadi. Gaz holatidagi muhitlar sonining cheklanganligi va ularning nanoo‘lchamli klasterlar hosil qilish qobiliyatining yo‘qligi plazma holatidagi muhitlarga nisbatan ularning kamroq qo‘llanilishiga sabab bo‘ladi. Qattiq jisimli nishonlardan foydalanish YuTGG samaradorligini oshirishda bir qancha afzalliklarga ega. Avvalo, qattiq jisimli materiallarning keng tanlovi turli atom va molekulyar xususiyatlardan foydalanishga imkoniyat yaratadi. Lazer ablatsiyasi orqali nano va mikroo‘lchamdagi zarrachalarni hosil qilish plazma rezonansini

kuchaytirishga va faza moslashtirishni optimallashtirishga yordam beradi [31; 571–576-b.]. Yuqori sezuvchanlikka ega nanozarralar, masalan, uglerod nanostrukturalari va qimmatbaho metall zarrachalari YuTGG jarayonida yuqori sifatli garmonikalarni olish imkoniyatiga ega.

Shu bilan birga, YuTGG jarayonining samaradorligi, ayniqsa, plazma garmonikalarini shakllantirishda, turli omillarni optimallashtirish orqali maksimal darajaga yetkazilishi mumkin. Bunga quyidagilar kiradi:

- qizdirish impulsining intensivligi va davomiyligini o'zgartirish;
- qizdirish impulsi va zondlovchi impulslar o'rtasidagi kechikish vaqtini nazorat qilish;
- zondlovchi nurlanishning plazma alangasidagi fokal holatini boshqarish;
- zondlovchi nurlanishning chirpirlanganligini sozlash;
- klaster va nanozarralardan tashkil topgan nishonlardan foydalanish;
- plazmaning fizik xususiyatlarini optimallashtirish.

Ushbu omillarni birgalikda boshqarish yuqori tartibli garmonikalarning intensivligi va samaradorligini maksimal darajada oshirishga xizmat qiladi.

1.4.1. Nanozarralardan tarkib topgan plazmada yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi

So'nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, lazer ablatsiyasi orqali hosil qilingan nanozarralar YuTGG jarayonida samarali manba sifatida ishlatilishi mumkin. Ushbu nanozarralar YuTGG jarayonida yuqori darajali garmonikalarni hosil qilishda kuchli SPR va intensiv lokal elektr maydonlarini yaratadi. SPR hodisasi yuzaga kelganda, nanozarralar yuzasidagi elektronlar lazer nurlanishi ta'sirida birgalikda tebranadi va bu tebranish natijasida hosil bo'ladigan mahalliy maydon sezilarli darajada kuchayadi. Kuchaygan maydon YuTGG samaradorligini oshirishda muhim rol o'ynaydi, chunki bu holatda hosil bo'ladigan garmonikalar yuqori intensivlikka ega bo'ladi. Bundan tashqari, nanozarralar tarkibidagi SPR hodisasi YuTGG jarayonida yuqori tartibli garmonikalarni hosil qilish uchun samarali rekombinatsiya jarayonlarini ta'minlaydi [51; 1517-b.]. Shunday tadqiqotlardan birida lazer yordamida nishon sirtida hosil qilingan plazma holatidagi muhitda ZnO nanozarralari bir to'liq uzunligida va

ikkita to‘lqin uzunligidagi lazer nurlanishlarining komnatsiyasi yordamida YuTGG sxemalarini hosil qilish uchun samarali manba sifatida qo‘llanilgan. Natijada 27-tartibgacha bo‘lgan YuTGG hosil qilish imkoniyatlari ko‘rsatilgan [53; 665-bet]. Mahalliy SPR chastotalariga yaqin sohada hosil bo‘ladigan kuchaygan nochiziqli optik javob orqali YuTGG samaradorligini oshirish imkoniyati yuzaga keladi. Ayniqsa, piramida shaklidagi oltin nanoantennalar yuzasida yuzaga keladigan kuchaygan elektr maydoni yaqin joylashgan gaz atomlarining nochiziqli javobini kuchaytirishi tufayli YuTGG jarayonining energetik samaradorligini oshirishga yordam beradi [54; 759-bet].

Shu bilan birga, nanozarralar sintezi uchun yuqori takrorlanuvchanlik va iqtisodiy samaradorlikka ega nochiziqli optik nanozarralarni ishlab chiqarish maqsadida turli sintez yondashuvlari o‘rganilgan. Har bir usul o‘ziga xos afzallik va kamchiliklarga ega bo‘lib, ba’zilar qo‘shimcha kimyoviy birikmalar talab etadi. Masalan, kimyoviy qaytarilish [55; 1935-b.], sol-gel [56; 451-b.], kimyoviy bug‘larni cho‘ktirish [57; 401-b.], mikroemulsiya [58; 114-b.], gidrotermik [59; 1381-b.] va aerosol pirolizasi [60; 796-b.] kabi usullar ko‘pincha qo‘shimcha stabilizatorlar, yuqori harorat, bosim va boshqa maxsus sharoitlarga evaziga amalga oshiriladi, bu esa ularning ayrim kamchiliklarga olib keladi. Shu bilan birga, suyuq fazali usullar tejamkorlik va boshqariladigan strukturalarni yaratish imkoniyatini taqdim etib, laboratoriya sharoitida turli nanozarralarni sintez qilishda keng qo‘llaniladi [61; 949-b.]. Femtosekundli lazer impulslari yordamida nanozarralar sintez qilish usuli yuqori tozalikka ega, bir xil o‘lcham va sferik shakldagi nanozarralarni olish imkonini beradi. Ushbu ablatsiya usuli nanozarralar hosil qilishda qo‘shimchalar kiritilmasligini ta’minlaydi va lazer nurlanishining asosiy parametrlarini sozlash orqali zarrachalar hajmini boshqarish imkoniyatini beradi [62; 491–498-b.]. Lazer ablatsiyasi texnologiyasi yordamida turli metall va oksidli nanozarralar sintez qilinishi mumkin bo‘lib, ular o‘zining optik, elektr va kimyoviy xususiyatlari bilan ajralib turadi. Bu xususiyatlar ularni katalizatorlar, elektronika va biotibbiyot sohalarida keng qo‘llash imkoniyatiga olib keladi [63; 105-b.]. Suyuqliklarda lazer ablatsiyasi yordamida olingan nanozarralar kimyosi va morfologiyasini nazorat qilish imkoniyati mavjudligi bilan bir qatorda, bu

o'lcham nazorati hosil bo'lgan zarrachalarning dispersiyasi va barqarorligini oshirishga yordam beradi. Lazer ablatsiyasi yordamida tayyorlangan nanozarralar kimyoviy qo'shilmalar talab etmaydi, bu esa ulardan atrof-muhitga kam chiqindi hosil qiluvchi materiallar sifatida foydalanish imkonini yaratadi [64; 013103-3-b., 65; 13152-b., 66; 125502-b.]. Biroq, an'anaviy lazer ablatsiya jarayonida nanozarralarning o'lcham taqsimoti, aglomeratsiya va kristall tuzilishini nazorat qilish qiyinligi bilan ajralib turadi, chunki nanozarralar atom yoki molekulalarning tasodifiy *Brown* harakati asosida hosil bo'ladi. Tafovutlarni kamaytirish uchun ko'p energiya sarflanadi. Natijada, yaqinda ablatsiya jarayonida nanozarralarning juda tor o'lchamdagi taqsimotlar muvaffaqiyatli qo'lga kiritildi [67; 753-758-b.]. Yakuniy o'lcham taqsimotiga ko'plab omillar ta'sir qilishi bilan izohlanadi. Xususan, sirt faol moddalari molekulalarining mavjudligi nanozarralar o'lchamidagi taqsimotni shakllantirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Nanozarralarning kichik o'lchamdagi dispersiyasiga erishish uchun lazer intensivligi, nurni fokuslash va takrorlash tezligi kabi lazer nurlanish parametrlari diqqat bilan tanlash zarur. Bundan tashqari, materialning xossalari plazma parametrlariga ta'sir ko'rsatadi, bu esa ablatsiya qilingan materialning ta'sir ko'rsatayotgan yorug'likni yutiluvchanligi va miqdorini ifodalaydi. Shu sababli, morfologiya bilan boshqariladigan nanozarralarni ishlab chiqarish uchun bir qancha ilg'or lazer ablatsiya texnikalari ishlab chiqilgan [68; 865-b.].

Shuningdek, lazer ablatsiyasi yordamida olingan nanozarralardan tarkib topgan plazma YuTGG hosil qilishda istiqbolli muhit sifatida xizmat qiladi. Ushbu muhitning yuqori samaradorligi nanozarralarning fizik xususiyatlari va plazmaning optik parametrlari bilan chambarchas bog'liq. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, vakuumda davomiyli pikosekund bo'lgan lazer impulslari yordamida oltin nishonlardan ablatsiya qilingan sferik nanozarralardan iborat plazma YuTGG samaradorligini sezilarli darajada oshiradi [69; 291-bet]. Shu bilan birga, yarimo'tkazgich materiallarining kvant nuqtalarini o'z ichiga olgan plazmalarda ham YuTGG jarayonida samarali garmonikalar hosil bo'lishi mumkinligi ko'rsatildi [70; 35018-bet]. Masalan, indiy va uning oksidi nanozarralarini o'z ichiga olgan plazmada YuTGG ning rezonansli kuchayishi kuzatildi [71; 23421-bet]. Ushbu

tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatadiki, monomerlar yoki nanozarralar YuTGG samaradorligiga muhim hissa qo'shuvchi omillardan biri sanaladi. Bu omillar, o'z navbatida, lazer nurlanishi bilan o'zaro ta'sirlashayotgan plazmaning o'ziga xos parametrlari bilan chambarchas bog'liq. Ayniqsa, indiy nishoni yordamida olingan YuTGG spektrida 13-garmonikada kuzatilgan rezonans kuchayishi In^+ monomerlarning mavjudligini isbotlovchi muhim ko'rsatkich sifatida namoyon bo'ladi. Shuningdek, Ag nanozarralaridan YuTGG hosil qilishning mexanizmlari va optimallashtirish strategiyalari haqida qimmatli tushunchalar berilgan bo'lib, bu YuTGG jarayonida ultratezkor lazer-plazma o'zaro ta'sirini kengroq tushunishga yordam beradi [72; 025603-bet]. Ushbu tadqiqot YuTGG samaradorligini va barqarorligini oshirishda moslashtirilgan lazer impuls parametrlari hamda nishon sirtining ishlab chiqarish usullarining imkoniyatlarini namoyish etadi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, sirt plazmon rezonanslari va kuchaygan lokal elektr maydonlari YuTGG jarayonida yuqori darajali garmonikalarni hosil qilishni sezilarli darajada kuchaytiradi. Nanozarralarning o'lchami, shakli va material tanlovi YuTGG intensivligi va barqarorligiga katta ta'sir ko'rsatadi. Ushbu xususiyatlar YuTGG texnikasining samaradorligini oshirish va yuqori energetik foton manbalarini yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi. Keyingi bo'limda ikki to'liqin lazer nurlanishlari kombinatsiyasi yordamida YuTGG samaradorligini yanada kuchaytirish imkoniyatlari muhokama qilinadi

1.4.2. Ikki to'liqinli lazer maydonining garmonikalar samaradorligiga ta'siri

YuTGG jarayonida lazer nurlanishi gaz muhitiga ta'sir etganda, har bir lazer impuls siklida ikkita garmonika impulsi hosil bo'ladi. Ushbu ikkita garmonika qarama-qarshi fazaga ega bo'lib, ya'ni ular o'zaro teskari yo'nalishda tebranadi. Natijada, hosil bo'lgan garmonikalar spektrida faqat toq tartibli (masalan, 3-, 5-, 7-tartibli va hokazo) garmonikalar hosil bo'ladi. Buning sababi shundaki, izotrop muhitlarda inversiya simmetriyasi mavjud. Shu sababli, yuqori tartibli garmonikalarning hosil bo'lish jarayonida faqat toq tartibdagi garmonikalar hosil bo'ladi, juft tartibli (masalan, 2-, 4-, 6-

tartibli) garmonikalar esa simmetriya tufayli intensivligi pasayadi. Biroq, asosiy lazerning zondlash impulsiga ikkinchi garmonika maydoni qo‘shilganda, simmetriya buziladi va toq hamda juft tartibli garmonikalar birgalikda hosil bo‘lishi kuzatiladi. Ushbu uslub YuTGG jarayonida simmetriya buzilishi orqali yuqori energiyali va keng spektrli garmonikalar hosil qilish imkonini beradi. Kogerent ekstremal ultrabinafsha (10 - 121 nm) nurlanishini yaratishga bo‘lgan qiziqish YuTGG samaradorligini oshirishga olib keladigan usullarni izlashga undaydi. YuTGG jarayonida yuqori energiyali fotonlarni samarali hosil qilish uchun qo‘llanilayotgan usullardan biri, yuqorida ta’kidlaganimizdek, ikki to‘lqinli maydonlari yordamida aralash elektromagnit maydon yaratish usuli hisoblanadi. Bu texnikada turli to‘lqin uzunliklariga ega ikkita lazer nurlanishi bir vaqtda qo‘llaniladi. Aralash maydon turli to‘lqin uzunliklaridan tashkil topgan bo‘lib, bir to‘lqin uzunligi YuTGG jarayonini qo‘zg‘atishda ishlatilsa, ikkinchisi qo‘shimcha maydon sifatida tunnel ionlash tezligini oshirish uchun qo‘llaniladi. Tunnellanish YuTGG jarayonining zaruriy qismi bo‘lib, u jarayonda atomlarning elektronlari ikki to‘lqinli aralash elektr maydoni ta’sirida tezroq ajraladi va yuqori energiyali fotonli garmonikalarni hosil qilishga hissa qo‘shadi. Ushbu usul yordamida bu jarayon maydon ta’sirida tezlantirilganda YuTGG samaradorligi oshadi, chunki elektronlar lazer maydonining har bir siklida ko‘proq energiya oladi va garmonikalar plato sohasi kengayib, intensivligi esa oshadi [73; 1701-b.].

Shuningdek, ikki zondlovchi impulslarining qutblanishi holati ikki to‘lqinli maydon bilan o‘tkaziladigan tadqiqotlarda muhim omil hisoblanadi. Turli qutblanishga ega impulslarning o‘zaro ta’siri YuTGG samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi noyob gazlar yordamida tajriba tadqiqotlarida tasdiqlangan [74; 243901-bet]. Ammosov-Delone-Krainov nazariyasiga ko‘ra, ikkita zondlovchi maydon parallel qutblanish holatida bo‘lganda, plazmaning umumiy ionlanish darajasi taxminan 90% ni tashkil qiladi. Bu natija ikki to‘lqinli zondlovchi impulslarining ortogonal qutblanishi holatiga qaraganda sezilarli darajada yuqori bo‘lib, ortogonal qutblanishda plazmaning ionlanish darajasi taxminan 30% ni tashkil etadi [18; 138-bet]. Parallel qutblangan maydonlarda yuqori ionlanish tezligi tufayli ta’sir etayotgan lazer impulslari va hosil qilinayotgan garmonikalar

generatsiyasi orasidagi fazalarni moslashish imkoniyatini murakkablashtiradi, chunki bu sharoitlarda zondlovchi maydon ionlashgan muhitda kuchli o‘z-o‘zidan fazali modulyatsiyaga duch keladi. Natijada, YuTGG jarayonida almashtirish samaradorligi pasayadi, chunki faza o‘zgarishi yuqori tartibli garmonikalarni hosil qilishni qiyinlashtiradi. Shu bilan birga, plazmadagi ikkita zondlash manbalarining optimal bo‘lmagan vaqt-fazo bo‘yicha bir-biriga mos kelmasligidan qat’iy nazar, tavsiya etilgan uslubni qo‘llash garmonika samaradorligini sezilarli darajada oshishiga va ekstremal ultrabinafsha nurlarda rezonans holatiga olib keladi [75; 766-772-b.].

Yuqoridagi yondashuvlar YuTGG samaradorligini oshirishda ikki to‘lqinli zondlash, qutblanish holatlari va fazalarni moslashtirishning muhim rolini ko‘rsatadi. Bu texnikalar yordamida ekstremal ultrabinafsha diapazonida yuqori energiyali va keng spektrli garmonikalar hosil qilish imkoniyati sezilarli darajada oshiriladi.

1.4.3. Garmonikalar samaradorligini kvazi-fazaviy moslashish yordamida oshirish

YuTGG jarayonida garmonika intensivligini maksimal darajaga ko‘tarish uchun asosiy lazer nurlanishi yo‘nalishi bo‘ylab atomlardan hosil bo‘lgan garmonika maydonlarining interferensiyasini ta’minlash muhim ahamiyatga ega. Har bir atom yoki molekuladan hosil bo‘lgan nurlanish maydonining bunday interferensiyasi faqat asosiy lazer impulslari va garmonikalar impulslarining fazalar farqi bir xil tarqalish xususiyatlariga ega bo‘lganda YuTGG samaradorligi oshadi. Fazalarni mukammal moslashtirish uchun asosiy lazer va garmonika to‘lqinlari o‘rtasidagi faza farqi tarqalish masofasida nolga (yoki 2π karralisi) teng bo‘lishi talab etiladi.

Biroq muhit va lazer nurlanishining o‘zaro ta’siriga bog‘liq holda fazaviy moslashuvga ta’sir etuvchi turli omillar paydo bo‘ladi. Bu omillar YuTGG jarayonida fazalarni mukammal moslashtirishni murakkablashtiradi va garmonikalarning samaradorligini pasaytiradi. Shu sababli, YuTGG samaradorligini oshirish uchun kvazi-fazaviy moslashish kabi yondashuvlardan foydalanish talab etiladi, bu esa fazaviy moslashuvga ta’sir qiluvchi cheklolarni bartaraf etish va yuqori sifatli garmonika hosil

qilish imkonini beradi. Fazalarni mukammal moslashtirishga ta'sir qiluvchi ba'zi asosiy omillar quyidagilardan iborat:

- *Sindirish ko'rsatkichi*: asosiy va garmonika to'lqinlarining sindirish ko'rsatkichlaridagi farqlar fazalarning mos kelmasligiga olib kelishi mumkin. Bu yerda muhitning noxiziqli sindirish ko'rsatkichi (n_2) muhim ahamiyatga ega.
- *Plazma zichligi*: zonlovchi lazer impulslari ta'sirida plazmadagi zarralar qo'shimchasiga ionlanishi erkin elektronlar konsentratsiyasi oshadi, bu esa asosiy va garmonika to'lqinlari uchun fazaviy moslashishni o'zgartiradi.
- *Geometrik faza*: lazer nurlashining fokus geometriyasi va nurlanishning plazma muhitida tarqalishi tufayli yuzaga keladigan dispersiyasi fazaviy munosabatlarga ta'sir ko'rsatadi.
- *Dipol fazasi*: lazer maydoni ta'sirida tunnellashgan elektron tomonidan yuzaga kelgan faza. Bu faza lazer intensivligi va elektron trayektoriyasining vaqt bo'yicha o'zgarishiga bog'liq.

YuTGG jarayonida past almashtirish samaradorligini oshirish uchun bunday makroskopik omillarni yaxshilashga qaratilgan turli yondashuvlar taklif qilingan. Ushbu yondashuvlar YuTGG jarayonida fazalarni moslashtirishni optimallashtirish orqali yuqori darajali garmonikalar hosil qilish samaradorligini oshirishga yordam

beradi [76; 1701-b.]:

- ✓ *lazer intensivligi*: zonlovchi va qizdiruvchi lazer intensivligini sozlash ionlashish va plazma zichligini boshqarishda, hamda yuzaga keladigan fazalar mos kelishiga ta'sir qiladi;
 - ✓ *fokuslash shartlari*: lazer nurlanishini fokuslashning muhitga nisbatan holati fazalar mos kelishiga ta'sir qiladi. Aniqlik bilan fokuslash yuqori intensivlikdagi fazalar moslashuvini optimallashtiradi;
 - ✓ *impuls davomiyligi*: impuls davomiyligi qisqaroq lazer nurlanishi dispersiya tufayli faza moslashishining buzilishini kamaytiradi va plazma muhitida qisqa masofalarda intensivligini saqlaydi;
 - ✓ *erkin elektronlar konsentratsiyasi* tufayli yuzaga keluvchi dispersiyani nazorat qilish orqali uzoq masofalarda faza mosligini ta'minlanadi.
- Kvazi-fazaviy moslashish (KFM) – bu gaz muhitida lazer

nurlanishining YuTGG jarayonida yuzaga keladigan fazalar mos kelmasligi muammosini hal qilish uchun eng muhim yondashuvlardan biri hisoblanadi [77; 51-b.]. KFM nazariy va eksperimental jihatdan o'rganilgan bo'lib, bu jarayonlarda bir necha gaz oqimlarini to'g'ri boshqarish va modulyatsiya usullaridan foydalaniladi [78; 270-275-b.]. Bunday usullar bosimni va gaz oqimini optimallashtirish orqali YuTGG jarayonida yuqori samaradorlikka erishishni ta'minlaydi [79; 011802-3-b.]. Gaz oqimining bo'laklarga ajratilishi plazma dinamikasini yaxshilashga yordam beradi, bu esa lazer nurlanishining ionlashishi va yuqori tartibli garmonika hosil qilish jarayonida zaruriy shartlarini yaratadi. KFM ning eksperimental tadqiqotlari gaz muhitini optimallashtirish va yuqori darajali garmonikalarni samarali hosil qilish uchun yangi imkoniyatlarni taqdim etadi [80; 879-b., 81; 025016-b., 82; 6236-b.]. Keyinchalik, vakuumda lazer yordamida nishon sirtida hosil qilingan kuchsiz ionlashgan plazmadagi fazalar nomuvofiqligining YuTGG samaradorligiga ta'sirini kamaytirish uchun KFM kontseptsiyasi joriy etildi. Oxirgi tadqiqotlar turli xil vositalar yordamida davriy tarzda ajratilgan mayda plazma bo'laklarini hosil qilish usullarini taqdim etadi [83; 033821-b.]. Shuningdek, ablatsiya nurlanishining fazoviy modulyatsiyasi orqali KFM amalga oshirildi [84; 370-b.]. Bundan tashqari, nishon sirtining davriy ravishda chuqurchalarni hosil qilish usuli KFM jarayonini yaxshilashga xizmat qiladi [85; 1936-b.]. YuTGG jarayonida lazer yordamida hosil qilingan plazmadagi KFM bir nechta istiqbolli sxemalarni taklif qilishi mumkin. Bular orasida davriy takrorlanuvchi plazma muhitlarining bo'laklarining xususiyatlarini oson boshqarish imkoniyatlari mavjud. Masalan, har bir bo'lakning o'lchamlari, bo'laklar soni, bo'laklar orasidagi masofa va boshqa parametrlarni nazorat qilish bilan amalga oshiriladi. Shuningdek, elektron kontsentratsiyasini aniqlash ham KFM jarayonida muhim ahamiyatga ega, chunki bu plazmaning optik xususiyatlarini va YuTGG jarayonidagi samaradorligini belgilaydi. Shuningdek, plazma muhitlarining bo'laklarga ajratilishi va elektron kontsentratsiyasini boshqarish kabi metodlarni qo'llash orqali YuTGG jarayonida yuqori energiyali garmonikalar hosil qilish imkoniyatlarini yuzaga keltiradi.

I-bob bo'yicha xulosalar:

Quyi va yuqori tartibli nochiziqli optik jarayonlar zamonaviy fizika va lazer texnologiyalarining eng istiqbolli yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Bu jarayonlar yordamida yuqori energiyali fotonlar, ya'ni yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi, turli sohalarda – optoelektronika, nanofotonika, spektroskopiya, mikroskopiya va nanomateriallar fizikasi kabi yo'nalishlarda yangi imkoniyatlarni yuzaga keltiradi. Shu bois, nochiziqli optik hodisalarni chuqur o'rganish va ularni boshqarish mexanizmlarini aniqlash ilmiy hamda amaliy jihatdan muhim ahamiyatga ega. Biroq mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, uglerod tarkibli yonish muhitlarida, ayniqsa lazer ablatsiyasi natijasida hosil bo'ladigan plazma holatlarida yuzaga keluvchi nochiziqli jarayonlar yetarlicha o'rganilmagan. Ayniqsa, lazer nurlanishi ta'sirida hosil bo'luvchi metal va yarimo'tkazgich nanozarrachalarning, xususan, Zn va ZnSe nanostrukturaviy tizimlarining nochiziqli optik xossalari haqidagi ma'lumotlar kam. Bu esa yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining samaradorligini oshirishga to'sqinlik qilmoqda.

Tahlil natijalariga ko'ra, lazer-plazma muhitida 8–40 nm diapazondagi garmonikalar hosil bo'lishida fazaviy moslashuv shartining buzilishi asosiy cheklov omilidir. Bu holat yuqori energiyali fotonlar generatsiyasining samaradorligini kamaytiradi. Shu sababli, fazaviy moslashuvni yaxshilashning muqobil yondashuvi sifatida kvazi-fazaviy moslashuv mexanizmlarini qo'llash zarurati tug'iladi. Lazer-plazmasi parametrlarini optimallashtirish orqali yuqori tartibli garmonikalarni generatsiyalash sharoitlarini yaxshilash mumkinligi ilmiy jihatdan asoslab berildi.

Bundan tashqari, Z-skanerlash usuli yordamida nanozarrachalarning ikki-fotonli yutilish va sindirish ko'rsatkichlaridagi nochiziqli o'zgarishlarni aniqlash orqali ularning optik javob xususiyatlarini aniqlash imkoniyati yaratiladi. Bunday yondashuvlar nafaqat nazariy modellarni takomillashtirish, balki lazer asosidagi optik tizimlarning samaradorligini oshirishga ham xizmat qiladi.

Shu bilan birga, tahlillar shuni ko'rsatadiki, yuqori tartibli garmonika generatsiyasi jarayonida sirt lazer-plazmasining tarkibi, zichligi va harorati

kabi parametrlar hal qiluvchi rol o'ynaydi. Ularni boshqarish orqali kvazi-fazaviy moslashish asosida yuqori tartibli garmonikalar samaradorligini sezilarli darajada oshirish mumkin. Bu esa lazer texnologiyalarining yangi bosqichini shakllantirish, yuqori energiyali foton manbalarini yaratish va ilg'or nanofotonik qurilmalarni ishlab chiqishda muhim nazariy va amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

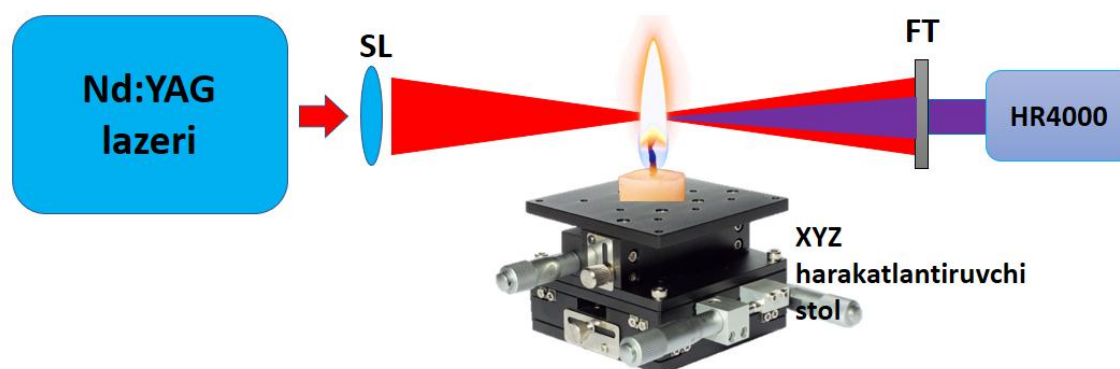
Umuman olganda, 1-bobda zamonaviy lazer-plazma fizikasi va nochiziqli optika sohasidagi mavjud ilmiy yondashuvlar tahlil qilinib, mavjud muammolar aniqlangan hamda tadqiqotning maqsad va vazifalari asoslab berildi. Ushbu xulosalar keyingi boblarda o'tkaziladigan tajribaviy va nazariy tadqiqotlar uchun ilmiy asos yaratadi.

II-BOB. QUIYI TARTIBLI NOCHIZIQLI JARAYONLAR VA YUQORI TARTIBLI GARMONIKALAR GENERATSIYASINI HOSIL QILISH METODIKASI. EKSPERIMENTAL QURILMALAR TAVSIFI

Ushbu bobda suyuqliklarda ablatsiya yordamida qattiq jism nanozarralarini tayyorlash usullari, strukturaviy va spektral tavsiflarni o'rganish natijalari, ularning nochiziqli optik parametrlarini Z-skanerlash eksperimental qurilmalari yordamida o'rganish metodi haqida ma'lumot berilgan. Shuningdek, uglerod tarkibli yonuvchi muhitlarda quyi tartibli garmonikalar hosil qilish, yuqori garmonikalar generatsiyasi uchun nanozarralardan tayyorlangan nishon manbasi va kvazifazaviy moshlashuvchanlikka asoslangan ko'p tirqishli niqob yordamida qattiq jism sirtida hosil qilingan davriy plazmalar metodlari bayon etilgan.

2.1. § Yonish alangalarida qo'llaniladigan qurilmalar va ularning tavsifi

Alangalar bilan ishlashda optik qurilmalarni to'g'ri sozlash yuqori aniqlik va samaradorlikka erishishda muhim ahamiyatga ega. Davomiyligi pikosekund bo'lgan Nd:YAG lazeri (1064 nm, 28 ps; PL-2250, Ekspla) yordamida havo va yonish alangalarida uchinchi tartibli nochiziqli jarayonlarni o'rganish amalga oshirildi. Havo sharoitida alangadagi uchinchi tartibli garmonika generatsiyasini qayd qilishga mo'ljallangan eksperimental qurilmaning prinsipial sxemasi 2.1- rasmda ko'rsatilgan.



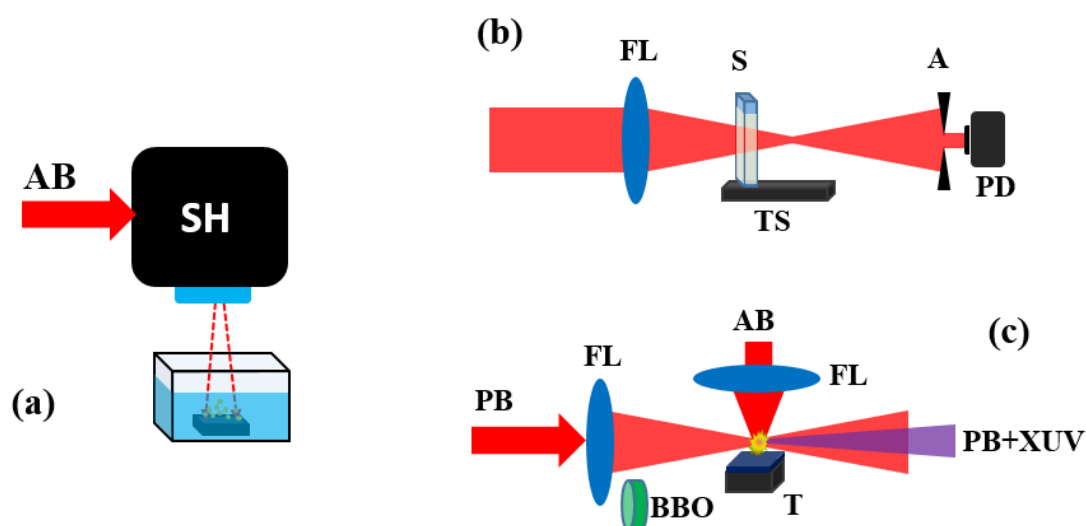
2.1- rasm. Nd:YAG lazeri yordamida yonish alangalarida uchinchi tartibli garmonika generatsiyani qayd qilish imkonini beruvchi eksperimental qurilmaning sxemasi [1A].

Fokus uzunligi 150 mm bo'lgan sferik linza (SL) yordamida lazer impulslari yondirilgan sham yoki etanol alangasining markaziga fokuslangan. Fokuslangan nurlanishning radiusi 16 mkm bo'lib, fokus tekisligidagi zondlovchi impulsning intensivligi $1.0 \cdot 10^{12}$ va $3.0 \cdot 10^{13}$ W sm^{-2} orasida o'zgargan. Uchinchi tartibli garmonika (354,6 nm) impulslari tolali spektrometr (HR4000, Ocean Optics) tomonidan qayd qilindi, hamda yorug'lik filtrlar tizimi (FT) yordamida zondlovchi nurlanishdan (1064 nm) ajratildi. Shuningdek, sham va etanol alangasini yoqish paytida uning yaqinidagi shisha tagliklarga yotqizilgan plyonkalarining morfologiyasini atom kuch mikroskopi (AFM; Solar Next, NT-MDT) yordamida tahlil qilindi. Tomchi shakli analizatori (DSA100-E, Kruss) yordamida sham alangasidan hosil bo'lgan plyonkalar va suv tomchilari orasidagi aloqa burchagi o'lchandi. Uchinchi tartibli garmonikaning fazoviy taqsimoti esa CCD kamera (Pulnix TM-1020-15CL) yordamida olindi. Linza fokus tekisligida namunalar joylashuvi va alangada hosil bo'layotgan uglerod nanozarralarining mavjudligini tahlil qilish maqsadida z va y o'qi bo'ylab skanerlash usuli qo'llanildi. Bu yerda z o'qi lazer nurlanishining optik yo'li (yonish alangasiga perpendikulyar ravishda), y o'qi esa alangaga parallel yo'nalishda piligdan alangaga bo'ylab tajriba amalga oshirildi.

Yonish jarayonida hosil qilingan nanozarralar shisha plastinka yuzasida yig'ildi. Shisha plastinka alangadan taxminan 50 mm balandlikda joylashtirildi va yetarli qoplam hosil qilish uchun cho'ktirilgan nanozarralarni yig'ish jarayoni 1 minutdan 10 minutgacha davom etdi. Hosil bo'lgan plyonkalar morfologiyasi, tuzilishi va qalinligi bilan tavsiflandi, bunda qatlamning qalinligi 1 – 15 μm oralig'ida o'zgarib turdi. Bu plyonkalar amalga oshirilgan uchinchi garmonika generatsiyasi tajribalarida bir vaqtda olindi. Nanozarralarni alanga holatidagi muhitdan ajratib olish bugungi kunda nanotexnologiya sohasidagi eng dolzarb muammolardan biri hisoblanadi. Shu sababli, suyuqliklarda lazer ablatsiyasi yordamida nanozarra suspenziyalarining tayyorlash jarayoni so'nggi yillarda katta e'tiborni tortmoqda. Ushbu metod nanozarralarni yuqori sof holatda sintez qilish, ularning o'lchamini nazorat qilish va kimyoviy qo'shimchalardan foydalanmasdan amalga oshirish imkonini beradi.

2.2. § Lazer ablatsiya yordamida suyuqliklarda nanozarralarni sintez qilish

Lazer ablatsiyasi yordamida suyuqliklarda nanozarra suspenziyalarini tayyorlash – yuqori aniqlik va tozalikka ega nanozarralar hosil qilishning samarali usullaridan biridir. Bu dissertatsiya ishida qattiq jism sirtini ablatsiya qilish uchun lazer impulslari manbai sifatida tolali femtosekundli lazer tizimi ishlatilgan. Bunda impuls davomiyligi 40 fs, to‘lqin uzunligi 1030 nm bo‘lgan lazer nurlanishidan foydalanildi. Etanoldagi Zn va ZnSe qattiq jism nishonlarining (Sigma-Aldrich) ablatsiyasi uchun 50 kHz takrorlash tezligi tanlandi. Quyidagi 2.2a- rasmda lazer ablatsiyasi uchun ishlatilgan



2.2-rasm: a) suyuqlikdagi lazer ablatsiyasi sxemasi keltirilgan bo‘lib, unda ablatsiya jarayonida qo‘llaniladigan lazer nurlanishi (AB) va bu nurlanishni ob‘ekt sirti bo‘ylab harakatlantiruvchi skanerlash qurilmasi (SH) mavjud, b) Z-skanerlash sxemasi – fokuslovchi linza (FL), kollid suspenziya (S), Z o‘qi bo‘yicha harakatlantiruvchi (TS), aperture (A) va fotodiod (PD) komponentlari yordamida lazer nurlanishining o‘zgarishiga sabab bo‘luvchi noxiziqli parametrlarni aniqlashda foydalaniladi, (c) Nanozarralarni o‘z ichiga olgan lazer-plazma alangalarida YuTGG uchun optik qurilma prinsipial sxemasi tasvirlangan, bu yerda zondlash nurlanishi (PB), fokuslovchi linza (FL), ablatsiya nurlanishi (AB), nishon (T), ikkinchi garmonika generatsiyasi uchun bariy borat kristalli (BBO) va zondlash nurlanishi bilan ekstremal ultrabinafsha nurlanish sohasidagi garmonikalar (PB + XUV) ko‘rsatilgan.

Ablatsiya impulslarining o'rtacha quvvati 5 W. Nishon sirtida ablatsiya nurining hisoblangan energiya zichligi 13 J/sm^2 ni tashkil etdi. Ablatsiya jarayoni 5 minut davom etdi, shundan so'ng suspenziya rangining asta-sekin o'zgarishi kuzatildi. Zn va ZnSe nanozarralarining kolloid suspenziyalarining rangi mos ravishda och-qoramtir va sarg'ish rangga ega bo'ldi. Ablatsiya jarayonida hosil bo'ladigan nanozarrachalar bulutlarining shakllanishi plazma holatining o'zgarishiga olib keladi, bu esa etanolning yorug'likni o'tkazish xususiyatlarini o'zgartiradi [86; 866-b.].

Impulsning takrorlanish tezligi yuqori bo'lganligi sababli, etanolda namunalarning samarali ablatsiyasiga erishish uchun $f = 160 \text{ mm}$ bo'lgan F-teta linzalari bilan jihozlangan galvanometrik skanerlash qurilmasi (FARO Tech. Xtreme-20) ishlatildi. Ablatsiya lazerining skanerlash tezligi 50 mm/s bo'lib, bunday sharoitlarda chuqur kraterlar va shlaklar paydo bo'lishining oldi olinadi, bu esa ablatsiya samaradorligini pasaytirdi. Ablatsiyadan so'ng, hosil qilingan nanozarralar suspenziyalarining chiziqli yutilish xususiyatlari optik spektrofotometr (Flame, Ocean Optics) yordamida tahlil qilindi. Nanozarralarning morfologik xossalari AKM yordamida tekshirildi. AKM standart dinamik kuch sinovi rejimida ishlatilgan bo'lib, uning konsoli rezonansda yoki unga yaqin yuqori chastotada tebranadi. Amplitudali modulyatsiya rejimi, o'ziga xos dinamik rejim sifatida eng keng tarqalgan hisoblanadi va AKM tasvirlash rejimi sifatida qo'llaniladi. Shuningdek, nanozarralarning morfologik xususiyatlari skanerlash elektron mikroskopi (SEM, Carl Zeiss) yordamida ham tekshirildi. Shuningdek, ushbu dissertatsiya ishida Zn va ZnSe nanozarralaridan iborat kolloid suspenziya quyi tartibli nochiziqilik va YuTGG ni tahlil qilingan.

2.3. § Nanozarralar suspenziyasi uchun Z-skanerlash usuli tavsifi

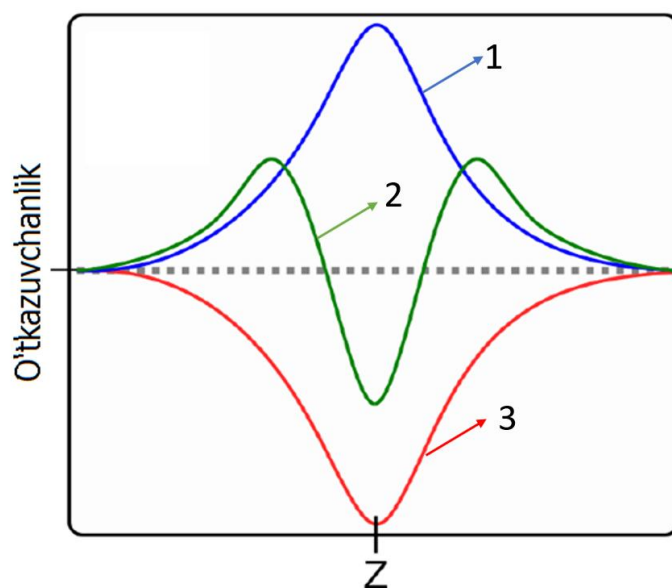
Nochiziqli yutish koeffitsienti (β) ni va nochiziqli sindirish koeffitsienti (n_2) ni aniq o'lchashga erishish, shuningdek, uchinchi darajali singdiruvchanlik $\chi^{(3)}$ ni hisoblash uchun ko'plab eksperimental usullar ishlab chiqilgan. Ushbu usullar qatori nochiziqli interferometriya, degeneratsiyalangan to'rt to'liqinli aralashtirish, deyarli degeneratsiyalangan uch to'liqinli aralashtirish, ellips aylanishi va nurning buzilish o'lchovlari kabi jarayonlarni tavsiflovchi metodlar qamrab oladi. Biroq, Z-skanerlash

texnikasi deb ataladigan, optik materiallarning noxiziqli xususiyatlarini o'lchash uchun ishlatiladigan va ishonchlilik darajasi yuqori bo'lgan usul sifatida tanilgan uslub keng qo'llaniladi. Ko'plab noxiziqli optika tadqiqotchilari Z-skanerlash texnikasidan foydalanib, o'z tadqiqotlarida natijalarni takomillashtirgan [84; 864-b., 85; 760-b., 86; 955-b.]. Ushbu usul eksperimental ravishda o'rnatish va optimallashtirish jarayonida qulaylik yaratadi, bu esa tadqiqotchilar uchun yanada samarali natijalarga erishishga yordam beradi. Noxiziqlilik parametrlarini Z-skanerlash uslubida aniqlashda uning tabiati va belgisini dastlabki ma'lumotlardan aniqlash imkoniyati mavjud, bu esa tadqiqot jarayonini osonlashtiradi. Ushbu ma'lumotlar, odatda, batafsil matematik tahlilni talab qilmasligi o'lchovlarni tez va samarali aniqlash imkonini beradi. Buning natijasida, Z-skanerlash texnikasi, laboratoriya sharoitida o'lchovlar olib borishda yuqori darajada ishonchli va sodda usul sifatida foydalaniladi.

Z-skanerlash texnikasi bizga markazlashtirilgan Gauss nurlarining o'zgarishini noxiziqli optik muhit orqali o'lchash imkonini beradi, chunki muhit fokus nuqtasi atrofida harakatlanadi. Intensivlikka bog'liq bo'lgan noxiziqli sindirish ko'rsatkichi tufayli, noxiziqli muhit yorug'likni qo'shimcha ravishda o'z-o'zini fokuslashi yoki defokuslashi (sochishi) tufayli uzoqda joylashgan detektor orqali nurning o'tkazuvchanligi T ni o'lchaydi. Z-skanerlash o'lchovidan fotodetektor oldidagi ochiq yoki yopiq apertura orqali $\chi^{(3)}$ ning haqiqiy va mavhum qismi uchun qiymatni olish imkoniyatini beradi.

2.3.1. Ochiq apertura

Z-skanerlash texnikasining ochiq apertura orqali o'tkazilishi, qaralayotgan namunaning noxiziqli parametrlarini, masalan, ikki fatonli yutilishni, to'yinuvchi yutilishni va teskari to'yinuvchi yutilishni aniqlash imkonini beradi. Agar namuna orqali o'tgan normallashtirilgan o'tkazuvchanlik fokusida minimum qayd etsa, bu ikki fatonli yutilishni izohlaydi; agar maksimum qayd etsa, to'yinuvchi yutilish xususiyatlarini xarakterlaydi. Z-skanerlash jarayonida olingan grafik 2.3-ramsdagidek, fokusida minimum ichida maksimum mavjud bo'lsa (yoki aksincha), unda uyg'otilgan sathdan keyin olingan ma'lumotlar qo'shimcha tahlil qilinadi.



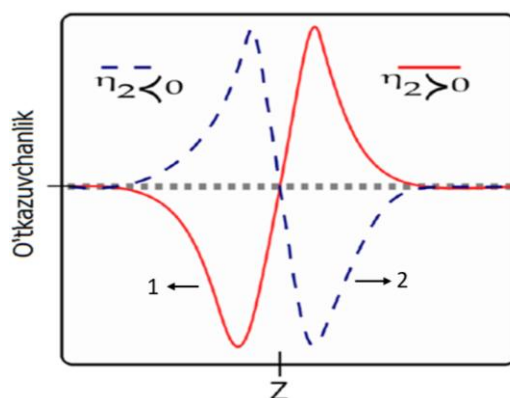
2.3-rasm. To'yinuvchi yutilish (1), teskari to'yinuvchi yutilishi (2) va ikki fotonli yutilishlarga (3) mos keladigan ochiq aperturali Z-skanerlash egri chiziqlari [87; 65-b.].

Bu holat teskari to'yinuvchi yutilishning ko'rsatkichi bo'lib, uning tahlili materialning nohiziqli xususiyatlari haqidagi qo'shimcha ma'lumotlarni taqdim etishi mumkin. Ushbu natijalar, Z-skanerlash texnikasidan foydalanish orqali aniqlangan nohiziqli parametrlarning mexanikasini yanada chuqurroq tushunishga yordam beradi. Umuman olganda, muhitning nohiziqli javobi ko'p fotonli rezonans bilan bog'liqdir. Rezonansli o'tishni amalga oshirish uchun ikki yoki undan ortiq fotonlarning birlashgan energiyasi talab etiladi [88; 22-30-b., 89; 42-b.].

2.3.2. Yopiq apertura

Namunadan uzoq masofaga tarqalish paytida faza buzilishi amplitudali buzilishga aylanishi sababli, detektor oldidagi uzoq fazodagi nurga markazlashtirilgan diafragma qo'yish detektorning faza buzilishiga sezgir bo'lishini ta'minlaydi. Ushbu tajriba yopiq apertura deb ataladi va materiallarning nohiziqli sindirish ko'rsatkichini o'lchashda qo'llaniladi. Fokusdan oldin musbat yoki manfiy o'z-o'zini fokuslaydigan nohiziqli optik muhit aperturadagi nurni sochish yoki yig'ishga moyil bo'lib, mos ravishda o'tkazuvchanlikning kamayishiga yoki ortishiga olib keladi. Shunday qilib, fokusdan oldingi o'tkazuvchanlik grafigida maksimumi va fokusdan keyingi o'tkazuvchanlik minimumi Z-skanerlash egri chizig'ida nohiziqli manfiy sindirishni, aksincha, ushbu grafikda o'tkazuvchanlikning

minimum-maksimum chiqishi esa musbat sindirishni xarakterlaydi. Musbat va manfiy nohiziqliliklarga mos keladigan yopiq apertura Z-skanerlash egri chiziqlari quyidagi 2.4- rasmda ko'rsatilgan. Bundan tashqari, yopiq aperturada olingan natijalarga ikki fotonli yutilish yoki to'yinuvchi yutilish jarayonlarining ta'sirini ham kuzatish mumkin. Agar qaralayotgan namunaning ikki fotonli yutilishga moyilligi bo'lsa, maksimum-minimum piklar qiymati yanada oshadi. Aksincha, agar namunaning to'yinuvchi yutilishga moyilligi mavjud bo'lsa, maksimum-minimum piklar qirralashishini kuzatish mumkin [85; 765-769-b.].



2.4-rasm. Musbat (1) va manfiy (2) nohiziqlilikka mos keladigan nohiziqli sindirish egri chiziqlari [87;72-b.]

Bizning tajribalarimizda, nanozarralarning quyi tartibli nohiziqli optik xususiyatlari standart Z-skanerlash texnikasi yordamida o'rganildi (2.2b- rasimga qarang). Yopiq apertura sxemasi 400 mm fokusli uzunlikdagi linzalarni o'z ichiga olgan bo'lib, namunani fokuslash linzalari, apertura (A) va fotodiodning (PD, Thorlabs PDA100A2) fokus tekisligiga nisbatan harakatlantirish imkoniyatini beruvchi qurilmalaridan iborat. Ochiq aperturada Z-skanerlashda kalibrlangan apertura fotodiod (PD) orqali barcha tarqaladigan nurlanishni yig'ish uchun olib tashlanadi. Namunani fokuslangan lazer nurining z o'qi bo'ylab skanerlash vaqtida lazer nurlanishining normallashtirilgan o'tkazuvchanligi Z-skanerlash egri chiziqlari asosida qayd etildi. Nanozarralarning kolloid suspenziyasi 1 mm qalinlikdagi kvars yacheykasiga joylashtirildi. Ikkinchi garmonika generatsiyasini hosil qilish uchun 1,5 mm qalinlikdagi BBO kristalidan foydalanildi. Ikkinchi garmonika generatsiyasining almashtirish samaradorligi $\sim 12\%$ ni tashkil etdi.

2.4. § Nanozarralardan tarkib topgan namuna nishonlarini tayyorlash

Etanolda ablatsiya yordamida hosil qilingan Zn va ZnSe nanozarralaridan iborat suspenziya plazma nishon manbasini hosil qilish maqsadida shisha plastinka ustiga qoplandi. Ushbu jarayonda shisha plastinka sirtiga nanozarralar qoplashning uch xil usuli ko'rib chiqildi. 1-usulda, suyuqlikda ajratilgan nanozarralar yelim yordamida shisha plastinkaga qoplandi. Bu usul nanozarralar nishonlarini yaratishning eng oson usuli bo'lsa-da, natijada nishonlar sirtida nanozarralarning tartibsizliklari va zichligi o'zgarishi katta bo'ladi. 2-usulda, etanoldagi nanozarralar tomchi yordamida qoplanadi, eritma quriganida yana bir qatlam yotqiziladi va jarayon bir necha marta takrorlanadi. Bu uslub jarayonning uzoq muddatini talab qilishi bilan kamchilikka ega. 3-usulda, ikkinchi usuldan foydalanib tayyorlangan nishon yuqorida bayon qilingan usul bilan yaratiladi, faqat namuna 60°C da pechda quritiladi. Ushbu jarayon ko'p marta takrorlanadi va natijada ~2 mkm qalinlikdagi qatlam hosil bo'ladi. Bu usul namuna nanozarralarining zichligini oshirib, qatlam taqsimotida bir xillikka erishishga yordam beradi. Shuning uchun, uchinchi usul yordamida tayyorlangan namuna yuqori garmonikalar plazmasini hosil qilish uchun eng optimal yo'l sifatida tanlandi. Hosil qilingan namuna vakuum ultrabinafsha spektrometri kamerasining ichiga joylashtirildi va kamerada 3×10^{-6} mbar bosim ostida vakuum hosil qilindi. YuTGG tajribalari 2.2c-rasmda ko'rsatilgan sxema yordamida amalga oshirildi. Yotqizilgan Zn va ZnSe nanozarralar qatlamidan iborat shisha plastinka sirtiga plazma hosil qilish uchun 235 fs davomiylikdagi siqilmagan lazer impulsidan foydalanildi. Plazma hosil qilishda lazer impulslarining o'rtacha quvvati 15 W darajasida saqlanadi. 200 mm fokusli linza yordamida qizdirish nurini fokuslashdan so'ng, nishon sirtidagi qizdirish impulslarining intensivligi 10^{10} - 10^{11} W sm^{-2} oralig'ida o'zgardir. Zondlash lazer impulslarining o'rtacha quvvati 35 W darajasida bo'lib, lazer hosil qilgan plazmada zondlash impulslarining maksimal ishlatilgan intensivligi $I \approx (1-3) \times 10^{14}$ W sm^{-2} qiymat bilan optimal YuTGG hosil qilindi. Ushbu ablatsiya sharoitda vakuum ultrabinafsha spektrometri (HP Spectroscopy GmbH, Germaniya) tomonidan tahlil qilingan samarali YuTGG ni yaratish uchun optimal plazma hosil qilindi. Vakuum ultrabinafsha spektrometri

oltin bilan qoplangan silindrsimon oyna, difraksion panjara, fosforli ekranli mikrokanal plitasi va CCD kameradan iborat.

2.5. § Davriy plazmalarni modifikatsiyalash texnologiyasi va ularning mexanizmlari

Qattiq nishon sirtiga tik yoʻnaltirilgan qizdiruvchi lazer nurlanishi plazma hosil qiladi. Unga perpendikulyar ravishda yoʻnaltiriladigan zondlovchi lazer nurlanishi esa plazma tarkibida erkin elektronlar konsentratsiyasini keskin oshiradi. Bu jarayon plazmaning ionlashish darajasini kuchaytirib, uning optik va fizikaviy xususiyatlarini oʻzgartiradi. Natijada vujudga kelgan plazma zondlovchi nurlanish va generatsiya qilinayotgan garmonikalar oʻrtasida fazaviy moslashuv munosabatlarini buzadi. Fazaviy nomuvofiqlikni kamaytirish maqsadida lazer intensivligi, impuls davomiyligi, takrorlanish chastotasi va spektral tarkibini mos ravishda tanlash orqali plazma zichligini boshqarish mumkin. Masalan, ultraqisqa (femtosekund yoki pikosekund) davomiylikdagi impulslardan foydalanish ionlashish darajasini pasaytirishga yordam beradi, biroq fazaviy nomuvofiqlikni butunlay yoʻq qila olmaydi, bu esa generatsiya qilinayotgan garmonikalar samaradorligining pasayishiga olib keladi.

Nishon sirtida plazma alangalarining uzunligini oshirish nazariy jihatdan garmonikalar generatsiyasining kvadratik ortishini vujudga keltirishi mumkin. Biroq, bunday uzaytirilgan plazma qayta yutilish kuchayishi sababli garmonikalar almashtirish samaradorligini pasaytiradi. Shuningdek, uzaytirilgan plazmada erkin elektronlar va ionlar konsentratsiyasining ortishi lazer nurlanish impulsining muhit orqali tarqalishida zondlovchi va garmonik toʻlqinlar oʻrtasida yanada kuchliroq fazaviy nomuvofiqlik tugʻdiradi. Gaz muhitida kuzatilganidek, uzaytirilgan plazma strukturasi boʻlaklarga ajratish fazaviy nomuvofiqliklarni kamaytirishga yordam beradi.

Uzaytirilgan plazmada fazalarning mos kelmasligi quyidagi toʻrtta asosiy omil taʼsirida yuzaga keladi: atom yoki ion dispersiyasi Δk_{atom} , Gouy fazasining siljishi Δk_{gouy} , nochiziqli dipol momentlarda intensivlikka bogʻliq dinamik faza siljishi Δk_i va plazma (yaʼni elektron dispersiyasi) dispersiyasi Δk_{pl} . Ushbu omillarning har biridan kelib chiqadigan fazaviy

nomuvofiqliklar yig'indisi to'liqin vektorining umumiy mos kelmasligi Δk ni tashkil etadi [90; 978-b.]. Matematik jihatdan bu munosabatni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\Delta k(z) = \Delta k_{atom} + \Delta k_{geom} + \Delta k_{pl} + \Delta k_i . \quad (2.1)$$

Shu bilan birga, KFM usuli orqali mazkur nomuvofiqlikni ma'lum darajada kompensatsiya qilish imkoniyati mavjud. Bunda uzaytirilgan plazmani davriy modulyatsiya qilish yo'li bilan fazalar nomuvofiqligini to'g'rilab borish mumkin. KFM sharti esa quyidagi ifoda bilan qaytadan ifodalanadi:

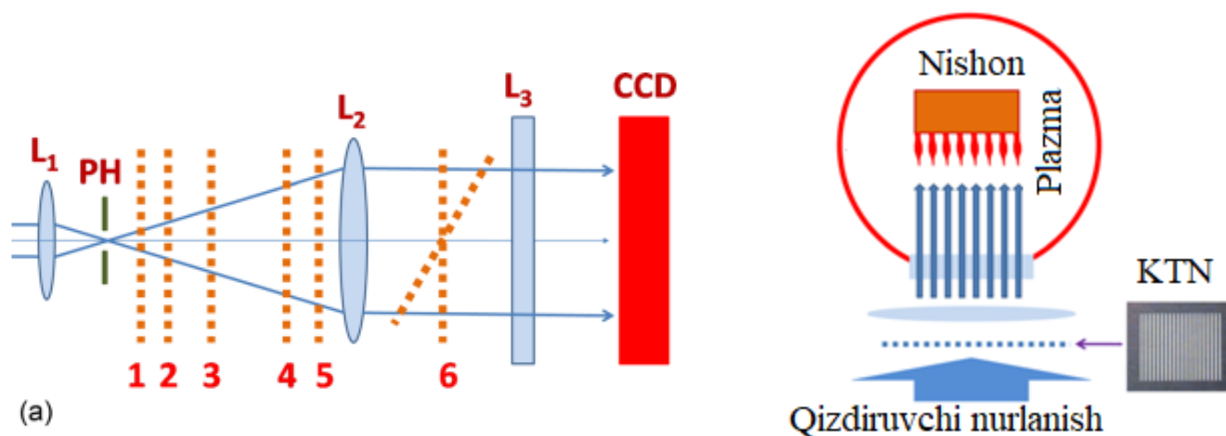
$$\Delta k_{eff}(z) = \Delta k(z) - \frac{2\pi}{L} , \quad (2.2)$$

bu yerda $\Delta k_{eff}(z)$ – muhit bo'ylab qaytadan tiklanadigan yoki kompensatsiya qilinadigan effektiv mos kelmaslik qiymati, L esa davriy modulyatsilangan plazma bo'lagining uzunligi. KFM ning shundan iboratki, nolga yaqin $\Delta k_{eff}(z)$ qiymatini ta'minlovchi davriy modulyatsiyalangan plazmada asosiy lazer nurlanish va YuTGG uchun fazaviy nomuvofiqlik ta'sirini kamaytiradi. Shu tariqa, har bir davr davomida yuzaga kelgan faza nomuvofiqligi keyingi davr boshlanishida $2\pi/L$ miqdorda tuzatilib, garmonika signallarining amplitudasi ortishi davom etadi. Davriy plazmalarda atom yoki ion dispersiyasi juda kichik bo'lganligi sababli uni hisobga olmaslik mumkin. Shuningdek, intensivlikka bog'liq faza siljishi Δk_i ham nihoyatda kichik bo'lganligi sababli umumiy fazaviy nomuvofiqlik Δk ga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. Shu sababli, fazalarning mos kelmasligi asosan plazma dispersiyasi va Gouy fazasining siljishi bilan belgilanadi. Bunda, ($\Delta k_{pl} = k_q - k_1$, $k_1 = \frac{n_1 w_1}{c}$ (n_1 zondlash impulsning to'liqin uzunligidagi muhitning sindirish ko'rsatkichi, w_1 - zondlovchi nurlanish chastotasi va c - vakuumdagi yorug'lik tezligi) va $k_q = \frac{n_q w_q}{c}$ (n_q q – garmonikaning sindirish ko'rsatkichi va w_q – q-garmonikaning chastotasi), shuningdek, $\Delta k_{geom} = (1 - q) \tan^{-1} \frac{z}{b}$ - Gouy fazasi siljishi, bu yerda z tarqalish yo'nalishini bildiradi va b - konfokal parametr, bu parametr $b = \frac{2\pi r^2 n_1}{\lambda}$ (bu yerda r - fokusdagi nurning radiusi) formula bilan izohlanadi. Fokuslangan nurlanishning konfokal parametri muhit o'lchamidan oshib ketgan sharoitlarda Δk_{geom} qiymatlari Δk_{disp} dan uch marta kichikroq

ekanligi aniqlandi. Shunday qilib, davriy plazmalarda hisob-kitoblarda Δk_{geom} dispersiyani e'tiborsiz qoldirish mumkin va oddiygina $\Delta k \approx \Delta k_{pl}$ ni olish mumkin. Shunga mos ravishda, to'lqin uzunligi 800 nm bo'lgan zondlash impulsidan foydalanish holatida q-garmonikaning kogerentlik uzunligi $L_{kog} = 1,4 \times 10 / (N_e \times q_{kog})$ millimetrda o'lchanadi. Bu yerda q_{kog} - KFM jarayonida eng yuqori intensivlikni ko'rsatadigan garmonika tartibi va N_e - sm^{-3} bilan o'lchangan plazma alangasidagi elektron zichligi. Bu bog'liqlik kogerentlik uzunligini L_{kog} (aslida bitta plazma bo'lagining o'lchami) va maksimal kuchaygan garmonika tartibni bilish orqali elektron zichligini osongina aniqlash imkonini beradi. q_{kog} ni sozlash bir xil ablatsiya sharoitlarini saqlab qolgan holda turli o'lchamdagi plazma alangalaridan foydalanish orqali amalga oshiriladi.

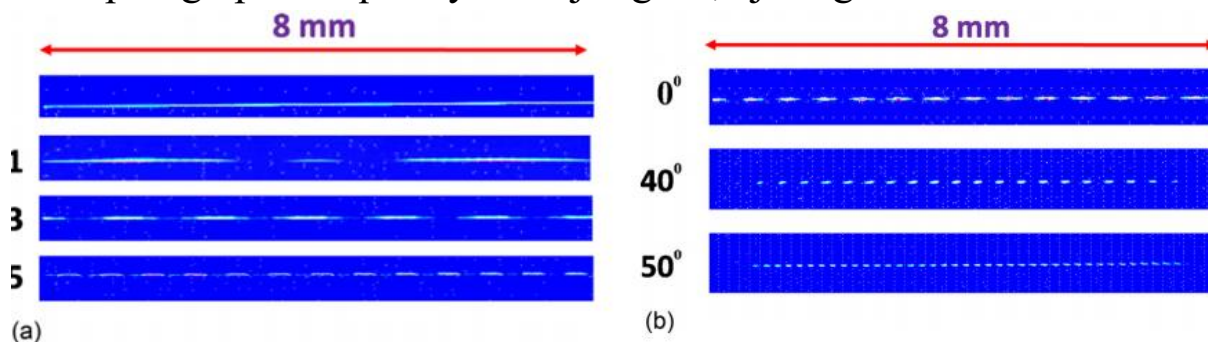
HeNe lazeri yordamida modifikatsiyalangan plazmani modellashtirish. Sirt lazer plazmasini davriy bo'laklarga ajratish uchun qizdiruvchi lazer nurlanishi yo'lga davriy taqsimlovchi to'siq qo'yish talab etiladi. Bunda ko'p tirqishli niqob (KTN)dan foydalanish mumkin. Biz mazkur ishda 0,63 μm to'lqin uzunligiga ega bo'lgan HeNe lazer nurlanishidan foydalanib, KTN yordamida hosil qilinadigan davriy plazma bo'laklarini modellashtirdik. KTN bir-biridan 0,3 mm masofada joylashgan tirqishlardan iborat bo'lib, u lazer nurlanishining fazoviy taqsimotini boshqarishda muhim rol o'ynaydi. HeNe lazer nurlanishining KTN orqali o'tishidagi fazoviy taqsimoti analiz qilindi, hamda plazma hosil bo'lish jarayoni va uning dinamikasini yanada chuqurroq tahlil qilish imkoni yaratildi. Bu usul, o'z navbatida, lazer nurlanishining parametrlarini (fazoviy taqsimot, intensivlik, h.k.) boshqarish orqali modifikatsiyalangan plazmani shakllantirish uchun keng qo'llanishi mumkin. 2.5a-rasmda KTN orqali tarqalgan 0,63 μm nurlanishning intensivlik taqsimotini tahlil qilish imkonini beruvchi eksperimental qurilmaning prinsipal sxemasi keltirilgan. Lazer nurlanishi kattalashtirilgan teleskop (L_1, L_2) orqali tarqaladi va keyin 250 mm fokusli silindrik linzalar (L_3) yordamida fokuslanadi. CCD kamera ushbu linzaning fokus tekisligiga joylashtirilgan. Apertura (PH) esa lazer nurlanishini fazoviy filtrlash imkonini beradi. 2.5b-rasmda KTN orqali namuna sirtida hosil qilingan plazma bo'laklarini tasviri keltirilgan.

Tasvirda vakuum kamerasi ichida joylashgan nishon namunasi va ko‘p sonli plazma



2.5-rasm: a) KTN ning turli joylashgan holatlari (1-6) da CCD kamera bilan o‘lchangan modeli, b) ushbu model asosida 0,63 mkm nurlanish va KTN yordamida hosil qilingan plazma tasviri.

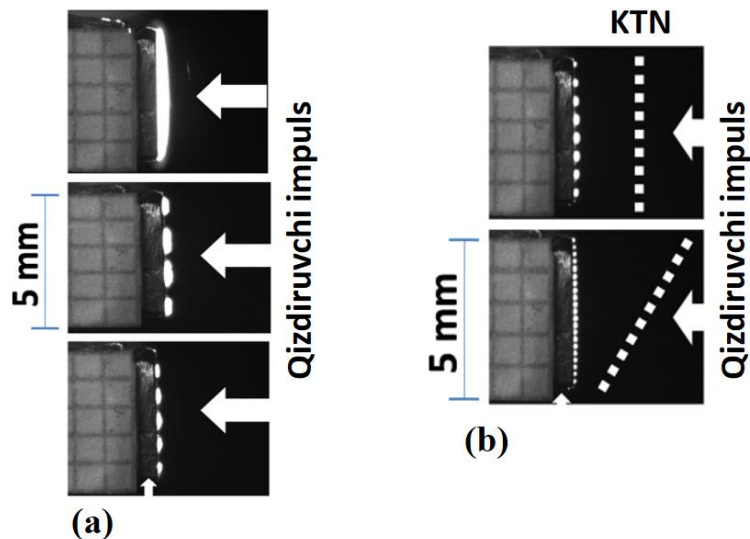
bo‘laklari ko‘rsatilgan. Rasmda, shuningdek, silindrik linza (L_3) hamda qizdirish nurlanish impulsi (HP) aks ettirilgan. Ushbu usulda hosil bo‘lgan plazma bo‘laklari KTNdan o‘tgach, yuqori garmonikalar generatsiyasi uchun zarur bo‘lgan davriy plazma strukturasi shakllantiradi. Ushbu modellashtirish natijalari 2.6-rasmda keltirilgan. Bunda KTN qo‘yilmagan (KTNsiz) holatda fokuslangan 0,63 μm lazer nurlanishining CCD kamera sirti (yoki detektor tekisligi)da hosil qilgan chiziqsimon shakli 2.6(a)-rasmning yuqori qismida ko‘rsatilgan. Keyin KTN teleskop ichiga 2.5(a)-rasmda ko‘rsatilgan beshta (1–5) turli holatlarga mos holda 2.6(a)-rasmda 1, 3 va 5- holatlaridagi KTN yordamida hosil qilingan lazer nurlarining shakllari 2.6a-rasmning qolgan qismlarida joylashgan holat tartib raqamlari bilan tasvirlangan. Bu tasvirda 1-holatda ikkita 3 mm uzunlikdagi nurni shakllantirishga imkon berdi, biroq ular orasida interferensiya natijasida paydo bo‘lgan uchinchi zaif nurlanish chizig‘i paydo bo‘ldi. Keyin KTN teleskopning optik o‘qi bo‘ylab siljatilgach, ajratilgan nurlar o‘lchami



kamaydi (3- va 5-holatlar, 2.6-rasm: a) ko'p tirqishli niqob teleskop ichidagi holatlarida va b) teleskop va silindrik linza orasidagi holatida turli burchaklarga burish orqali hosil qilingan modellashtirilgan plazma tasviri. 2.6(a)-rasm), buning natijasida davriylashgan tasvirlar yuzaga keldi. Ushbu jarayon davomida teleskop ichida o'tkazilgan modellashtirish, 5-holatga yaqinlashish orqali davriylashgan chiziqlar va ularning orasidagi masofani boshqarish imkonini berishini ko'rsatdi. Shunga o'xshash, KTNni teleskop va silindrik linza o'rtasidagi holatda (2.5a-rasmda tasvirlangan 6-holatga ko'ra) turli burchaklarga (0° , 40° , 50°) burish orqali lazer nurlarining shaklini o'zgartirish jarayoni ko'rsatilgan. KTN silindrik linzalarning fokus tekisligiga nisbatan 50° burchakka burilgach, nurlar o'lchamining kamayishi va bo'laklar sonining ortishi qayd etildi. Olingan natijalar nishon sirtida hosil bo'ladigan real plazma bo'laklarining kengayishini ko'rsatmaydi. Shu sababli, modellashtirish natijalarini vakuum sharoitida, nishon sirtida haqiqiy yuqori nurlanish energiyasiga ega lazer ablatsiya natijasida hosil bo'ladigan plazmalarda sinab ko'rish zarur. Ushbu modellashtirish lazer nurlanishining fazoviy taqsimotini boshqarish hamda plazma hosil qilish jarayonlarini optimallashtirish uchun muhim ahamiyat kasb etadi.

Impuls davomiyligi 38 ps bo'lgan lazer nurlanishi yordamida modifikatsiyalangan plazma hosil qilish. HeNe lazer nurlanishi yordamida o'tkazilgan model tajribalari silindrik linzalarning fokus tekisligida fazoviy modulyatsiyalangan lazer nurlarining shakllanishini ko'rsatdi. Ajratilgan nurlar va ularning o'lchamlari orasidagi masofa KTN o'rnini o'zgartirish orqali asta-sekin sozlanishi mumkinligi kuzatildi. Bunday sharoitlarda intensiv impulslarni qo'llash silindrik linzalarning markazlashtirilgan tekisligiga joylashtirilgan nishonni ablatsiya qilish jarayonida modulyatsiyalangan plazma alangalarini shakllantirishga imkon beradi. Yuqoridagi modelni haqiqiy yuqori quvvatli Nd:YAG lazeri yordamida davom ettiriladi. Ushbu lazerning impuls parametrlari: to'lqin uzunligi 1064 nm, impuls davomiyligi 38 ps va nurlanish energiyasi 6 mJ. Lazer nurlanishi teleskop orqali tarqalib, silindrik linza yordamida nishon sirtida plazma hosil qilish uchun fokuslanadi (2.5b-rasmga qarang). Nishon sifatida 5 mm uzunlikdagi Mn va Ag namunalari ishlatilgan. Lazer

nurlanishi vakuum kamerasi ichidagi namuna sirtiga fokus uzunligi 250 mm silindrik linzalar yordamida uzunligi 5 mm qalinligi 70 μm o'lchamdagi plazmani yaratadi. Plazma bo'laklarining tasvirlari vakuum kamerasi tashqi oynasi orqali CCD kamera yordamida olingan. 2.7a -rasmda 5 mm uzunlikdagi Mn plazmasining tasviri va turli o'lchamdagi plazma bo'laklarining tasvirlari ko'rsatilgan. KTN teleskop ichida va tashqarisida turli holatlarda o'rnatilganda, ko'p sonli plazma bo'laklarining shakllanishiga olib keldi, bu 0,63 μm to'lqin uzunligidagi HeNe lazeri bilan olib borilgan tajribalar bilan taqqoslandi. Ushbu bo'laklarning o'lchamlari va masofalari yuqorida tavsiflangan tajribalarga o'xshash tarzda o'zgargan. 2.7a-rasmning o'rta va pastki qismlarida KTN ni 2.5a-rasmning 3 va 4-holatlarida o'rnatish orqali Mn yuzasida hosil bo'lgan ko'p sonli plazma



2.7-rasm: a) Nd: YAG lazeri yordamida qizdirish impulsi yo'lida (yuqori qismi) KTN ni kiritmasdan olingan Mn plazmasining uzun tasviri, KTN 2.5a-rasmdagi 3-holatga joylashtirilgan plazma bo'laklarining tasviri (o'rta qismi), va KTN bilan 2.5a-rasmning 4-holatga joylashtirilgan plazma bo'laklarining tasviri (pastki qismi), b) 2.5a-rasmdagi 6-holatga KTN ni qizdirish nuri yo'nalishiga ortogonal (yuqori qismi) va KTN ning 50° ga burilgan holda silindrik linza oldiga qo'yish orqali olingan Mn plazmasining tasvirlari (pastki qismi).

bo'laklarini ko'rsatadi. Bunday holda, to'rt va besh bo'lakli plazmalar shakllangan bo'lib, ularning o'lchamlari 0,6 mm yoki undan qisqaroq ekanligi aniqlandi. KTN ning 6-holatida (2.5a-rasm), ya'ni teleskop va silindrik linza orasiga optik o'qqa perpendikulyar o'rnatilishi ablatsiya

qilingan nishonning butun yuzasi bo‘ylab sakkizta bo‘lakning shakllanishiga olib keldi (2.7-rasm (b), yuqori qismi). Ushbu sharoitlarda KTN ning 50° burchakka bosqichma-bosqich burib borish natijasida plazma bo‘laklari sonining 21 tagacha o‘sishi kuzatildi (2.7b-rasm, pastki qismi). Bu jarayonda taxminan 0,1 mm uzunlikdagi plazma bo‘laklarining hosil bo‘lishi kuzatildi. Ushbu davriy modifikatsilangan plazma bo‘laklari garmonika samaradorligini oshirishi uchun muhim imkoniyatlarni yaratadi. Plazma bo‘laklarining shunga o‘xshash modifikatsiyasi Ag nishon namunasi uchun ham olingan. Ushbu tadqiqot natijalari plazma hosil qilish va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi jarayonlarini yaxshilashda yangi imkoniyatlarni ochib beradi.

II-bobning muhim xulosalari

Uglerod tarkibli yonuvchi muhitlarda nanozarralar hosil bo'lishi haqidagi taxmin asosida yonish alangasidan 50 mm balandlikda shisha taglik ustida uglerod tarkibli qatlamlar shakllantirish usuli ishlab chiqildi.

YuTGG tahlil qilish uchun nanozarralarni etanol tomchilaridan shisha taglikka joylashtirish va 60°C haroratda plyonka shaklida qatlam hosil qilish metodologiyasi ishlab chiqildi. Ushbu metod nanozarralarning harakati natijasida taglik yuzasida bir xil zichlikda joylashgan qatlam yaratishga imkon beradi.

Ko'p tirqishli niqobning teleskop ichida va tashqarisida turli holatlarda o'rnatilishi orqali o'zgaruvchan ko'p sonli plazma bo'laklari shakllanishiga, shuningdek, plazma bo'laklari sonining 21 tagacha oshishiga imkon beruvchi tajriba uslub ishlab chiqildi.

III BOB. YONISH ALANGALARIDA VA LAZER ABLATSIYASI YORDAMIDA SINTEZ QILINGAN NANOZARRALARDA QUYI TARTIBLI NOCHIZIQLILIK

Ushbu bobda yonish alangalarida va lazer ablatsiyasi orqali sintez qilingan nanozarralarning quyi tartibli nochiziqli optik xossalari keltiriladi. To‘lqin uzunligi 1064 nm, davomiyligi 28 ps bo‘lgan lazer nurlanishining ta’siri ostida sham va etanol alangalarida uchinchi garmonika generatsiyasi bo‘yicha olingan tajribaviy natijalar bayon etiladi. Bundan tashqari, sham alangasidan olingan uglerod qoplamalarining super-gidrofobik xususiyatlari ham namoyish etiladi.

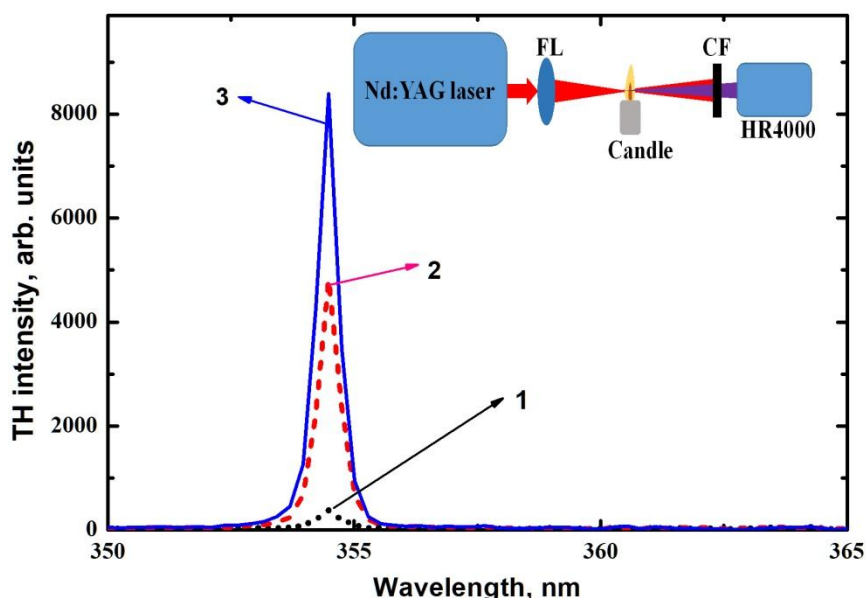
Shuningdek, Zn va ZnSe nanozarralarini etanol muhitida lazer ablatsiyasi yordamida sintez qilish jarayoni va hosil bo‘lgan kolloid suspenziyalarining quyi tartibli nochiziqli optik parametrlarini o‘lchashga bag‘ishlanadi. Ushbu o‘lchovlar uchun Z-skanerlash texnikasi yordamida to‘lqin uzunliklari 1030 nm va 515 nm bo‘lgan zondlash lazer impulslari qo‘llaniladi.

3.1. § Uglerod tarkibli yonish alangalarida uchinchi tartibli garmonika generatsiyasi

Yuqori energiyali ultraqisqa lazer impulslarining havoda yoki yonish alangalarida tarqalishi jarayoni, asosan, Kerr effektining o‘z-o‘zini fokuslashi va plazma defokuslanishi o‘rtasidagi muvozanat bilan bog‘liq bo‘lib, ushbu jarayonlar lazer filamentatsiyasini keltirib chiqaradi. Alanga muhitida hosil bo‘lgan filamentatsiya yuqori samaradorlikka ega nochiziqli optik effektlar, xususan, uchinchi garmonika generatsiyasini keltirib chiqaradi. Bunday jarayon davomida alanga ichida hosil bo‘lgan plazma va boshqa nanozarralar lazer nuri bilan o‘zaro ta’sir qiladi, bu esa optik effektlarni yuzaga keltiradi. Bu hodisa nafaqat uchinchi garmonika generatsiyasini, balki boshqa yuqori tartibli garmonikalarni ham keltirib chiqaradi. Biroq, yuqori garmonika generatsiyasining energiyasi havoda yutilgani sababli, uni aniq ko‘rish va o‘lchash qiyinlashadi.

Zamonaviy qayd qilish qurilmalari yordamida sham va etanol alangalarida olingan uchinchi garmonika generatsiyasini tahlil qilish imkoniyatlari mavjud. 3.1-rasmda barcha holatlarda to‘lqin uzunligi 1064 nm bo‘lgan nurlanish impulslarining energiyasi 3,6 mJ da har bir muhit

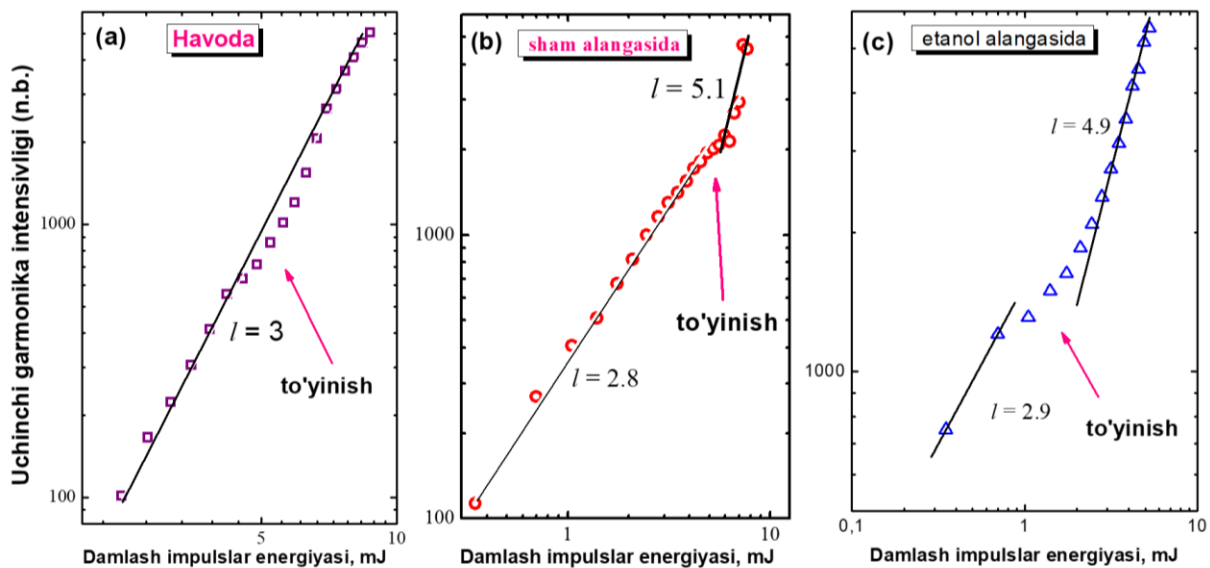
uchun uchinchi garmonika spektri keltirilgan. Tasvir yuqori ichki qismida jarayonni amalga oshirish uchun ishlatilgan eksperimental sxema aks ettirilgan. Ushbu jarayonlarni yorituvchi tajriba natijalari 3.1-rasmda havoda (1), sham (2) va etanol alangalarida (3) hosil bo‘lgan uchinchi garmonika generatsiyasi spektrlari keltirilgan. Grafikdan ko‘rinadiki, havoga



3.1-rasm. Havoda (1), sham alangasida (2) va etanol alangasida (3) uchinchi garmonika generatsiyasi tasvirlangan [1A].

nisbatan sham alangasida uchinchi garmonika generatsiyasining samaradorligi 12 marta, etanol alangasida esa 24 marta oshganligi kuzatildi. Ma'lumki, havo turli komponentlardan — azot (N_2), kislorod (O_2) va argon (Ar) aralashmasidan iborat noxiziqli muhit sifatida qaraladi. Shamning asosiy tarkibiy qismi esa parafin uglevodorodi ($C_{31}H_{64}$) hisoblanadi. Havo muhitida olingan uchinchi garmonika generatsiyasining almashtirish samaradorligi alanga muhitida olingan natijaga nisbatan 12 va 24 baravar kichik ekanligi sababli, havo komponentlarining alangada hosil bo‘lgan uchinchi garmonika generatsiyasiga ta'sirini inobatga olmasa ham bo'ladi. Havo muhitida garmonika generatsiyasi samaradorligining past ekanligi havo tarkibidagi zarralar konsentratsiyasi kamligi hosil bo‘lgan uchinchi garmonika samaradorligini pasaytirishga olib keladi. Tajriba davomida yonish alangalarida nanozarralar havoga nisbatan ko‘proq mavjud bo‘lgani sababli, uchinchi garmonika samaradorligining havoga qaraganda sezilarli darajada yuqori bo‘lishi mumkin deb taxmin qildik. Ilgari bunday plazma

alangalari havoda metal nishonlarining sirtida hosil qilingan, hamda bu plazma tarkibida nanozarralarning mavjudligi quyi va yuqori tartibli garmonika generatsiyasini oshirishi mumkinligi ta'kidlangan edi [11; 1995-b.]. Xuddi shunga o'xshash tajribalar indiy va marganets kabi metallarning havodagi plazma holatlarida qayd etilgan [5; 120701-b.]. Marganets plazmasi misolida maksimal uchinchi garmonika generatsiyasi ($\sim 10^{-4}$) samaradorligiga erishilgan. Umuman olganda, uglerod nanozarrachalari yuqori noxiziqli koeffitsientlarga ega bo'lib, ular nurlanishni samarali qayta yo'naltirishi va garmonikalarni kuchaytirishi mumkin. Alanganing optik zichligi va nanozarrachalarning hajmiy taqsimoti generatsiya samaradorligiga ta'sir ko'rsatadi. Uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligining lazer nurlanishing energiyasiga bog'liqligini tadqiq qilish orqali hosil bo'layotgan uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligining cheklash mexanizmlarini aniqlash imkoniyatiga ega bo'lamiz. 3.2-rasmda havo, sham va etanol alangasida lazer impulslarining turli energiyalaridagi uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligi o'zgarishi



3.2-rasm: a) havo, b) sham alangasi va c) spirt alangasida hosil bo'lgan uchinchi garmonika intensivligining zondlash energiyasiga bog'liqligi [1A].

ko'rsatilgan. Havoda uchinchi garmonika generatsiyasi intensivlik grafigida ozgina to'yinganligi kuzatildi, bu esa 3.1-formulada berilgan yuqori lazer impuls energiyalarida $I \sim E^3$ bog'liqligining kutilgan darajadan birozgina og'ishiga olib keldi. Ushbu og'ish, yuqori impuls intensivligida havodagi erkin elektronlar konsentratsiyasining ortib borishi bilan bog'liq. Yuqori

intensivlikdagi lazer nurlanishi natijasida ionlashish jarayonlari kuchayadi, natijada muhitda ko‘proq erkin elektronlar hosil bo‘ladi. Bu erkin elektronlar nurlanishning optik maydoni bilan o‘zaro ta’sirga kirishib, uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligini pasaytiradi. Erkin elektronlarning bunday kontsentratsiyasi uchinchi garmonika generatsiyasining faza moslashuvi sharoitlariga ta’sir ko‘rsatadi va nurlanishning bir qismi ionizatsiya tufayli sarflanadi yoki erkin elektronlar ta’sirida sochiladi. Bu jarayon nafaqat ushbu tadqiqotdagi uchinchi garmonika generatsiyasi, balki YuTGG ning ham samaradorligini pasaytiruvchi omil sifatida baholanadi. Uchinchi garmonika generatsiyasining samaradorligining erkin elektronlar kontsentratsiyasiga bog‘liqligi avvalgi tadqiqotlarda ham qayd etilgan [9; 525-b.]. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, erkin elektronlar kontsentratsiyasi sezilarli darajada ortganda, uchinchi garmonika generatsiyasining samaradorligi va zondlash energiyasi orasidagi 3 darajali bog‘lanish buziladi, hamda uchinchi garmonika generatsiyasi va lazer nurlanish impulsi orasidagi fazaviy barqarorlik buziladi, natijada samaradorlikda to‘yinganlik holati yuzaga keladi.

Etanol va sham alangasida lazer energiyasining (E) oshishi bilan uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligining havoda hosil qilinganiga nisbatan kuchliroq to‘yinganligi kuzatildi. Shuningdek, uchinchi garmonika generatsiyasi intensivligining zondlash energiyasining keyingi oshib borgan qiymatlariga bog‘liqliklari $I_{UG} \propto E^5$ munosabat bilan xarakterlanuvchi kattaroq og‘ishni ko‘rsatdi (3.2b- va 3.2c-rasmlar qarang). Uchinchi garmonika generatsiyasining intensivligini ifodalovchi $I_{UG} \propto E^3$ bog‘lanishida chetlanishlarga asosiy sabab sifatida Kerr nochiziqligi ta’siridan kelib chiqadigan faza siljishi hisoblanadi. Kerr nochiziqligi sababidan zondlash va hosil qilinayotgan uchinchi garmonika generatsiyasi orasidagi fazaviy munosabat buziladi, bu esa zondlash energiyasi darajasini nazariy ifodalangan qiymatlaridan farq qiladi [6; 2170-b., 16; 140-b., 17; 1227-b.]. Shu bilan birga, $I_{UG} \propto E^5$ kabi noodatiy bog‘liqlik ikkinchi darajali Kerr effekti bilan izohlash mumkin. Bu bog‘liqlik shundan dalolat beradiki, zondlash nurlanishining intensivligi oshgani sayin uchinchi garmonika generatsiyasi bilan bir qatorda yuqori tartibli nochiziqli jarayonlar ham

yuzaga keladi, chunki katta energiyali zondlash nurlanishida ko‘proq fotonlar o‘zaro ta’sirga kirishadi va hosil bo‘ladigan garmonikalar kuchayadi. Bunda E^5 bog‘liqlik kuchli nochiqli effektlarning ishtiroki natijasida paydo bo‘ladi va Kerr nochiqligi bunda hal qiluvchi rol o‘ynaydi. Uchinchi garmonika generatsiyasida monoxromatik to‘lqinlarning o‘zaro ta’sirida, fazalar moslashish shartlariga erishish uchun $\Delta k = k_3 - 3k_1 = 0$ tenglamasi bajarilishi kerak (bu yerda k_1 va k_3 — mos ravishda asosiy to‘lqin va uchinchi garmonika nurlanishining to‘lqin vektorlari). Ushbu shart ($\Delta k = 0$) faqat hosil bo‘lgan garmonika chastotasi tekshirilayotgan muhitning anomal dispersiya ega bo‘lgan dagina amalga oshadi [18; 139-b., 19; 143903-b.]. Havo ham, foydalanilgan yonish alangalari ham $\lambda = 354.6$ nm sohasida normal dispersiyaga ega bo‘lganligi uchun fazalarni moslashtirish sharti bajarilmadi. Bu holda hosil bo‘lgan uchinchi garmonika nurlanishining intensivligini quyidagicha hisoblash mumkin [20; 180-b.]:

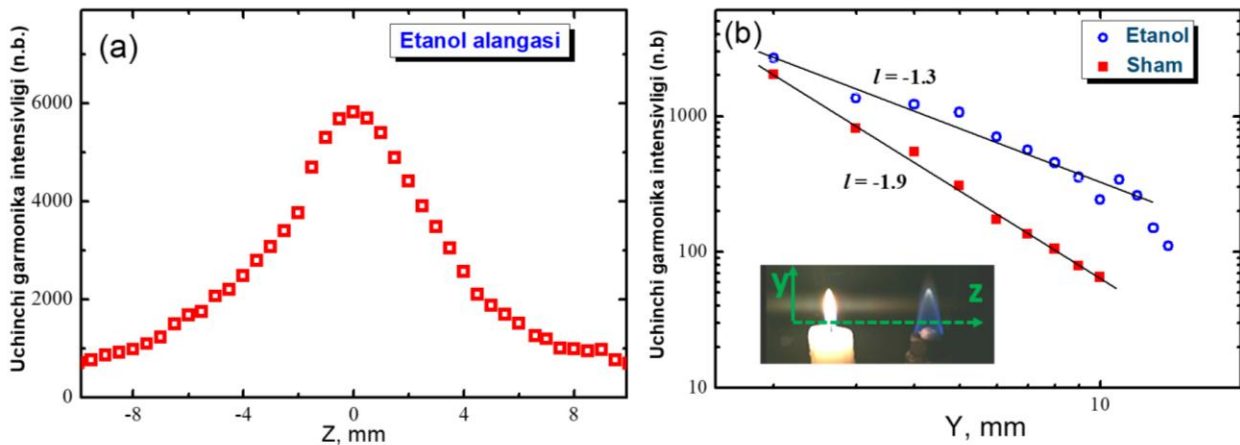
$$I_{3\omega} = \gamma^2 l^2 I_{10}^3 \exp(-6k_1 r^2 / b) \sin^2 \Delta(l, r) / \Delta^2(l, r) \quad (3.1)$$

bu yerda $\gamma = 24\pi^3 \chi^{(3)}(-3\omega; \omega, \omega, \omega) / (n_1^{3/2} n_3^{1/2} c \lambda_1)$, $\Delta(l, r) = 2b/l - \alpha - \beta$, $\alpha = 2l\Delta k$ - normashgan fazaviy moslashish, $\beta = 72\pi^3 l \Delta \chi_k I_{10} \exp(-2k_1 r^2 / b) / (n_1^2 c \lambda_1)$, $\Delta \chi_k = \chi^{(3)}(-\omega; \omega, \omega, -\omega) / 2 - n_1 \chi^{(3)}(-3\omega; 3\omega, \omega, -\omega) / n_3$ asosiy nurlanish va garmonika to‘lqin uzunliklarida sindirish ko‘rsatkichlari o‘zgarishi uchun javob beradigan Kerr effekti tomonidan yuzaga kelgan nochiqlilarning farqi, λ_i , k_i va n_i i- nurlanish chastotasi bo‘yicha asosiy lazer nurlanishi va uning uchinchi garmonika to‘lqin uzunliklari, to‘lqin vektori va sindirish ko‘rsatkichlarini harakterlaydi. I_{10} -lazer nurlanishining fokus tekisligidagi maksimal intensivlik qiymati, b - konfokal parametri, hamda l qaralayotgan nochiqli muhitning uzunligini ifodalaydi.

Uchinchi garmonika intensivligi va zondlash energiyasi ($I_{3\omega} \propto I_{10}^3$) o‘rtasidagi bog‘liqlik tenglamadagi ta’sir qiluvchi effektlarning kichik ta’siri ($|\beta| \ll b/l$) bilan hisobga olinadi. Bu kichik ta’sirlar fazaviy mos kelmaslik bilan izohlanadi, ya’ni nurlanishlar o‘zaro ta’sirida fazalarning mos kelmasligi (faza dispersiyasi) uchinchi garmonika samaradorligini pasaytiradi. Agar o‘z-o‘ziga ta’sir qilish kuchli bo‘lsa, uchinchi garmonika generatsiyasini hisoblashda nurlanishning fazaviy moslashuvini va nurlarning o‘zaro ta’sirini (o‘z-o‘zini fokuslash va o‘z-o‘zini defokuslash)

hisobga oladigan yanada murakkabroq tenglamalarni qo‘llash kerak bo‘ladi. Kerr effekti elektr maydonining ta‘siri ostida muhitning sindirish ko‘rsatkichini o‘zgartirib, optik to‘lqinlarning sinishi va tarqalishini boshqaradi. Bu esa to‘lqinlarning fazaviy moslashuviga ta‘sir qilib, uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligini oshiradi [21; 109-114-b.]. Yonish alangasini o‘rganish natijalari shuni ko‘rsatdiki, yuqori energiyali lazer impulslarida ($I_{3\omega} \propto I_{1\omega}^5$) nazariy bog‘liqlik va eksperimental natijalar o‘rtasida moslik mavjud. Nazariy hisob-kitoblar shuni ko‘rsatadiki, lazer intensivligi oshgan sari bu bog‘liqlik qiyaligining sezilarli darajada pasayishi kuzatilishi mumkin [20; 180-b.]. Bunday holda, nochiziqli muhit markazida zaif fokuslangan lazer nurlanishi uchun uchinchi garmonika generatsiyasining samaradorligi $1,3 \cdot 10^{-3}$ dan oshmasligi kutiladi [19; 143903-b.]. Eksperimental natijalarimizga ko‘ra, maksimal almashtirish samaradorligi $2,4 \cdot 10^{-4}$ ni tashkil etdi, bu nazariy hisob-kitoblardagi maksimal qiymatdan taxminan 5 baravar past ekanligi aniqlandi. Bu farqni fazaviy moslashish sharti to‘liq bajarilmagani bilan izohlanishi mumkin. Fazaviy moslashuv yetarlicha ta‘minlanmagan holatlarda, to‘lqin vektorlarining sinxronlashmasligi uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligini pasayishiga olib keladi.

Linzaning fokus tekisligiga namunalarning joylashuvi va yonish alangasida hosil bo‘layotgan uglerod nanozarralarining mavjudligini tahlil qilish maqsadida z va y o‘qlari bo‘yicha skanerlash usuli qo‘llanildi. Bu usulda lazer nurlanishining optik yo‘li bo‘ylab z o‘qi (yonish alangasiga perpendikulyar yo‘nalishda) va alangada hosil bo‘layotgan uglerod nanozarralarining tarqalishi bo‘ylab y o‘qi (yonish alangasining uzunligi yo‘nalishida) bo‘yicha tadqiqotlar olib borildi. O‘tgan tekshiruvlar shuni ko‘rsatadiki, hosil bo‘layotgan nanozarralarning konsentratsiyasi alanganing markaziy qismlarida maksimal darajada ekanligi aniqlandi. Ushbu natijalar uglerod tarkibli alangalarda, xususan, etanol alangasida, haroratning eng yuqori bo‘lgan joylarida nanozarralar hosil bo‘lishini tasdiqlovchi ilmiy tahlillarga



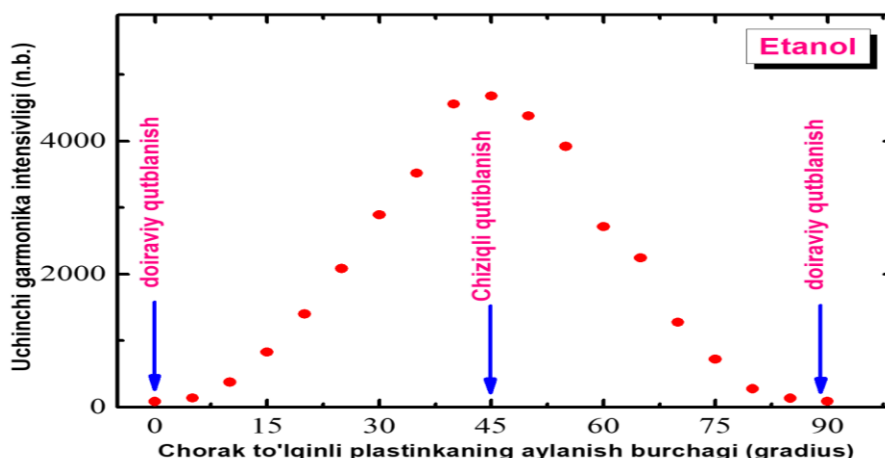
3.3-rasm: a) linzalarning fokus tekisligiga nisbatan etanol alangasida uchinchi garmonika intensivligining o'zgarishi, b) garmonika samaradorligining etanol (va sham alangai manbasigacha bo'lgan masofaga bog'liqligi [1A].

to'liq mos keladi. Uchinchi tartibli garmonika generatsiyasi intensivligining y o'qi bo'yicha pasayish natijalari shuni ko'rsatdiki, etanol alangasida bu o'q bo'ylab alangada hosil bo'layotgan nanozarralar konsentratsiyasining o'zgarishi manoton tarzda kamayishini anglatadi, bu esa alangada haroratning bosqichma-bosqich pasayishi bilan bog'liq. Sham alangasi uchun esa y o'qi bo'ylab nanozarralarning manoton kamayishi etanol alangasiga nisbatan sezilarli darajada katta ekanligi qayd etildi. Ushbu holat sham alangasida haroratning past darajalarda tushishi natijasida, hamda etanol alangasiga nisbatan sham alangasining kengligi qisqaroqligi natijasida nanozarralarning birikib, agregat holatga o'tishi va shu bilan ularning konsentratsiyasining pasayishi bilan izohlanadi. Alanganing balandligi har ikki namuna uchun ~20 mm. Alanganing kengligi sham va etanol alangai uchun mos ravishda taxminan 6 va 10 mm o'lchandi. Sham alangasi holatida, zarrachalar hosil bo'lishi intensivroq bo'lib, sham yonish jarayonida ko'proq konsentratsiyadagi nanozarralar hosil bo'ladi. Ammo pilikdan uzoqlashgan sari zarrachalar konsentratsiyasi kamayadi. Bu kamayish y o'qi bo'ylab olib borilgan o'lchovlarda uchinchi garmonika samaradorligining pasayishi sifatida namoyon bo'ldi. Sham alangasidagi zarrachalar hosil bo'lishi va ularning evolyutsiyasi murakkab jarayon hisoblanadi. Shu sababli alangada nanozarralar hosil bo'lishi uchta asosiy zonada amalga oshadi:

- ✓ ichki zonada parafin yoki stearin bug‘lari hali to‘liq yonmagan bo‘lib, alanga nanozarralarini shakllantiruvchi molekulalar hosil bo‘ladi;
- ✓ o‘rta zonada harorat yuqori va kislorod miqdori kamligi sababli nanozarralar hosil bo‘ladi va ular yiriklashadi;
- ✓ tashqi zonada esa kislorod ko‘p bo‘lgani uchun zarrachalarning ko‘pi oksidlanib yo‘qoladi, ammo oksidlanmagan zarralar qora tutun sifatida chiqadi.

Birlamchi zarrachalar va ularning agregatlari o‘lchamlari alanganing markaziy qismi va boshqa oqim chiziqlari bo‘ylab taqqoslanib, turli zonadagi nanozarralar hosil bo‘lishi va evolyutsiyasi bir-biridan farq qilishi aniqlangan (22; 615-b.). Etanol alangasi holatida, zarrachalar to‘planishi sham alangasiga qaraganda ancha kamroq bo‘ldi. Bu esa 3.3b-rasmda ko‘rsatilgan uchinchi garmonika samaradorligining etanol alangasida $l = -1,3$ manoton pasayishini izohlashga yordam beradi. Zarrachalarning to‘planmasligi va ularning alangada kam miqdorda bo‘lishi shisha tagliklarda hosil bo‘lgan plyonkalarda zarracha qoldiqlarining kuzatilmaganligi bilan tasdiqlangan. Etanol alangasida uchinchi garmonika samaradorligining kamayishi havoda alangani kengayishi va zarracha konsentratsiyasining kamayishi bilan bog‘liq.

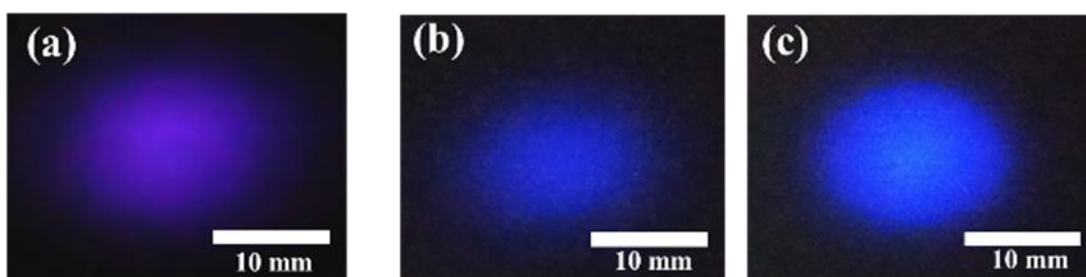
Quyidagi 3.4- rasmda etanol alangasi orqali tarqaladigan pikosekund davomiyligidagi zondlash impulslarining turli qutblanishlarida uchinchi garmonika intensivligining qanday o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Bu egri chiziqlar fokuslovchi linza oldiga qo‘yilgan chorak to‘lqinli plastinka ($\lambda/4$) ning turli burilish burchaklarida o‘lchandi. Plastinkaning aylanishi natijasida lazer nurlanishining qutblanishi chiziqli qutblanishdan (45° da) doiraviy qutblanishga (0° va 90° da) o‘zgaradi. Rasmda chiziqli qutblanishdan chetga chiqqanda uchinchi garmonika intensivligining pasayishi ko‘rsatilgan. Bunday bog‘liqlik har qanday izotrop muhitda nochiziqli optik chastota almashtirish jarayoniga xos hisoblanadi. Doiraviy qutblanishga ega lazer impulslarini qo‘llash natijasida uchinchi garmonika signalining to‘liq yo‘qolishi kuzatildi. Chiziqli qutblanish optimal uchinchi garmonika signalini ta’minlaydi, chunki bu holatda lazer nurlanishining elektr maydoni va muhitning



3.4-rasm. Etanol alangasida hosil bo‘lgan uchinchi garmonika intensivligining zondlash impulslarining qutblanishiga bog‘liqligi.

optik xususiyatlari samarali tarzda o‘zaro ta’sirlashadi. Doiraviy qutblanishda esa elektr maydoni yo‘nalishi doimiy ravishda o‘zgarib turadi, bu esa chastota almashtirish jarayonining samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi.

Shuningdek, tadqiqotlarda havoda, sham va etanol alangasida hosil bo‘lgan uchinchi garmonika nurlarining fazoviy taqsimotini tahlil qilindi. Bu signalning Gaussga o‘xshash profili har bir muhitda ahamiyatsiz to‘lqin fronti buzilishlari bilan hosil bo‘ldi. 3.5-rasmda ushbu uch muhitda hosil bo‘lgan uchinchi garmonika nurining fazoviy taqsimoti ko‘rsatilgan.



3.5- rasm. Energiyasi 3,5 mJ bo‘lgan zondlash impulslari yordamida hosil bo‘lgan uchinchi garmonika generatsiyasining fazoviy taqsimoti: a) havoda, b) sham va c) etanol alangasida.

Eksperimental sharoitlar o‘xshash bo‘lishiga qaramay, uch muhitda kuzatilgan ushbu nurlanishning yorqinligi farq qildi. Bu farq uchinchi tartibli nochiziqli optik jarayonlarning samaradorlik koeffitsienti bilan bog‘liq ekanligi aniqlandi. Havoda hosil bo‘lgan uchinchi garmonika nurlanishining fazoviy taqsimoti impuls davomiyligi femtosekund lazer nurlanishi yordamida o‘rganilgan [23; 728–733-b.]. Tadqiqot natijalariga

ko'ra, uzoq masofada hosil bo'lgan uchinchi garmonika generatsiyasi ikki xil profil ko'rinishida namoyon bo'ladi. Birinchi tur, eksanal komponent bo'lib, bu nur asosiy yo'nalishda to'g'ri tarqaladi. Ikkinchi tur esa halqasimon konus shaklida bo'lib, bu komponent nurlanish o'qidan chetga chiqib, tarqaladi. Ushbu taqsimot uchinchi garmonika impulsining qat'iy fokuslash geometriyasi va Kerr effekti ta'sirida shakllanadi.

Sham alangasida ba'zi muhit tarkibiy qismlari, masalan, kuyuk nanozarralar va ularning agregatlari, lazer nurlanishining to'lqin frontini buzilishiga sabab bo'lishi mumkin. Bu buzilish uchinchi garmonika nurlanishining fazoviy modulyatsiyasini keltirib chiqaradi va nurni ideal bo'lmagan shaklda tarqatadi. Natijada, sham alangasida hosil bo'ladigan garmonika signalining yuqori darajada modulyatsiyalangan va notekis tarqalganligi kuzatiladi. Etanol alangasida esa bunday kuchli modulyatsiya kuzatilmadi, chunki bu muhitda katta nanozarralar yoki murakkab agregatlar shakllanmaydi. Natijada, garmonika signalining fazoviy taqsimoti etanol alangasida shanga nisbatan barqarorroq va tozaroq Gauss profilida bo'ladi. Bu shuni ko'rsatadiki, nanozarralar konsentratsiyasi va ularning o'lchami nurlanishning fazoviy xossalariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

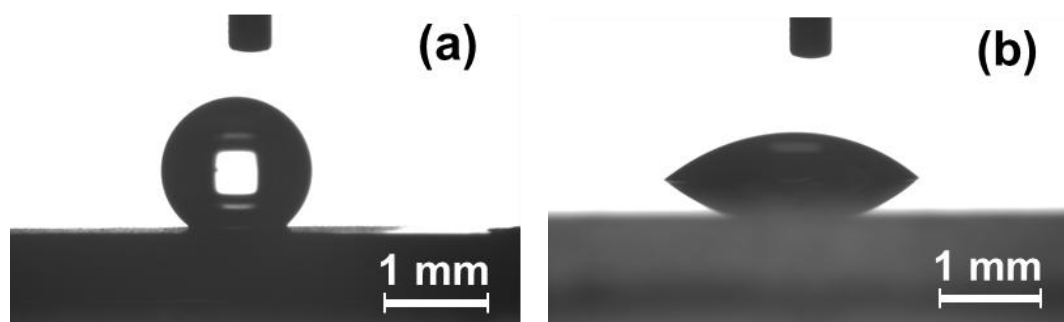
Sham va etanol alangalarida uchinchi garmonikaning samaradorligi havoga nisbatan sezilarli darajada yuqori bo'lib, bu nanozarralarning lazer nurlari bilan kuchli o'zaro ta'siri natijasida yuzaga kelgan. Havoda fazaviy moslashuvning yetarlicha ta'minlanmagani va erkin elektronlarning ortishi uchinchi garmonika samaradorligini pasaytirgan. Sham alangasida hosil bo'lgan nanozarralar fazaviy buzilishlarga sabab bo'lgan bo'lsa, etanol alangasida signal barqarorroq va toza bo'lgan. Umuman olganda, nanozarralarning konsentratsiyasi, lazer nurlanishi intensivligi va fazaviy moslashuv uchinchi garmonika generatsiyasi samaradorligiga hal qiluvchi ta'sir ko'rsatadi.

3.2. § Alanga nanozarralarining gidrofobik xususiyatlari

Sham va etanol alangasidan hosil bo'lgan shisha taglik yuzasidagi cho'kmalar uchinchi garmonika nurlanishi uchun manba sifatida xizmat qilib, alanga tarkibiy qismlarining xususiyatlari haqida qimmatli

ma'lumotlar beradi. Ushbu qoplamalar yuzasining xossalari, masalan, gidrofil (suv bilan oson namlanish) va gidrofob (namlanmaslik) xususiyatlarini aniqlash uchun turli ilmiy usullar qo'llaniladi. Bu tahlillar uchun tomchi burchagini o'lchash usulidan foydalanish yonish jarayonida ajralgan alanga tarkibiy qismlarining namlanish xususiyatlarini ochib beradi.

Yonish natijasida hosil bo'lgan alanga nanozarralari plyonkalarining tahlili 3.6-rasmدا ko'rsatilgan. Bu plyonkalarni uchinchi garmonika generatsiyasi

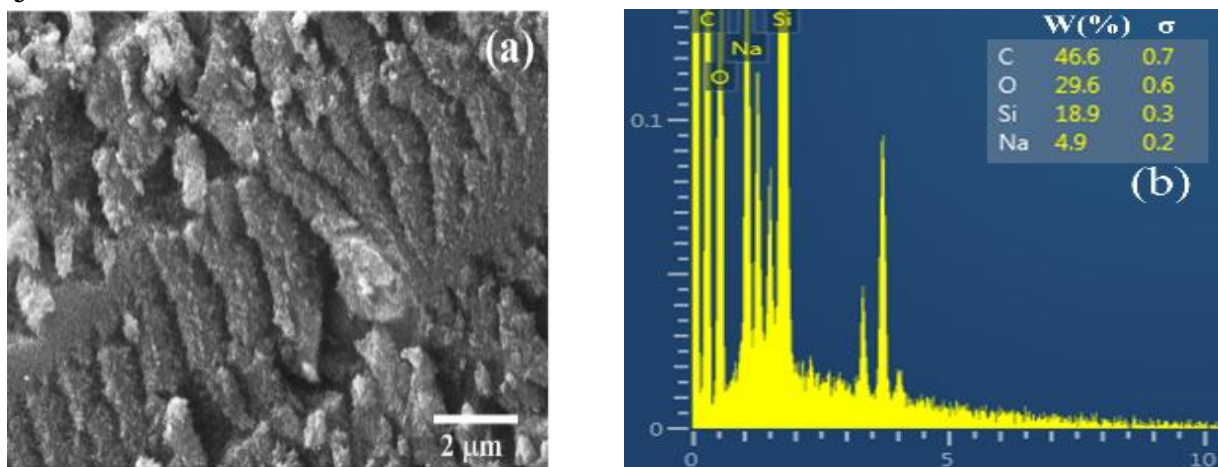


3.6-rasm: a) sham alangasidan olingan kuyik plyonkasining gidrofobik tasviri, b) toza shisha taglik yuzasida suvning gidrofil xossalari [1A].

tajribalari davomida shisha tagliklar yuzasiga joylashtirildi. Sham alangasidan yig'ilgan plyonkalar suvga nisbatan yuqori darajadagi gidrofobik xususiyatlarni namoyish etdi. Suv tomchisi plyonka yuzasiga qo'yilganda 142° aloqa burchagi hosil qildi, bu suvni o'ziga singdirmasligini ko'rsatadi va yuqori aloqa burchagi plyonkalarining gidrofob tabiati haqida ma'lumot beradi. Bundan tashqari, suv tomchisi yuzada harakatlana boshlaganda yoki sirpanib ketganda aloqa burchagi 6° gacha kamaydi. Bu hodisa material yuzasining suv tomchisini deyarli hech qanday qarshiliksiz sirpantirishga qodirligini bildiradi, bu esa uning supergidrofobik xususiyatini tasdiqlaydi. Boshqa tomondan, hali kuyuk qoplamasi yotqizilmagan oddiy shisha yuzasi 36° aloqa burchagi bilan gidrofil (suvni yutuvchi) xususiyatlarga ega ekanligi aniqlandi. Shuningdek, tajribalarimizda shisha taglikni yonish alangalari ustida turish vaqtini o'zgartirib, aloqa burchagini 155° gacha oshirishga erishildi. Bu natija yotqizilgan plyonkaning supergidrofobik xususiyatlari boshqa adabiyotlarda keltirilgan qiymatlardan sezilarli darajada kuchliroq ekanligini ko'rsatadi [24; 799-802-b.]. Etanol alangasi holatida plyonka

qalinligi sham alangasiga nisbatan sezilarli darajada kam bo'lgani uchun aloqa burchagida sezilarli o'zgarish kuzatilmadi. Bu natija z va y o'qlari bo'yicha skanerlashdan olingan ma'lumotlarni tasdiqlaydi, ya'ni etanol alangaida zarrachalar to'planishi va joylashuvi sham alangasiga qaraganda ancha kam ekanligini ko'rsatadi.

Shuningdek, uchinchi garmonika eksperimentlari davomida hosil bo'lgan yupqa plyonkalarining morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida o'rganildi (3.7a-rasm). Tasvirdagi notekis strukturalar gaz fazasidagi uglerod zarralarining sirtga joylashishi va agregatsiyasi natijasida yuzaga kelgan bo'lishi mumkin. Sham alangasi o'zida yuqori darajada erkin uglerod atomlari va klasterlarini saqlab turadi, bu esa alangadan chiqayotgan gazlar sovigan sari ularning mikro va nanostrukturalarga aylanishiga olib keladi. O'lcham jihatidan bu tuzilishlar mikron darajasida bo'lsada, ularning asosida nanozarralar yotgan bo'lishi mumkin. Shu bois, bu kabi qatlamlar, ayniqsa, garmonika generatsiyasi tajribalari uchun

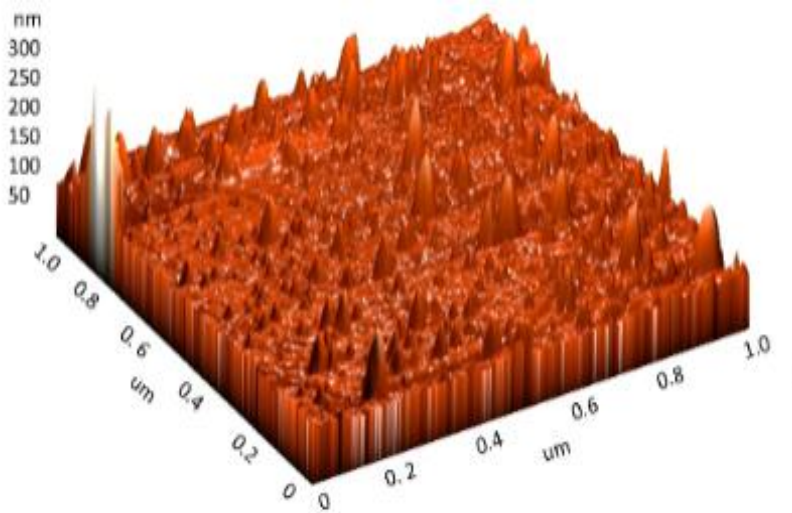


3.7- rasm: a) uglerod tarkibli yupqa plyonkaning SEM da olingan tasviri, b) plyonkaning elementar tarkibiy EDS spektri [1A].

uglerod nanozarralarining mavjudligini ko'rsatadi va bu tajribalarda kattaroq samaradorligini oshiruvchi omil hisoblanadi. Plyonkalar tarkibini batafsil o'rganish maqsadida uning elementar analiz natijalari qayd qilindi. Elementar tahlil natijalari ko'rsatdiki, qoplamadagi uglerod tarkibiy qismlarining og'irlik nisbati 46% ni tashkil qilgani va bu uglerod nanozarralariga tegishli ekanligi aniqlandi (3.7b-rasm). Shunday qilib, SEM va EDS natijalari shisha plastinkalar yuzasida yotqizilgan yupqa plyonkalar kichik o'lchamdagi uglerod tarkibli nanozarra tuzilmalaridan iborat

ekanligini ko'rsatdi.

Tagliklar sirtida hosil qilingan yupqa plyonkaning sirt topografiyasi Atom-kuch mikroskopi (AKM) yordamida o'rganildi. Quyidagi 3.8- rasmda yupqa plyonkaning mikroo'lchamdagi qismining sirt topografiyasi keltirilgan.



3.8- rasm. Tagliklar sirtida hosil qilingan yupqa plyonkaning AKM yordamida olingan sirt topografiyasi.

Namunaning AFM tasviridan ko'rish mumkinki, yotqizilgan plyonkaning turli qismlarida nanozarralarning o'lcham taqsimoti sezilarli darajada farq qilishi kuzatildi. Ba'zi qismlarda 100÷200 nm gacha boshqa qismlarda o'lchamlari 5÷70 nm oralig'ida bo'lgan nanoo'lchamli strukturalar shakllangan. Nanostrukturalarning o'rtacha o'lchami ~40 nm atrofida ekanligini ko'rish mumkin. Turli mikroskopik va spektroskopik usullardan foydalangan holda, sham alangasida amalga oshirilgan dastlabki tadqiqotda tagliklar sirtida yotqizilgan qoplamalar tarkibida shunga o'xshash nanozarralar mavjudligi ko'rsatilgan [25, 490-b., 26, 910-b., 27, 063102-b.]. Alangada kuyik nanozarralarning mavjudligi lazer nurlanish ta'sirida hosil bo'ladigan garmonikalar generatsiyasi samaradorligining ortishiga olib keladi. Shisha taglikdagi plyonkalarda uglerod nanozarralarining mavjudligi haqidagi dalillar ularning alangada mavjudligini isbotlaydi. Yana shunga o'xshash tadqiqotlarda nanozarralarni o'z ichiga olgan plazmada uchinchi garmonika nurlanishi samaradorligining oshishi o'lchami kichik uglerod nanozarralarining hissasi ko'rsatilgan [28, 325-b.]. Tadqiqotlarimiz uglerod nanozarralarini o'z ichiga olgan muhitda ortib borayotgan uchinchi garmonika samaradorligi va tagliklardagi qoplamalar

gidrofobik xususiyatlardan supergidrofobiklikgacha keskin o'zgarishini ko'rsatdi. Ushbu tadqiqotlar nanozarralarning optik va kimyoviy xususiyatlarining lazer nurlanishiga ta'sirini chuqurroq tushunishga yordam beradi.

Ushbu noxiziqli optik jarayonning samaradorligini oshirish uchun turli o'lchamlarga ega bo'lgan nanozarralar guruhlarining qaysi biri afzalroq ekanligini aniqlash muhim hisoblanadi. Biroq, hozirgi tadqiqotlar davomida uchinchi garmonika samaradorligini aniq bir guruhlar uchun, masalan, 1 dan 5 nm gacha bo'lgan nanozarralar, 10-30 nm o'lchamdagi yoki 40-80 nm o'lchamdagi nanozarralar guruhlar uchun alohida ajratib ko'rsatish qiyin. Tadqiqotlarimizda nanozarralarning umumiy ta'siri turli o'lchamdagi nanozarralarning garmonika samaradorliklari yig'indisidan iborat deyish mumkin. So'nggi tadqiqotlar yuqori tartibli garmonikalarning o'sishida 1 nm dan yuqori va 5 nm dan past oralqdagi o'lchamlarga ega bo'lgan kvant nuqtalarining rolini ko'rsatadi [29; 114304-1-b.]. Ehtimol, uchinchi garmonika samaradorligining chegaralanish effekti va asosiy lazer nurlanishi kuchayishi tufayli o'sishi ushbu o'lchamdagi zarrachalar guruhi bilan tavsiflash mumkin. Garmonika samaradorligi va zarrachalar o'lchami o'rtasidagi bog'liqlikni 3.3b-rasm tahlili orqali tushuntirish mumkin. Chunki alanganing keyingi qatlamlarida harorat o'zgaradi, bu esa alanga markazida, harorat yuqori nuqtasida uglerod nanozarralar paydo bo'ladi. Keyingi alanga qatlamlarida harorat tushishi bu zarralarning birikib yirik holatdagi nanozarralar yoki agregat holatga o'tadi. [30; 45130-b.]. shu bilan birgalikda, sham alangasida uglerod nanozarralari hosil bo'lganda, harorat va gazlarning oqimi nanozarralarning o'sish tezligini belgilaydi. Agar zarrachalar tezda hosil bo'lib, alanga tepasigacha harakatlanish davomida haroratning pasayishi bilan ular yiriklashib boradi. Agar ularning shakllanishi sekinroq bo'lsa, ular kichikroq bo'ladi. Shunday qilib, nanozarralarning o'lchamlari ularning hosil bo'lish kinetikasi bilan belgilanadi va bu jarayon turli muhitlarda, masalan, sham alangasida, harorat va boshqa omillarga qarab o'zgarishini anglatadi.

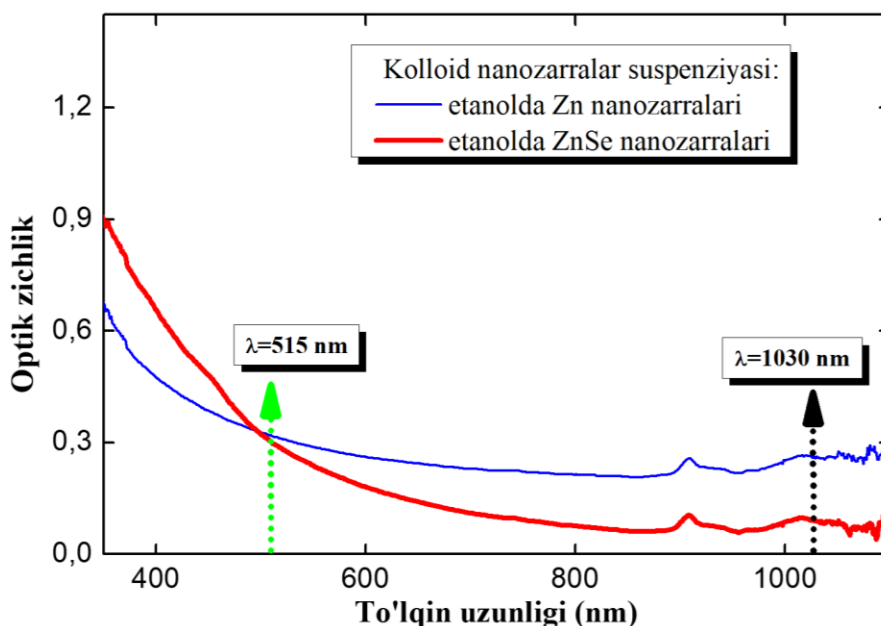
O'rganilgan ikkita jarayon, ya'ni namlanishning o'zgarishi va noxiziqli optik chastota almashtirish samaradorligi sham alangasida kichik o'lchamdagi kuyik nanozarralarning shakllanishi bilan bog'liq.

Nanozarralarning uchinchi tartibli nochiziqli optik javobi sham va etanol alangasida garmonika samaradorligini oshirishga olib keladi. Uglerod asosidagi materiallarning vakili sifatida kuyik tarkibida ko'plab nanomateriallar mavjud bo'lib, ular ilgari garmonikaning samarali nurlanish manbasi sifatida grafit va uglerod nanotrubbkaga nisbatan afzalliklarini namoyish etadi.

Ushbu tadqiqotlar davomida kuyik nanozarralarning kuchli quyi tartibli garmonika hosil qilish va qoplama hosil qilish imkoniyatini aniqlandi, shuningdek, plastinkaga yotqizilgan uglerod tarkibli qoplamaning namlanish burchagini o'zgartirish mumkinligi ko'rsatildi. Ushbu qoplamalarning namlanish xususiyatlari plastinkalarning g'adirbudurligiga va yotqizilgan uglerod tarkibli zarrachalarning nano yoki mikro tuzilmalari mavjudligiga bog'liq.

3.3. § Zn va ZnSe nanozarralarining morfologiyasi va chiziqli optik xossalari

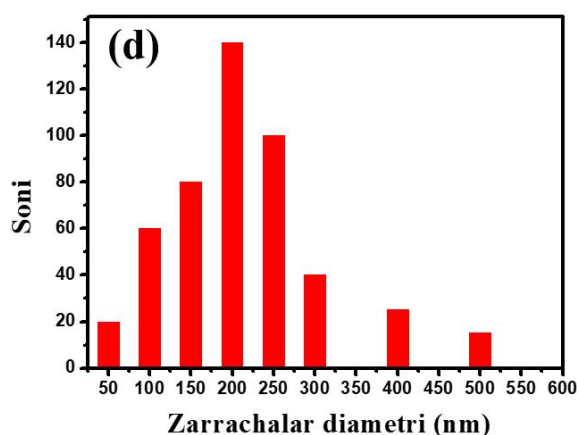
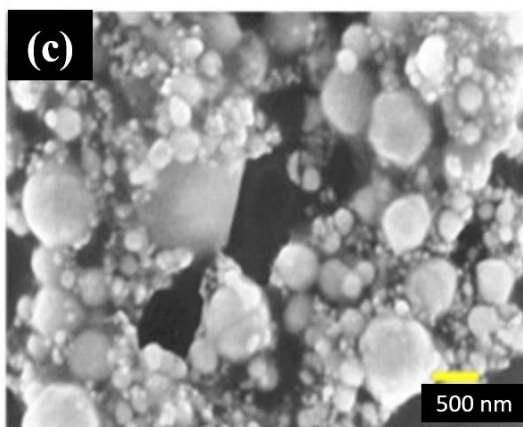
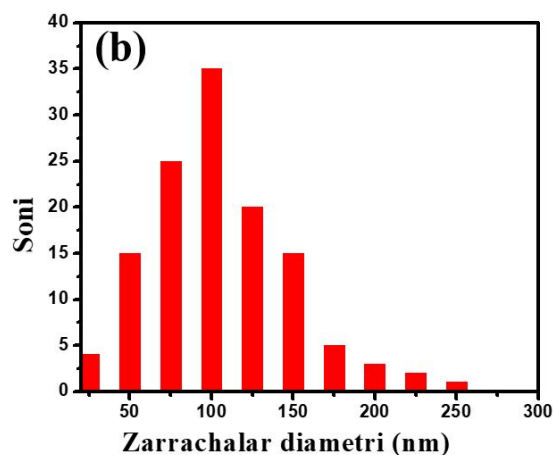
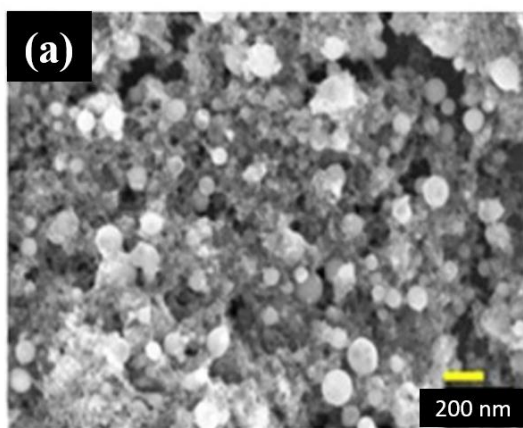
Rux (Zn) va rux selenid (ZnSe) nanozarralari o'zining optik va elektron xususiyatlari bilan ajralib turadi, shuning uchun ular yuqori tartibli garmonika generatsiyasi (YuTGG) kabi nochiziqli optik jarayonlar uchun istiqbolli materiallar sifatida tanlangan. Ayniqsa, lazer ablatsiyasi yordamida hosil qilingan Zn va ZnSe nanozarralari yuqori optik sezgirligi va morfologik barqarorligi bilan ajralib turadi. 3.9-rasmda to'lqin uzunligi 1030 nm, impulsining davomiyligi 40 fs va impulslarining takrorlanish chastotasi 50 kHz bo'lgan lazer nurlanishidan foydalangan holda, etanolda lazer ablatsiyasi orqali olingan Zn va ZnSe nanozarralarining optik zichlik spektrlari ko'rsatilgan. Optik zichlik spektrlarida ikkala holatda ham nanozarralarning katta o'lchamlari tufayli ushbu suspenziyalarda



3.9- rasm. Etanolda lazer ablatsiyasi usulida olingan Zn va ZnSe nanozarralari suspenziyasining optik zichlik spektrlari [2A].

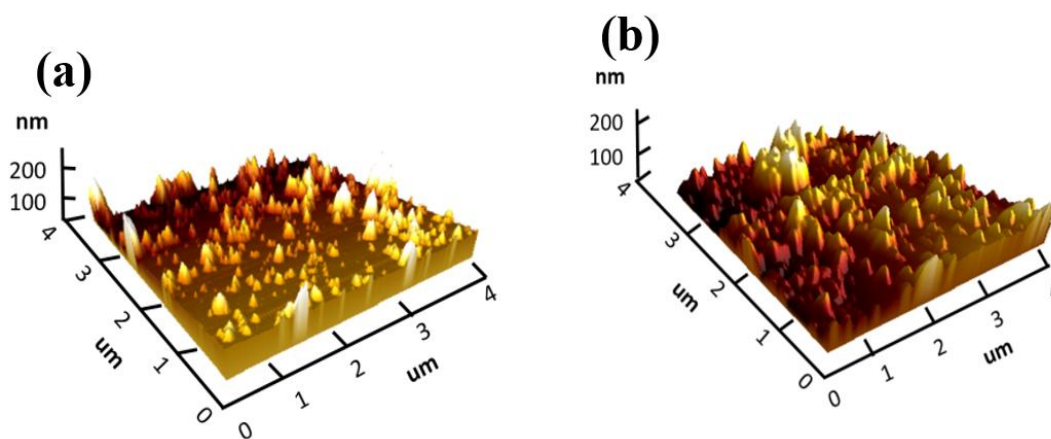
aniq sirt plazmonik rezonans (SPR) maksimumlarini kuzatilmadi. Ikkala suspenziyada ham optik zichlik spektrining $\sim 900\text{ nm}$ to'lqin uzunligida yutilish maksimumi kuzatildi. Bu maksimum ablatsiya jarayonida paydo bo'lgan kirishmalar bilan bog'liq. Suspenziyalar tarkibida kuzatilgan kam miqdordagi kirishma atomlar Z- skanerlash metodida natijalariga ta'sir ko'rsatmadi.

Shu bilan birgalikda, etanol muhitida lazer ablatsiyasi usulida olingan Zn va ZnSe nanozarralarining tagliklarga yotqizilgan qatlam plyonkalarining morfologik xossalari va ularning o'lcham taqsimotlari ham o'rganildi. Quyidagi 3.10- rasmda sintez qilingan nanozarralarning SEM da olingan tasvirlari hamda ularning o'lcham taqsimoti keltirilgan. SEM da olingan tasvir va o'lcham taqsimoti grafiklaridan ko'rinadiki, Zn nanozarralarining o'lchami $\sim 100\text{ nm}$ atrofida bo'lsa, ZnSe nanozarralarining o'lchami esa $\sim 200\text{ nm}$ atrofida bo'lib, ular deyarli sferik shaklda kristallangan. Nanozarralarning shakli va o'lcham taqsimoti juda muhim bo'lib, ular noxizizli optik jarayonlar parametrlarini aniqlashda va YuTGG jarayonida lazer nurlanishi bilan o'zaro ta'sirini kuchaytirishda muhim omillardan hisoblanadi. Sharsimon morfologiyaga ega nanozarralar bir xil disperslanishni va plazmon rezonansini samarali ta'minlab, YuTGG jarayonining yuqori takrorlanuvchanligini kafolatlaydi. Tadqiqotlarda etanolda lazer ablatsiyasi usulida olingan Zn va ZnSe



3.10- rasm: a) Zn nanozarralarning SEM da olingan tasviri va b) ularning o'lcham taqsimoti, c) nanozarralarning SEM da olingan tasviri va d) ularning o'lcham taqsimoti [2A].

nanozarralari kremniy tagliklar yuzasiga yotqizilib, ularda YuTGG ni kuzatish rejalashtirildi. Tagliklar sirtida nanozarralarning taqsimlanganlik darajasi AKM yordamida o'rganildi. Quyidagi 3.11- rasmda tagliklar sirtiga cho'ktirilgan nanozarralardan hosil qilingan strukturaning AKM da olingan sirt topografiyasi tasvirlari keltirilgan. 3.11-rasmdagi (a) va (b) tasvirlar Zn va ZnSe nanozarralarining kremniy taglik yuzasida hosil qilgan bitta qatlam strukturalarini aks ettiradi. (a) tasvirda nanozarralarning balandliklari 200 nm dan oshgani va yuzaning notekisligi yuqori ekanligi kuzatildi. Bu zarrachalarning bir xil bo'lmagan o'lchamlarda va zichlikda taqsimlanganligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, (b) tasvirda nanozarralar yuzaning nisbatan tekisroq va bir xil balandlik darajasida joylashganligini kuzatildi. Ushbu farqlar nanozarralar sintez usulidagi parametrlar va taglikka cho'ktirish jarayonining xususiyatlariga bog'liq deb qaraldi. Tagliklar yuzasida cho'ktirilgan



3.11- rasm. Kremniy tagliklar sirtiga yotqizilgan Zn (a) va ZnSe (b) nanozarralaridan hosil bo‘lgan qatlamning AKM da olingan sirt topografiyasi [2A].

nanozarralar 60°C haroratda pech yonida quritilgan. Ushbu jarayon nanozarralarning kremniy yuzasida taqsimlanishiga va yuzaning morfologik xususiyatlariga ta’sir qilishi mumkin. (a) tasvirda notekisliklar va zarrachalarning taqsimoti, ehtimol, quritish jarayonida yuzaga kelgan termik effektlar bilan bog‘liq. (b) tasvirda nisbatan tekisroq sirt hosil qilingani kuzatildi. AKM yordamida olingan tasvirlar nanozarralarning morfologik va sirtiy xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi. Ushbu ma’lumotlar YuTGG jarayonlarining samaradorligini oshirish uchun muhim jarayon hisoblanadi, chunki nanozarralarning yuzadagi taqsimlanish darajasi va morfologiyasi YuTGG ning fazaviy moslashuv sharoitlariga bevosita ta’sir qiladi. Ayniqsa, sirtning notekisligi va zarrachalarning bir xilda taqsimlanmaganligi YuTGG samaradorligini kamaytirishi mumkin bo‘lsa, zarrachalarning bir xil va tekis joylashuvi bu jarayonning optimal sharoitlarini ta’minlaydi. Shuningdek, (a) va (b) tasvirlar o‘rtasidagi morfologik farqlar YuTGG jarayonlari uchun eksperimental sharoitlarni optimallashtirish zaruratini ta’kidlaydi. (a) tasvirdagi yuqori notekislik nanozarralar o‘rtasidagi fazaviy nomoslashuvga olib kelishi mumkin bo‘lsa, (b) tasvirdagi nisbatan tekislik YuTGG samaradorligini oshirish uchun qulay sharoit yaratadi.

Yuqori chastotali lazerlardan foydalanish nanozarralar kolloid suspenziyalarini tayyorlash vaqtini sezilarli qisqartiradi. Past takrorlash chastotali lazerlar bilan bir xil xususiyatlarga ega suspenziyani olish ko‘proq vaqt talab etadi. Biroq, yuqori takrorlanish tezligi nanozarralar

suspenziyasining to'yinganligiga va natijada nanozarralar o'lchami taqsimotiga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Bu rejimda metallar yuzasida lazer ablatsiyasi jarayonida hosil bo'lgan zarrachalarning shakli va o'lchami suyuqlikning xususiyatlariga va nishon sifatida ishlatilgan metallga bog'liq bo'ladi. Masalan, deionizatsiyalangan suvda Zn nanozarralari ablatsiyasi natijasida eritmada kubik Zn nanostrukturalari hosil bo'lgani kuzatilgan [92; 045027-b.].

Metall nanozarralari shakli va morfologiyasining o'zgarishi SPR maksimumlarining joylashuviga va zarrachalarning nochiziqli optik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. SPR bu metall nanozarralarda elektronlarning kollektiv tebranishi natijasida hosil bo'ladigan rezonans hodisasi hisoblanadi. Nanozarralarning o'lchami, shakli va ular bir-biri bilan qanday joylashgani SPR cho'qqilarining spektrda qayerda paydo bo'lishini va qanday ta'sir ko'rsatishini belgilaydi. Masalan, agar nanozarralar sharsimon shaklda SPR maksimumlari ultrabinafsha sohasiga yaqinroq bo'lsa, nanozarralar cho'zilgan yoki elipsoid shakliga o'tganda, bu elektronlarning harakati o'zgarib, SPR maksimumlari yangi to'lqin uzunliklarida, infraqizil sohalarida paydo bo'lishiga olib kelishi mumkin. Nanozarralarning shakli, tarqalishi va morfologiyasidagi bunday o'zgarishlar optik hodisalarga, ayniqsa nochiziqli optik effektlarga, sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli, nanozarralarning agregatsiyasi (ya'ni, ularning birlashishi) yoki shakli o'zgarganida, ularning optik xatti-harakati ham sezilarli darajada o'zgaradi. Masalan, mis nanozarralari (Cu) va mis oksidi (CuO) nanoelipsoidlarining optik xususiyatlari o'rganilgan va ushbu tadqiqotda quyidagi munosabatni kuzatishgan [93; 11415-b.]: Cu nanozarralari agregatsiyasi natijasida ular oksidlanib, CuO nanoelipsoidlari hosil bo'lgan; nanoelipsoid shaklida hosil bo'lgan CuO zarrachalarining taqiqlangan energiya sohasi kengaygani aniqlangan. Odatda, oksidlanish va shakl o'zgarishi zarrachalarning optik va elektron xususiyatlariga kuchli ta'sir qiladi. Cu zarrachalarining birlashishi va oksidlanishi nafaqat ularning strukturaviy o'zgarishiga, balki optik xususiyatlariga ham sezilarli ta'sir ko'rsatib, ikki fotonli yutilish jarayonini kuchaytirgan. Haqiqatan ham, katta issiqlik bilan qo'zg'atilgan nochiziqli sindirish ko'rsatkichlarining nanozarralar kontsentratsiyasiga bog'liqligi tadqiqotlarda ko'rsatilgan [94;

616-b.]. Bu shuni anglatadiki, zarrachalar kontsentratsiyasining ortishi bilan muhitda hosil bo'ladigan nochiziqli optik parametrlar, masalan, sindirish koeffitsienti sezilarli darajada oshadi. Bizning tadqiqotimizda ham suspenziyadagi Zn va ZnSe nanozarralarning hajm nisbati va kontsentratsiyasi bilan bog'liq shunga o'xshash xulosalar olindi. Natijalarimiz avvalgi tadqiqotlar bilan uyg'unlikda bo'lib, ablatsiya vaqti va nanozarralar kontsentratsiyasining ortishi nochiziqli sindirish koeffitsientining oshishiga olib kelishini tasdiqlaydi. AFM va SEM tasvirlari nanozarralarning aksariyati sharsimon yoki ellipsoid shaklida ekanligini ko'rsatadi (3.9 va 3.10- rasmlarga qarang). Impuls davomiyligi femtosekund bo'lgan lazer impulslari yordamida olingan nanozarralar sferik shakldagi zarrachalarni bir tekis taqsimlash imkonini berib, ushbu tadqiqotda zarracha o'lchamlarini lazer ablatsiyasi impulslarining parametrlarini sozlash orqali boshqarish mumkinligini tasdiqlaydi ([95; 1130-b.] ga qarang). Bundan tashqari, Zn va ZnSe nanozarralarining kontsentratsiyasi ortishi bilan nochiziqli sindirish ko'rsatkichlari sezilarli darajada o'sishi aniqlangan. Bu esa nanozarralarning YuTGG kabi nochiziqli jarayonlar uchun mos ekanligini isbotlaydi.

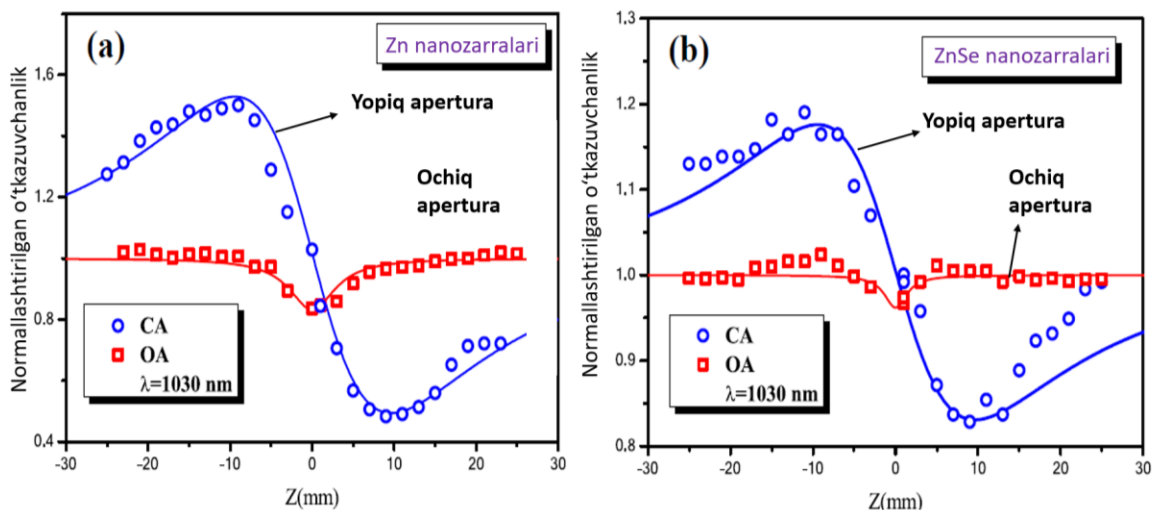
3.4. § Zn va ZnSe nanozarralarining quyi tartibli nochiziqli optik xossalari

Tayyorlangan kolloid Zn va ZnSe nanozarralarning quyi tartibli nochiziqli optik xossalari Z-skanerlash texnikasi yordamida o'rganildi. Bunda to'lqin uzunliklari 1030 nm va 515 nm bo'lgan, hamda 50 kHz takrorlanish chastotasidagi lazer impulslaridan foydalanildi, nanozarralarning ushbu lazer nurlanishi ta'sirida nochiziqli optik parametrlari aniqlandi. Z-skanerlashning ochiq (OA) va yopiq (YA) aperturali rejimlari yordamida nanozarralarning normallashtirilgan uzatish koeffitsientlari tahlil qilindi. OA rejimi asosan nochiziqli yutilish xossalari, YA rejimi esa sindirish ko'rsatkichidagi nochiziqli o'zgarishlarni aniqlashda samarali hisoblanadi. Ushbu usullar orqali Zn va ZnSe nanozarralarning lazer nurlanishiga qanday optik javob ko'rsatishi aniqlandi. 3.12-rasm to'lqin uzunligi 1030 nm bo'lgan lazer nurlanishi yordamida Z- skanerlashning OA va YA o'lchovlari orqali Zn va ZnSe

nanozarralari suspenziyasining normallashtirilgan o'tkazuvchanlik koeffitsientlarini ko'rsatadi. Ushbu egri chiziqlarni tahlil qilishda umume'tirof etilgan usul qo'llanilgan bo'lib, YA Z-skanerlash usulida keltirilgan tenglama yordamida o'lchovlar amalga oshirildi [17; 1225-b., 24; 800-b.]:

$$T(z) = 1 + \frac{2(-\rho x^2 + 2x - 3\rho)}{(x^2 + 9)(x^2 + 1)} \quad (3.2)$$

Bu yerda $\rho = \Delta\psi_0/\Delta\Phi_0$, $\Delta\Phi_0 = k\gamma I_0 L_{eff}$ va $\Delta\psi_0 = \beta I_0 L_{eff}/2$ - mos ravishda normal o'tkazuvchanlik tenglamasidagi nohiziqli sindirish va nohiziqli yutilish tufayli fazalarning o'zgarishi harakterlaydi, $x = z/z_0$, $z_0 = k\omega_0^2/2$ - Rayleigh uzunligi, $k = 2\pi/\lambda$ - to'lqin soni, ω_0 - intensivlik taqsimoti $1/e^2$ qiymatidagi nurning radiusi, I_0 - fokus tekisligidagi intensivlik, bu $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_0 L)]/\alpha_0$ - samarali uzunlik, α_0 - chiziqli yutilishsh koeffitsienti, L - namuna qalinligi, γ va β - mos

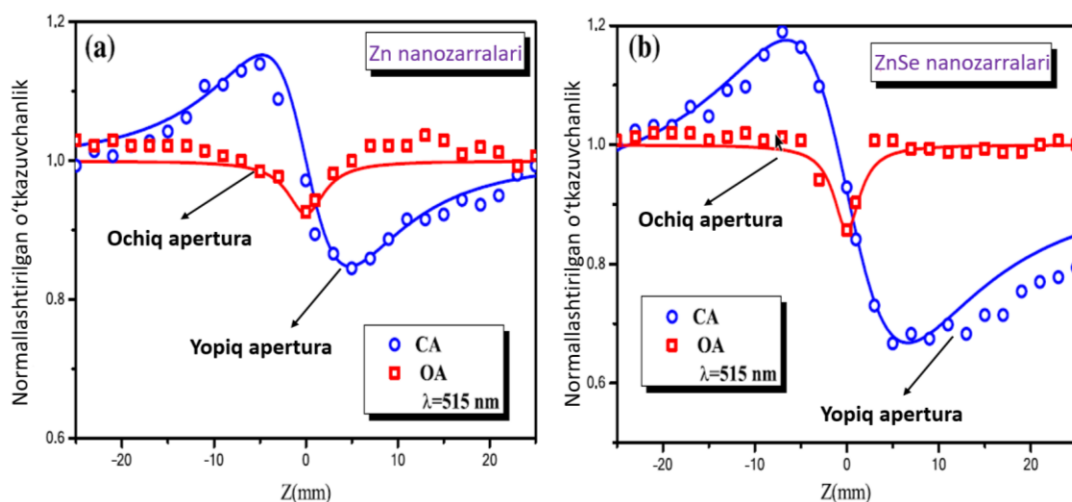


3.12-rasm. To'lqin uzunligi 1030 nm bo'lgan lazer impulslari yordamida olingan (a) Zn va (b) ZnSe nanozarralarining Z-skanerlash egri chiziqlari [2A].

ravishda namunaning nohiziqli sindirish ko'rsatgichi va nohiziqli yutilish koeffitsienti. Tajribalar davomida zondlovchi lazer impulslarining maksimal intensivligi $4.2 \cdot 10^{11} \text{ W} \cdot \text{sm}^{-2}$ ga yetdi. OA ma'lumotlarini tahlil qilish va ikki fotonli yutilish uchun mas'ul bo'lgan nohiziqli yutilish koeffitsientini aniqlash uchun biz quyidagi munosabatdan foydalandik:

$$T(z) \approx \frac{1-q(x)}{2\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

bu yerda $q(x) = \beta I_0 L_{eff} / [1 + x^2]$ ni ifodalaydi. Egri chiziqlar orqali olingan maksimal va minimal qiymatlar, eksperimental sharoitdagi lazer intensivligi va materialning uzunligi yordamida nochiziqli sindirish (γ) va nochiziqli yutilish (β) koeffitsientlari nazariy hisoblash formulalari yordamida aniqlanadi. Bizning tajribalarimizda to‘lqin uzunligi 1030 nm lazer nurlanishida Zn nanozarralarining nochiziqli sindirish koeffitsienti va nochiziqli yutilish koeffitsienti qiymatlari 3.12- rasmda hosil qilingan egri chiziqlar yordamida qiymatlari mos ravishda $\gamma = -1.4 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ va $\beta = 2.7 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$ qiymatlarda hisoblab chiqildi. Xuddi shunday, ZnSe nanozarralarida mos ravishda $\gamma = -4.9 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ va $\beta = 0.5 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$ aniqlandi. To‘lqin uzunligi 515 nm bo‘lgan impulslar bilan tekshirilganda Zn va ZnSe nanozarralari iborat kolloid suspenziyalarining normallashtirilgan o‘tkazuvchanligining Z skanerlash egri chiziqlari ko‘rsatilgan tasvir 3.13-rasmda akslantirilgan. Zn nanozarralaridan tarkib topgan suspenziyaning tegishli nochiziqli optik parametrlari $\gamma = -1.7 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ va $\beta = 1.0 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$, ZnSe nanozarralarida esa $\beta = 2.1 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$ yutilish koeffitsient qiymati hisoblangan. Ushbu suspenziyaning nochiziqli sindirish ko‘rsatkichi $\gamma = -2.4 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ teng. Ushbu tadqiqotda kuzatilgan nochiziqli sindirish zondlash impulslarining yuqori takrorlanish tezligi natijasida hosil bo‘lgan termo-optik ta’sir bilan bog‘liq. Zondlash impulslarining yuqori tezligi materialda harorat oshishiga sabab bo‘ladi, bu esa sindirish ko‘rsatkichining o‘zgarishiga olib keladi. Nochiziqli yutilish ikki fotonli yutilish tufayli sodir bo‘lishi mumkin, bunda ikki fotonning bir vaqtning o‘zida yutilishi elektronlarni yuqori energetik sathga chiqaradi. Nochiziqli yutilish — bu materialning o‘tkazuvchanligi lazer nuri intensivligi yoki oqim zichligiga bog‘liq ravishda o‘zgarishini ifodalaydi. Adabiyotlarda qayd etilganidek, nochiziqli yutilishga olib keluvchi bir qancha



3.13-rasm. To‘lqin uzunligi 515 nm bo‘lgan impulslar yordamida olingan (a) Zn va (b) ZnSe nanozarralarining Z-skanerlash skanerlash egri chizig‘i [2A].

jarayonlar mavjud, jumladan, ikki fotonli yutilish, ko‘p fotonli yutilish, uyg‘otilgan holat yutilishi, erkin tashuvchi yutilishi, teskari to‘yingan yutilish va to‘yingan yutilish kabi jarayonlar bilan harakterlanadi [97;196-b.]. Ushbu mexanizmlar, asosan, uyg‘otilgan elektronlarning valentlik zonadan o‘tkazuvchanlik zonasiga o‘tishi bilan bog‘liq. Yuqori energiyali fotonlar elektronlarni qo‘zg‘atib, kuchli nochiziqli yutilishga sabab bo‘ladi. Bu mexanizm oltin va kumush kabi metallar nanozarralarida kuzatilgan [98; 023105-b.]. Shuningdek, dastlabki tadqiqotlarda 1500 nm to‘lqin uzunligidagi lazer impulslarining intensivligiga qarab Zn nanozarralarda to‘yinuvchi yutilishdan ikki fotonli yutilishga o‘tishi kuzatilgan [99; 18721-b.]. Bu jarayonda, agar impuls davomiyligi atomlarning relaksatsiya vaqti bilan taqqoslanarli bo‘lsa, atomlar yutilgan energiya bilan band bo‘lib, qo‘shimcha fotonlarni yuta olmaydi, natijada to‘yinuvchi yutilish yuzaga keladi. Lekin, intensivlik osha boshlaganida, ushbu to‘yinuvchi yutilish jarayoni ikki fotonli yutilish jarayoni bilan almashadi, zarrachalar yuqori intensivlikdagi nurlanish energiyasini bir vaqtning o‘zida ikki fotonni yutish orqali o‘zlashtiradi va yuqoriroq sathga o‘ta boshlaydi. Femtosekund davomiyligidagi lazer impulslarining qisqa davomiyligi sababli, muhit bilan ta’sirlashganda erkin tashuvchi yutilishi kuzatilmaydi, chunki bu davr ichida elektronlar metastabil holatga o‘tib ulgurmasdan impuls yakunlanadi. Shuning uchun bizning holatimizda ikki fotonli yutilish kuzatildi. Materiallarning nochiziqli sindirish va yutilish xususiyatlari o‘rtasida hech

qanday bog‘liqlik yo‘q, chunki yuqori takrorlanuchi lazer nurlanish ta‘sirida nochiziqli sindirish ko‘rsatgicining qiymati termo optik effekt hisobiga o‘zgaryapti. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, Zn ($T = 0,83$) uchun OA skanerlash chuqurligi ZnSe ($T = 0,97$) uchun OA skanerlash chuqurligidan 2,5 baravar chuqurroq. Shunga mos ravishda, Zn nanozarralari suspenziyasining nochiziqli yutilish koeffitsienti $2.7 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$ aniqlandi. ZnSe nanozarralari holatida esa xuddi shu parametri $0.5 \cdot 10^{-11} \text{ sm} \cdot \text{W}^{-1}$ aniqlandi, bu esa Zn ga nisbatan besh baravar kam. ZnSe nanozarralari suspenziyasi uchun OA skanerlashda $z = 0$ nuqtasining ikki tomonidagi kichik cho‘qqilar YA belgilarining namoyon bo‘lishini ko‘rsatmoqda (3.12b-rasm). Bu holat nochiziqli yutilishni kamaytirishi mumkin. Ushbu turdagi ikkita YA Z-skanerini o‘rnatish tartibi 1030 nm to‘lqin uzunligidagi nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlari $-1.4 \cdot 10^{-13} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ (Zn) va $-4.9 \cdot 10^{-14} \text{ sm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ (ZnSe) ekanligini ko‘rsatdi, ya‘ni ular orasidagi farq ham uch baravar farq qiladi. Nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlari va ikki fotonli yutilish koeffitsientlarining qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

Namuna	$\lambda=1030 \text{ nm}$		$\lambda=515 \text{ nm}$	
	$\gamma (\text{sm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	$\beta (\text{sm} \cdot \text{W}^{-1})$	$\gamma (\text{sm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	$\beta (\text{sm} \cdot \text{W}^{-1})$
Zn NZ	$-1.4 \cdot 10^{-13}$	$2.7 \cdot 10^{-11}$	$-1.7 \cdot 10^{-14}$	$1.0 \cdot 10^{-11}$
ZnSe NZ	$-4.9 \cdot 10^{-14}$	$0.5 \cdot 10^{-11}$	$-2.4 \cdot 10^{-14}$	$2.1 \cdot 10^{-11}$

Zn nanozarralarining ZnSe nanozarralariga nisbatan kattaroq nochiziqli optik reaksiyasining sababi ularning kichikroq o‘lchamlari bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Kichik o‘lchamli zarrachalar bir xil konsentratsiyadagi kattaroq zarrachalarga Zn va ZnSe nanozarralari suspenziyalarida nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlari va ikki fotonli yutilish koeffitsientlarining hisoblangan qiymatlari.

qaraganda kuchliroq nochiziqli optik xususiyatlarga ega bo‘ladi. Bu holatning asosiy sababi mahalliy elektr maydonining kuchli ta‘sirida yotadi. Nanozarralarning o‘lchami Bor radiusi uzunligida bo‘lganda, nanozarralarning hajmi kichikroq bo‘ladi va bu holat zarrachalarning

nochiziqli optik xossalarni yanada kuchaytiradi. Bor radiusidan kichikroq hajmdagi nanozarralar lazer nurlanishining kuchli lokal maydonini hosil qilishi mumkin, bu esa nochiziqli jarayonlarning kuchayishiga olib keladi. Shuning uchun, Zn nanozarralari ZnSe nanozarralariga qaraganda kichikroq o'lchamlarga ega bo'lganligi sababli, ular kuchliroq nochiziqli optik javob beradi. Asosan, nanozarralarning suspenziyalaridagi nochiziqli optik xossalari, ayniqsa, nanozarralarning o'lchamiga aloqador SPR zondlash to'lqin uzunligi bilan mos kelganda, quyi va yuqori tartibli nochiziqlilik mexanizmlarini kuchaytiradi [100; 081110-b.]. Ushbu tadqiqotda spektrning ko'zga ko'rinadigan va o'rta infraqizil diapazonlarida (530, 620, 715, 830 va 1100 nm) SPR maksimumlariga mos keladigan turli to'lqin uzunliklarida uchinchi tartibli nochiziqli optik javoblar kuzatildi. Ammo, bizning tajribamizda Zn va ZnSe nanozarralari uchun ko'zga ko'rinadigan va o'rta infraqizil sohalarida SPR kuzatilmaganligi sababli, zondlash lazer impulslarining to'lqin uzunliklari suspenziyadagi turli o'lchamdagi nanozarralar bilan rezonansli jarayonlarni keltirib chiqara olmaydi deb baholadik. Shu sababli, bu holatda nanozarralarning aniq o'lchamlari suspenziyalarning yuqori yoki quyi tartibli nochiziqli optik javoblariga sezilarli kuchli ta'sir ko'rsatmaydi.

III-bobning muhim xulosalari

Tadqiqot natijasida sham va etanol alangalarida uchinchi garmonika generatsiyasining samaradorligi havodagiga nisbatan sezilarli darajada oshirilgani ko'rsatildi. Sham alangasida uchinchi tartibli garmonika almashtirish samaradorligi 12 marta, etanol alangasida esa 24 marta oshdi. Ushbu kuchayish uglerod nanozarralarining mavjudligi bilan bog'liq bo'lib, ular uchinchi garmonika uchun samarali manbalar sifatida xizmat qiladi.

Sham alangasida uchinchi garmonikani generatsiyasining tahlili davomida shisha tagliklarga yotqizilgan uglerod tarkibli nano- va mikro-tuzilmalar 155° suv tomchisi kontakt burchagi bilan supergidrofobik xususiyatlarni namoyon qildi. Bu natija gidrofobik qoplamalar yaratish va amaliy qo'llash uchun keng imkoniyatlarni ochadi.

Zn va ZnSe nanozarralarining noxiziqli optik xususiyatlarini 1030 nm va 515 nm kabi turli to'lqin uzunliklarida o'lchash orqali, ularning noxiziqlik optik parametrlari ushbu to'lqin uzunliklariga sezgirligi aniqlangan. Ushbu sezgirlik, mazkur nanozarralarning optik tizimlarida nurlanish quvvatini cheklash va boshqarish uchun qo'llanish imkoniyatini beradi.

IV-BOB. NANOZARRALAR VA MODULYATSIYALANGAN PLAZMADA YUQORI TARTIBLI GARMONIKALARNI HOSIL QILISH VA OPTIMALLASHTIRISH

Ushbu bobda asosiy lazer nurlanishi (1030 nm) va uning ikkinchi garmonikasidan (515 nm) foydalangan holda, Zn va ZnSe nanozarralari mavjud bo'lgan plazmalarda YuTGG jarayonlari bo'yicha olingan natijalar yoritilgan. Tadqiqotda nishon sirtiga tushirilayotgan qizdiruvchi lazer nurlanishini ko'p tirqishli niqoblar yordamida modulyatsiya qilish orqali plazma o'lchamlari va ular orasidagi masofalarni boshqarish usullari ishlab chiqilgan va bu usullarning garmonika generatsiyalarining samaradorligiga ta'siri o'rganilgan.

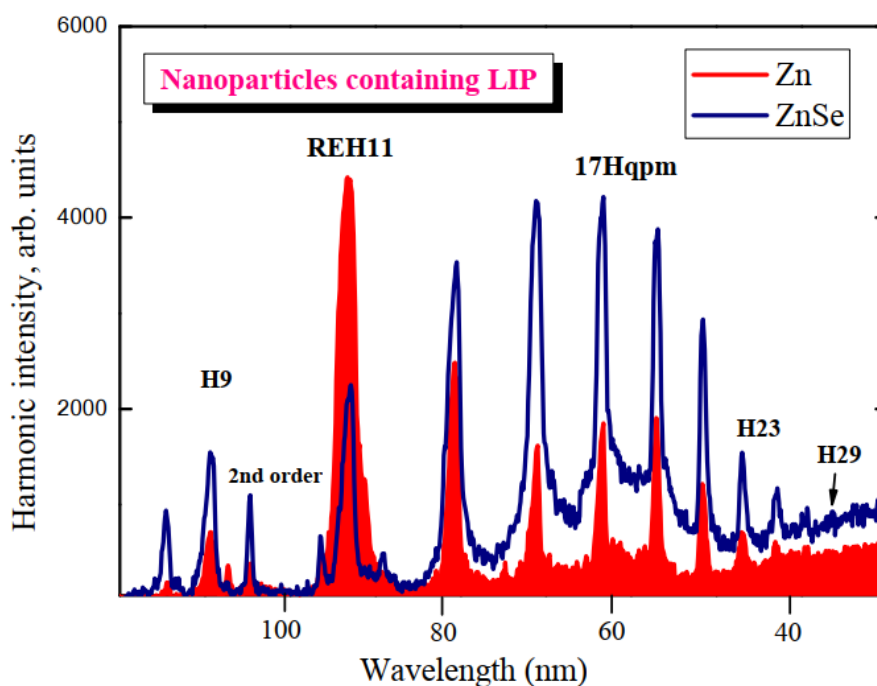
4.1. § Zn va ZnSe nanozarralari plazmasida yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi

Nanozarralar plazmasining yuqori quvvatli lazer nurlanishi bilan o'zaro ta'sirida YuTGG singari bir qator noyob fizik jarayonlar yuzaga keladi. Ushbu jarayon natijasida dastlabki lazer to'lqin uzunligidan bir necha barobar qisqa bo'lgan yuqori chastotali garmonikalar hosil bo'ladi, bu esa kogerent nurlanish spektrini sezilarli darajada kengaytirish imkoniyatini yaratadi [101; 063104-b.]. Yuqori nochiziqli optik xususiyatlarga ega bo'lgan Zn va ZnSe kabi metal va yarimo'tkazgich nanozarralaridan tashkil topgan lazer plazmasida YuTGG jarayoni kuzatildi. Nanozarralarning kichik o'lchamlari va ularning shakli nochiziqli optik jarayonlarda o'ziga xos yutilish va sindirish xususiyatlariga ega bo'lishiga olib keladi, bu esa lazer plazmasida kuchli elektromagnit nurlanish bilan o'zaro ta'sirida garmonikalarni samarali generatsiya qilish imkonini yaratadi.

Ushbu jarayonni yanada samarali qilish maqsadida Zn va ZnSe nanozarralaridan iborat kolloid suspenziya tayyorlandi. Suspenziya tayyorlash jarayonida nanozarralar yuqori tozalikdagi etanol erituvchisi bilan aralashtirilib, intensiv mexanik va ultratovushli aralashtirish orqali barqaror dispersiya hosil qilindi. Bu texnologiya nanozarralarning aglomeratsiyasini oldini olib, ularni bir xil taqsimlanishiga imkon beradi va yakunda bir tekis dispersiyaga ega suspenziya olinadi. Bu suspenziya

keyingi bosqichdagi lazer plazma jarayonlari uchun muhim ahamiyatga ega. Hosil bo'lgan suspenziya tomchi shaklida yuqori tozalikdagi taglikka joylashtirilib, nanozarralarning sirt ustida bir tekisda taqsimlanishini ta'minladi. Keyingi bosqichda shisha kvars taglik 60°C haroratda quritildi, natijada ortiqcha erituvchi bug'lanib chiqib, nanozarralar taglik yuzasida teng taqsimlangan, strukturali qatlam shaklini oldi. Ushbu qatlamlar qaraladigan lazer ablatsiyasi jarayonida plazma hosil qilishda samarali manba sifatida xizmat qiladi.

Plazma hosil qilish uchun 1030 nm to'lqin uzunlikdagi 235 femtosekund davomiylikdagi siqilmagan lazer impulslari qo'llanildi. Lazer nurlanishi 200 mm fokusga ega linzalar yordamida aniq bir nuqtaga fokuslandi va nanozarralar qatlamining markaziga yo'naltirildi. Fokuslanish jarayoni lazer nurlanishining energiyasini kichik hajmga to'plab, nanozarralar taglik yuzasida yuqori intensivlikdagi lazer impulslarini shakllantirishga imkon beradi. Lazer impulslarining intensivligi $10^{11} \div 10^{12} \text{ W} \cdot \text{sm}^{-2}$ diapazonida bo'lib, bu femtosekund impulslar yordamida nishon sirtida plazma hosil bo'lish jarayonini boshlaydi. Intensivlikning bu diapazoni plazmada kuchli ionlanishni yuzaga keltirmaydi, natijada plazmadagi erkin elektronlar soni juda ko'p bo'lmaydi, bu esa zondlovchi lazer nurlanishining bunday plazma bilan samarali o'zaro ta'siriga imkon beradi, hamda YuTGG samaradorligi uchun optimal tanlov bo'la oladi. Bu plazmada YuTGG hosil qilish uchun qizdiruvchi lazer nurlanishi tushish yo'nalishiga ortogonal yo'nalishda zondlovchi lazer intensivligi plazma markaziga fokuslanadi. 4.1-rasmda lazer intensivligi $1,5 \cdot 10^{14} \text{ W} \cdot \text{sm}^{-2}$ ga teng bo'lgan asosiy lazer nurlanishi ($\lambda = 1030 \text{ nm}$) holatida Zn va ZnSe nanozarralarini o'z ichiga olgan lazer plazmalarida hosil bo'lgan garmonikalar spektrlarini ko'rsatilgan. ZnSe nanozarralarini o'z ichiga olgan plazmada kuchliroq garmonikalar chiqishi kuzatildi. Asosiy lazer nurlanishida ZnSe nanozarralarining plazmasida hosil bo'lgan YuTGG guruhining kuchayishini avvalgi bo'limda aytilganidek, 50 kHz takrorlanish tezligi bilan zondlovchi impulslarining fokuslanishi natijasida ZnSe nanozarralarida yuzaga kelgan termo-optik nochiziqli sindirish tufayli sodir bo'lgan. Zn va ZnSe

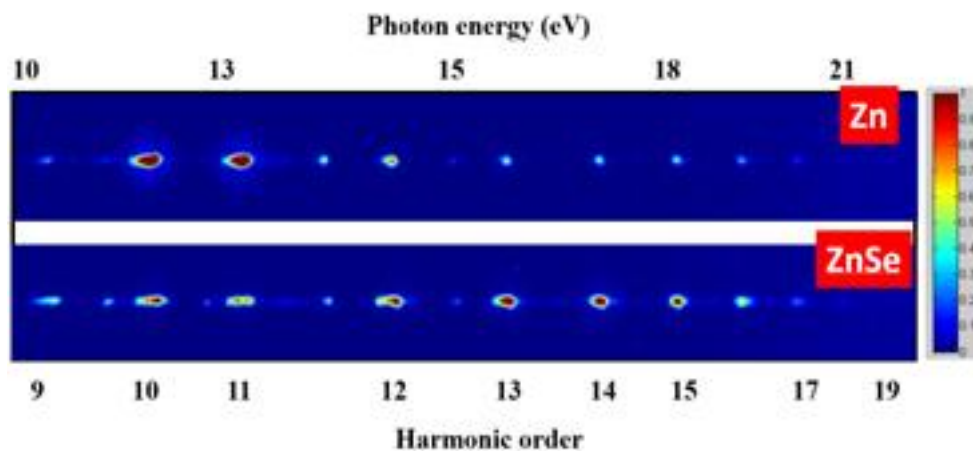


4.1-rasm. Asosiy lazer nurlanishida ($\lambda = 1030$ nm) Zn (qizil to‘la egri chiziqlar) va ZnSe nanozarralari (to‘q ko‘k egri chiziqlar) o‘z ichiga olgan lazer plazmalarida hosil bo‘lgan YuTGG spektrlari [2A].

nanozarralarini o‘z ichiga olgan suspenziyadagi defokuslanish koeffitsientlarini (1-jadvalga qarang) 1030 nm to‘lqin uzunligidagi lazer impulslar yordamida aniqlangan edi. Ushbu manfiy nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlari yuqori darajali garmonikalarning hosil bo‘lishida muhim ahamiyatga ega bo‘lib, fazani moslashtirish shartlarini sezilarli darajada yaxshilaydi. Lazer impulslarining defokuslanishi natijasida ularning yo‘nalishi o‘zgaradi va bu KFM optimal darajada ta‘minlaydi. Shu sababli, ayniqsa, 17-tartibdagi garmonikaning ancha kuchaygani kuzatildi. 4.1-rasmda ZnSe nanozarralari o‘z ichiga olgan plazmada KFM sharoitida hosil bo‘lgan 17-tartibdagi garmonikaning kuchayishi Zn plazmasidagiga qaraganda 2,2 baravar ko‘p bo‘ldi. Bu nisbat, Z-skanerlash o‘lchovlarida Zn va ZnSe nanozarralari uchun aniqlangan manfiy nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlari bilan mos keladi, o‘sha o‘lchovlarda nisbat taxminan 2,5 qiymatni tashkil qilgan edi (1-jadvalga qarang). Ushbu ko‘rsatkichlar nochiziqli sindirish ko‘rsatkichlarining o‘zgarishi va defokuslanish orqali KFM shartlarining o‘zaro bog‘liqligini tasdiqlaydi. Bu natijalar lazer impulslarining defokuslanishi orqali yuqori darajali garmonikalar hosil bo‘lish jarayonidagi samaradorlikni oshirishda muhim omil ekanligini ko‘rsatadi. [103; 17987-b.]. Lazer plazmalarida shunga o‘xshash

defokuslash effekti Ganeev va boshqalar tomonidan ko'rsatilgan bo'lib, ushbu tadqiqotda indiy nishoni yuzasida lazer plazmasining noxiziqi sindirish ko'rsatgichi ham Z-skanerlash orqali aniqlangan [104; 1335-b.]. Bundan tashqari, 800 nm to'liq uzunligi bilan lazer impulslarini qo'zg'atishda Ar gazidan YuTGGda defokuslanuvchi KFM ham o'rganilgan [33; 789-b.,34; 75-b.].

Shuningdek, ushbu tadqiqotda 1030 nm va 515 nm to'liq uzunligidagi zondlovchi lazer impulslarining aralashmasi yordamida garmonikalarning almashtirish samaradorligiga qanday ta'siri o'rganildi. Ya'ni, ikkita turli to'liq uzunligidagi lazer impulslarini bir vaqtning o'zida qo'llab, ularning fazalari bir- biriga mos kelgan holda hosil bo'lgan garmonikalar generatsiyasi o'rganildi. Qalinligi 0,1 mm bo'lgan BBO kristalida guruh tezligi dispersiyasi tufayli ikkita lazer impulsi - asosiy lazer nuri ($\lambda=1030$ nm) va uning ikkinchi garmonikasi ($\lambda=515$ nm) orasidagi vaqt almashinuvi 12 femtosekundni tashkil etadi [102; 054108-b.]. 4.2- rasm 1030+515 nm holatida ikkala o'rganilgan lazer plazmasida hosil bo'lgan



4.2-rasm. 1030 nm + 515 nm holatida Zn va ZnSe nanozarralarini o'z ichiga olgan lazer plazmalarida hosil qilingan garmonikalarning ishlov berilmagan tasviri [2A].

garmonika spektrlarning CCD kamerasida fosforli ekranda qayd etilgan, ishlov berilmagan tasvirlari ko'rsatilgan, bu yerda garmonikalarning juft va toq tartiblari hosil bo'ladi. Bunday hollarda, 515 nm to'liq uzunligidagi Zn va ZnSe nanozarralarining manfiy noxiziqi sindirish ko'rsatkichlarining femtosekundli lazer impulslari bilan boshqariladigan past qiymatlari tufayli fokuslashdan foydalangan holda KFM kuzatilmadi. Garmonikaning yuqoridagi tartiblarining yo'qolishi izotrop muhitda asosiy nurlanish va

uning ikkinchi garmonikasi bilan zondlash YuTGG sxemasi uchun kesish qonuni ($E_{\text{cutoff}} \propto \lambda^2$) bilan izohlanadi [105; 9067–9083-b.]. $(2n+1)$ tartiblarni yaratish faqat asosiy lazer nurlanishi (1030 nm) yordamida izotrop muhitda hosil bo‘lgan garmonikalarning toq klassik spektrini ko‘rsatadi. Asosiy nurlanish va uning ikkinchi garmonikasi bilan zondlash holatida, nohiziqli muhitda ikkita lazer impulslarining turli vaqt oralig‘i tufayli garmonika hosil qilish shartlari o‘zgaradi. Asosiy nurlanish va uning ikkinchi garmonikasi bilan zondlash holatida 515 nm to‘lqin uzunlikka ega lazer nurlanish ta’siri natijasida gazlar va plazmalarda faqat $2(2n+1)$ tartibni olish mumkin, bu impulslarning vaqtinchalik bir-biriga mos kelishi yetarli bo‘lmaganda, bu holda garmonik spektrlarda 2ω - qo‘zg‘atuvchi toq tartiblari ustunlik qiladi. Xususan, ikkinchi garmonika hosil qilish uchun 0,4 mm qalinlikdagi BBO kristalidan foydalanilganda, taxminan $4(n+1)$ kattalikdagi (H16, H20) va $2(2n+1)$ darajali ikkinchi garmonika qo‘zg‘atuvchi quyi intensivligini kuzatdik [H14, H18, H22;]. Shunday qilib, nohiziqli muhitda ikkita zondlovchining mukammal bo‘lmagan fazaviy bir-biriga mos kelishi ikki to‘lqinning izotrop muhit bilan ta’sirlashishi natijasida $2(2n+1)$ tartib bilan solishtirganda $4(n+1)$ tartibli garmonikaning zaiflashishiga olib keladi.

Ushbu tadqiqotlar, Zn va ZnSe nanozarralari plazmasida YuTGG jarayonida defokuslanish, fazani moslashtirish, va ikki turli to‘lqin uzunligidagi lazer nurlanishi kombinatsiyasining ta’sirini hisobga olgan holda, YuTGG ning samaradorligini oshirish imkoniyatlarini taqdim etadi. Bu plazma fizikasi va nohiziqli optikada yangi kogerent manbalarini yaratish imkoniyatini ochishga xizmat qiladi va turli texnologiyalarga, masalan, optik kommunikatsiya va lazer texnologiyalariga qo‘llanilishi mumkin.

4.2. § Zn atomlari uchun uch qadam hisoblash modeli

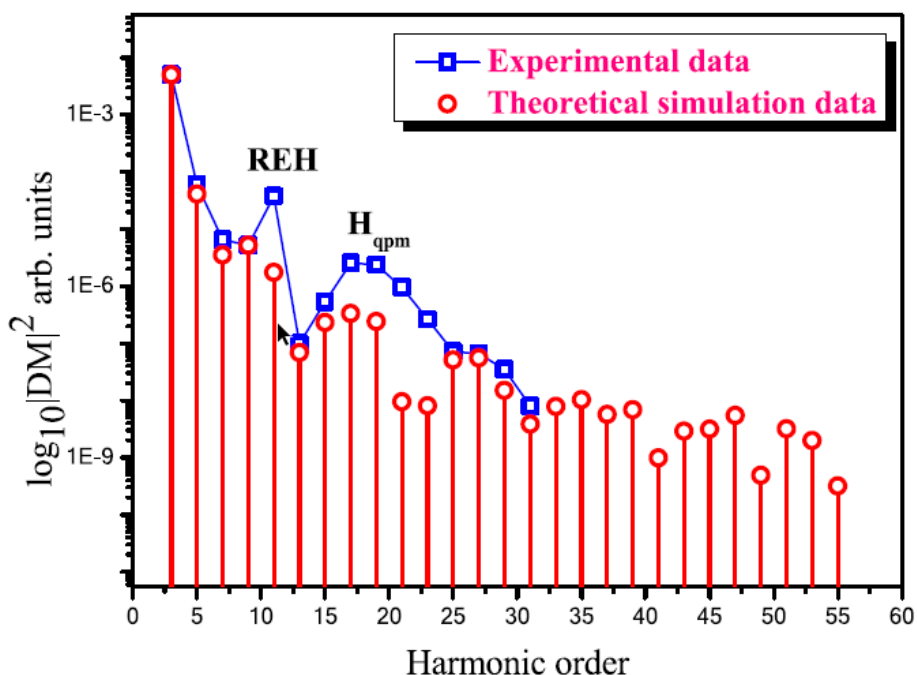
YuTGG jarayonini tushuntirishda uch qadam modeli samarali nazariy yondashuv sifatida qo‘llaniladi. Bu model Zn atomlarida YuTGG jarayonini uch asosiy bosqichda tavsiflaydi: ionlanish, maydon ta’sirida tezlashish va rekominatsiya orqali garmonikani generatsiyalash. Har bir bosqich elektronning lazer maydonidagi dinamikasiga ta’sir ko‘rsatib, YuTGG

spektrining shakllanishiga xizmat qiladi. Ushbu jarayon davomida hosil boʻladigan vaqtga bogʻliq dipol momenti YuTGG spektrining intensivligi va fazasini belgilashda muhim rol oʻynaydi [11; 1191-1197-b.].

Ionlanish bosqichida lazer maydonining kuchli elektr maydoni Zn atomining valent elektronini ionlaydi. Lazer nurlanishining intensivligi yuqori boʻlganda, elektron lazer maydoni taʼsirida atomdan ajralib chiqadi. Bu bosqichda tunnel ionlanish jarayoni yuz beradi, bu jarayonda elektron atom yadrosidan ajralib chiqib lazer maydoni taʼsirida harakatlana boshlaydi. Zn atomining ionlanish potentsiali va lazer nurlanishining intensivligi elektronni ajratib olish jarayonida muhim rol oʻynaydi.

Ionlanishdan soʻng elektron lazer maydonida. Bu bosqichda elektronning kinetik energiyasi lazer maydonining intensivligiga va fazasiga bogʻliq ravishda ortib boradi. YuTGG jarayonidagi elektronning harakati vaqtga bogʻliq dipol momenti $d(t) = \langle \phi(t) | \hat{d} | \phi(t) \rangle$ orqali ifodalanadi, bunda $\phi(t)$ – elektronning lazer maydonidagi vaqtga bogʻliq toʻlqin funksiyasi va \hat{d} – dipol operatori. Dipol momentining oʻzgarishi elektronning lazer maydonidagi kinetik energiyasiga bogʻliq ravishda YuTGG spektrini shakllantiradi.

Rekombinatsiya bosqichida elektron qaytib ona ion bilan birlashadi va orttirilgan kinetik energiyasini YuTGG spektrida yuqori energiyali foton sifatida nurlantiradi. Elektronning qayta atomga birikishi jarayonida YuTGG spektrining maksimal tartibini aniqlash mumkin. Bu tartib lazer maydonining toʻlqin uzunligi va intensivligi bilan bogʻliq, va maksimal YuTGG energiyasi 1.6-ifoda bilan aniqlanadi. 4.3-rasmdagi grafik YuTGG jarayonida Zn atomlari uchun hosil boʻlgan yuqori tartibli garmonikalar spektrini tasvirlaydi. Bu spektr dipol momentining kvadrat qiymatining YuTGG tartibiga logarifmik bogʻliqligini aks ettiradi, yaʼni garmonikalar tartibi oshgan sari dipol momentining qiymati qanday oʻzgarishini kuzatish mumkin. Grafikda koʻk chiziq eksperimental natijalarni, qizil chiziq esa nazariy simulyatsiya natijalarini ifodalaydi. Hisob-kitoblar davomida Zn atomlari



4.3-rasm. Zn atomi uchun uch qadam modeli asosida dipol momentining garmonika tartibiga bog‘liqligi.

bilan o‘zaro ta’sir qiluvchi lazer nurlanishining to‘lqin uzunligi 1030 nm bo‘lib, intensivligi esa taxminan $2 \cdot 10^{14} \text{ Wt} \cdot \text{sm}^{-2}$ ga teng deb olindi. Grafik YuTGG jarayonidagi har bir bosqichning dipol momentiga ta’sirini va YuTGG spektrining o‘sishi yoki pasayishini ko‘rsatib, lazer parametrlari va atomlarning ionlanish potentsiali bilan bog‘liqligini yanada ochib beradi.

Rasmda ko‘rsatilgan ko‘k belgilar, Zn nanozarralarining plazmasida rezonans kuchaytirilgan 11-tartibli garmonikasi va KFM shartlari asosida kuchaytirilgan 17- garmonikani aks ettiradi. Bundan tashqari, kuchli ionli o‘tishga ega bo‘lgan Zn^+ ionlarini o‘z ichiga olgan plazmada 11-garmonikaning rezonans kuchaytirish tabiati, adabiyotlarda ko‘rsatilgandek, bu garmonikani kuchaytirishi mumkin [49; 1853–1858-b.]. Rezonans kuchaytirilgan garmonika hosil bo‘lishida lazer nurlanishining to‘lqin uzunligi atom yoki ionning o‘ziga xos energiya darajalari bilan rezonansga kirishadi, ya’ni ular orasida kuchli uyg‘unlik hosil bo‘ladi. Bunday rezonans natijasida hosil bo‘layotgan garmonikaning intensivligi ortadi. Ushbu tadqiqotda 11-garmonika Zn atomlarining rezonans orqali kuchaytirilishi kuzatilgan. Rezonans natijasida 11-garmonika kuchayadi. Ya’ni, lazer plazmasidagi Zn atomlari yoki ionlari lazer nurlanishi bilan uyg‘un tarzda rezonansga kirishib, energiyani kuchliroq yutadi va natijada bu energiya 11-garmonika sifatida qayta nurlanadi. Rezonans

kuchaytirilgan 11-garmonikaning hosil bo‘lishi bir yoki ikki karra zaryadlangan Zn ionlari (Zn^+ yoki Zn^{2+}) uchun xosdir. Biroq, Zn molekulalari yoki birikmalari bunday rezonans kuchaytirilgan garmonikani hosil qilmaydi, chunki molekulyar Zn rezonans kuchaytirishga olib keladigan zarur energiya darajalariga ega emas. Molekulalarda energetik darajalar boshqa atomlar bilan bog‘langan holda taqsimlanadi va rezonansga kirish qobiliyati kamayadi. Shu sababli, rezonans kuchaytirish mexanizmlari odatda atom yoki ionlar uchun xos bo‘lib, molekulyar holatlarda bunday effekt kuzatilmaydi. ZnSe nanozarralar plazmasida esa Zn^+ ionlarining rezonans kuchaytirish xususiyatlari 1030 nm zondlash impulslarining 11-garmonikasining kuchayishiga olib kelmadi.

Shu bilan birgalikda, KFM usulida nochiziqli muhitda lazer nurlanishining intensivligiga bog‘liq ravishda dinamik faza siljishi yuz beradi va bu YuTGG samaradorligini oshirishda muhim rol o‘ynaydi. YuTGG intensivligini hisoblashda dipol momenti spektrining kvadrat modulini faza moslashuv sharti bilan bog‘lagan holda ifodalash mumkin:

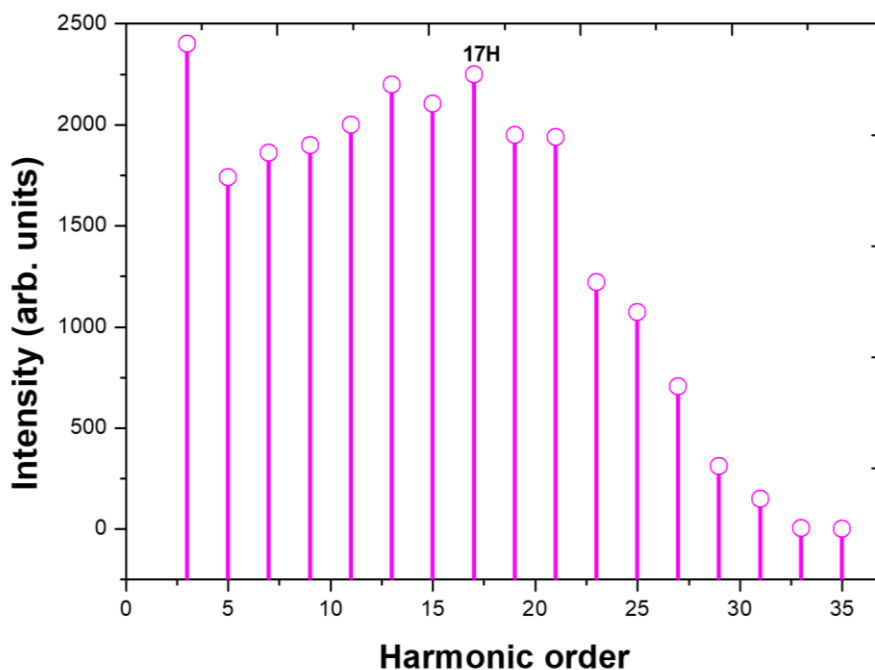
$$I_{Garmonika} \propto \left| \int_0^L d(t) e^{i\Delta k z} dz \right|^2 \quad (4.1)$$

L – plazmaning uzunligi va $\Delta k(z)$ – faza farqi bo‘lib, plazma muhiti orqali lazer nurlanishining garmonika komponentlari bilan bir xil fazada saqlanishi uchun javobgar, hamda uni 2.1-formulada izohlangan quyidagi asosiy komponentlar orqali ifodalanadi:[90; 978-b.]:

$$\Delta k(z) = \Delta k_{atom} + \Delta k_{geom} + \Delta k_{pl} + \theta^G_q \cdot \frac{\Delta I}{\Delta z} \quad (4.2)$$

bu yerda $\frac{\Delta I}{\Delta z}$ – z o‘qi bo‘yicha intensivlikni o‘zgarishini harakterlaydi, θ^G_q – ichki faza koeffitsienti, G – maxsus traektoriya koeffitsienti bo‘lib, uni uch qadam modeliga asosan tavsiflanadi. Manfiy nochiziqli sindirish koeffitsienti (γ) fazaning o‘zgarishi va plazma dispersiyasini boshqarishga imkon beradi. Bu sindirish koeffitsienti lazer intensivligi oshganda kamayadi va natijada faza o‘zgarishlari kompensatsiya qilinadi. Fazaning manfiy yo‘nalishda o‘zgarishi orqali plazma dispersiyasi va intensivlikning tarqalishini boshqarish mumkin, bu esa yuqori tartibli garmonikalarni samarali generatsiya qilishga yordam beradi. ZnSe nanozarralari o‘z ichiga olgan plazmada YuTGG samaradorligi Zn nanozarralariga nisbatan yuqori

bo‘lishi, ushbu materialarning noxiziqli xususiyatlari va fazaviy moslashuv sharoitlariga bog‘liq. ZnSe ning yuqori samaradorligi uning ionlanish potentsiali va plazmada oson fazaviy moslashuv sharti ta‘minlanishi bilan izohlanadi. KFM orqali plazmada yuzaga keladigan fazaviy buzilishlar kompensatsiya qilinib, yuqori tartibli garmonikalar (13, 15, 17 va 19) generatsiyasi intensivligi sezilarli darajada oshiriladi. 4.4-rasmda KFM sharoitlari Zn nanozarralari uchun hisoblangan.



4.4-rasm. Kvazi fazaviy moslashish sharti asosida hisoblangan garmonikalar intensivligi

YuTGG intensivligi tasvirlangan. Hisoblashlar natijasida experimental natijalarga yaqin natijalar olingan. Bu hisoblashlar yordamida ablatsiya sharoitida va asosiy to‘lqin uzunlikdagi (1030 nm) lazer nurlanishidan foydalangan holda, YuTGG ning maksimal tartibi Zn nanozarralaridan tarkib topgan lazer plazmalarida 27-tartibda va ZnSe nanozarralaridan iborat plazmada esa 29-tartibda ekanligi aniqlandi. Zn ($I_p = 9.35$ eV) va ZnSe ($I_p = 6.67$ eV) ning ionlanish potentsiallari farqiga qaramay, maksimal garmonika tartibi – keskin kesish (cutoff) garmonikalari bir-biriga o‘xshashligi kuzatildi. Bundan tashqari, mazkur tajribada kuzatilgan kuchli yuqori tartibli garmonika nurlanishning spektral diapazoni 35–115 nm oralig‘ida bo‘lib, u yuqori zaryadlangan zarrachalar hosil qiladigan tipik spektral diapazonga mos kelmagan. Bunday tafovut shuni anglatadiki,

garmonika nurlanishi yuqori zaryadlangan zarrachalardan emas, aksincha ionlanish darajasi nisbatan past bo'lgan zarrachalardan hosil bo'lgan.

Qizdirish va zondlash impulslari orasidagi optimal kechikish vaqti 70 ns bo'lib, bunda garmonikalar intensivligi oshishi bilan aniqlandi. Kechikish vaqti zondlash va qizdirish femtosekund lazer impulslari orasidagi optik yo'llar farqidan hisoblash orqali o'rnatildi, ya'ni experiment vaqtida zondlash impulslari qizdirish lazer impulslari bilan ablatsiyalangan plazma bilan o'zaro ta'sir zonasida kechikish uchun qo'shimcha optik yo'llar bo'ylab tarqalishi ta'minlandi. Plazma zarralarining ionlashish darajasi va uni tashkil qiluvchi zarralar zichligi femtosekund lazer impulslari yordamida yuzaga keladigan ablatsiya jarayoni natijasida hosil bo'ladi. Ushbu jarayon ilgari ablatsiya uchun ishlatilgan nanosekund, pikosekund, va femtosekund impulslar asosida plazma zichligining qiyosiy baholari yordamida o'rganilgan [109; 615-b.].

Lazer ablatsiya paytida nanozarralarning bevosita sintezi va plazmaning nishon sirtida kengayishi garmonika generatsiyasi uchun noxiziqli optik muhitni shakllantirishning istiqbolli usullaridan biri hisoblanadi. Ushbu tajribada ko'rsatilgandek, lazer ablatsiya jarayonida hosil qilingan nanozarralar YuTGG ning samaradorligini oshirish jarayonida ishtirok etadi. Shunga o'xshash ilmiy tadqiqotlar tahlilida, an'anaviy kimyoviy usulda sintez qilingan nanozarralar, ablatsiya jarayonida buzilib ketishi mumkin bo'lsa-da, ushbu tadqiqotda bunday nanozarralardan tarkib topgan plazmada YuTGG jarayonining samaradorligini oshirish mumkinligi ko'rsatilgan [110; 043823-b.]. Nanozarralarning o'lchami 10–100 nm bo'lgan, bir necha yuz ming atomdan iborat nanozarralar kuchli lazer maydoni bilan o'zaro ta'sir qilganda, yuqori samarali garmonikalarni hosil qilishga yordam beradi. Bugungi kunga qadar gaz klasterlari [111; 2472-2475-b., 112; L709-714-b., 113; 2605-b., 114; 041803-b.], shuningdek ablatsiyalangan nanozarralari [115; 033803-b., 116; 17-24-b., 117; 512-b.] yordamida ko'plab tajribalar o'tkazildi. Aniq hisob-kitoblarga ko'ra, yuqori energiyali lazer maydoni bilan nanozarralarning o'zaro ta'sir qilishida, bir necha yuzdan bir necha minggacha atomlarni o'z ichiga olgan nanozarralar garmonikaning maksimal o'sishiga olib kelishi aniqlangan. Shu sababli, ushbu

nanozarralarning quyi tartibli nochiziqli parametrlari (nochiziqli yutilish va nochiziqli sindirish xususiyatlari) haqidagi ma'lumotlar ushbu tadqiqotda ko'rsatilganidek, garmonika generatsiyasi uchun plazma alangasini hosil qilishda ushbu metall nanozarralarini qo'zg'atish uchun optimal sharoitlarni aniqlash imkonini bergan. Bunday tadqiqotlar nanozarralarda garmonikalarni hosil qilish jarayonida sodir bo'ladigan jarayonlarni chuqurroq tushunishga imkoniyatini taqdim etadi. Shu munosabat bilan, ushbu tadqiqot yuqori tartibli nochiziqli optik jarayonlarni oshirishda quyi tartibli nochiziqlilik bilan bog'liq bo'lgan aralashish effektlarini aniqlash imkonini berdi.

Zondlovchi impulslarni garmonikaga aylantirish samaradorligini aniqlash gaz holatida hosil qilingan YuTGG va plazma holatida olingan YuTGG uchun ham juda qiyin vazifa. Aniqlash uchun kalibrlash ko'plab omillarni o'z ichiga oladi, masalan, difraksion panjarali plastinkasi, mikrokanal plitasi, qo'lda yig'ilgan extremal ultrabinafsha spektrometrining qurilma funksiyasi, shuningdek, CCD kamerasi tomonidan aniqlangan signalni har bir garmonika uchun impulsdagi extremal ultrabinafsha fotonlari soniga aylantirish va boshqalar hisobga olinadi. Har bir alohida tajriba uchun bunday murakkab kalibrlashni amalga oshirish oson emas. Bu kabi tajribalarda eng keng qo'llaniladigan usul ilgari o'tkazilgan o'xshash tajribalarda YuTGG aylanish samaradorligi bo'yicha olingan ma'lumotlar asosida garmonika chiqishini kalibrlash qulay hisoblanadi. Turli laboratoriyalarda o'tkazilgan tajribalarda bir xil sharoitlarni ta'minlash qiyin bo'lishiga qaramay, ayrim taxminiy baholashlar Zn va ZnSe nanozarralaridan foydalangan holda o'tkazilgan ushbu ikkita tajribalar uchun garmonikalar taqsimotining plato diapazonidagi (11-21 garmonikalar) almashtirish samaradorligini taxminan $\sim 10^{-5}$ qiymati bilan aniqlandi. Ushbu hisob-kitoblar orqali natijalarimizni ushbu parametrning miqdoriy o'lchovlari haqida xabar berilgan boshqa tadqiqotlar natijalari bilan solishtirish imkoniga ega bo'ldik [118; 605-b.]. Ushbu manbada keltirilgan natijalar bilan taqqoslashlar shuni ko'rsatdiki, olingan almashtirish samaradorligi qiymatlari o'zaro yaqinlikka ega. Bu moslik bizning tajribalarimizda olingan natijalar ishonchliligini tasdiqlaydi va o'tkazilgan hisob-kitoblar va baholashlar orqali turli laboratoriya

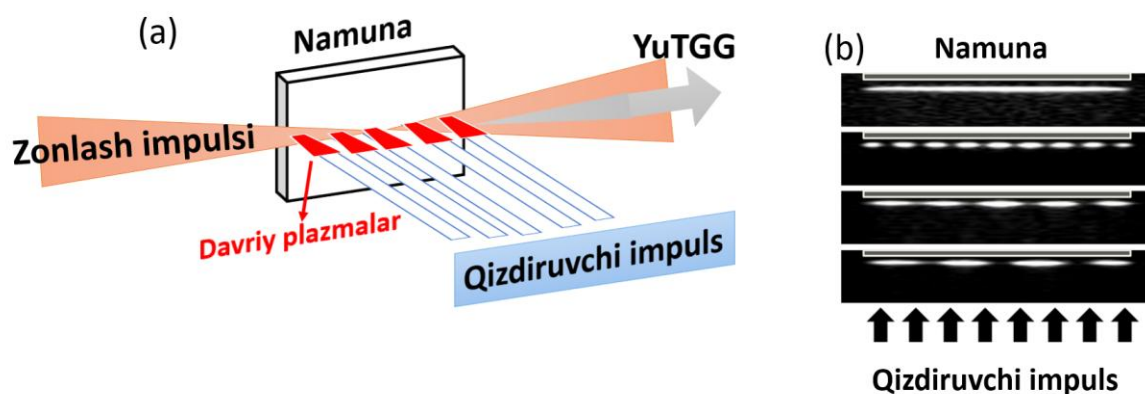
sharoitlarida olingan ilmiy ma'lumotlar orasida muvofiqlik mavjudligini ko'rsatadi.

4.3. § Turli modulyatsiyalangan plazma shakllarida yuqori tartibli garmonika generatsiyasi

KFM shartlarini yaratish YuTGG samaradorligini oshirishda muhim strategiya hisoblanadi. Bu jarayon kuchli ionlashish, dispersiya va plazmadagi zarralar sonining o'zgarishlarini boshqarish orqali amalga oshiriladi. Modulyatsiyalangan plazma orqali faza mosligi kichik oraliqlar bilan doimiy ravishda ta'minlaydi. YuTGG samaradorligi plazma zichligi modulyatsiyasi bilan sinxron ravishda optimallashtiriladi. Bu jarayonni amalga oshirishda namuna materiallari sifatida Mn va Ag tanlangan bo'lib, ularning sirtlarida hosil bo'lgan plazmalarning o'ziga xos xususiyatlari yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasining intensivligini oshirishi ko'rsatilgan [119; 023831-b., 120; 033805-b.]. Tadqiqot davomida bu materiallar yuqori garmonikalarni hosil qilishda muvaffaqiyatli erishilgan bo'lsa-da, qisqa to'lqin uzunligi dipozonida (8-30 nm) faza nomuvofiqligi kogerent nurlanishning samaradorligini pasaytirgan. Shuning uchun modulyatsiyalangan plazma texnikasini qo'llash orqali geometrik sozlash yordamida fazaviy moslashishni yaxshilash va garmonikaning turli guruhlarini optimallashtirish imkoniyati mavjud. Bunday yondashuvlar YuTGG samaradorligini yanada oshirishga yordam beradi.

Modulyatsiyalangan plazma bo'laklarini yaratishda KTN teleskop Ichida, hamda teleskop va silindrik linzalar o'rtasida burchakka burish orqali plazma strukturasi hosil qilinadi. Ushbu burchakli burilish plazma zichligining modulyatsiyasini ta'minlashda asosiy rol o'ynaydi, chunki KTN harakatlanishi natijasida plazma bo'laklari fazoviy tartibda joylashadi. Ushbu KTN usuli yordamida namuna sirtida davriy plazmalarni hosil qilish uchun Ti: safir lazerining siqilmagan nurlanishi (markaziy to'lqin uzunligi $\lambda = 802$ nm, impuls davomiyligi 370 ps, impuls energiyasi 4 mJ, 10 Hz - impulsning takrorlanish tezligi) qizdiruvchi impulsi sifatida ishlatilgan. Qizdirish impulsi 200 mm fokus uzunlikdagi silindrik linza yordamida vakuum kamerasi ichidagi namuna sirtida uzaytirilgan plazma alangasini yaratish uchun yo'naltiriladi. Ablatsiya jarayonida namuna sirtida taxminan

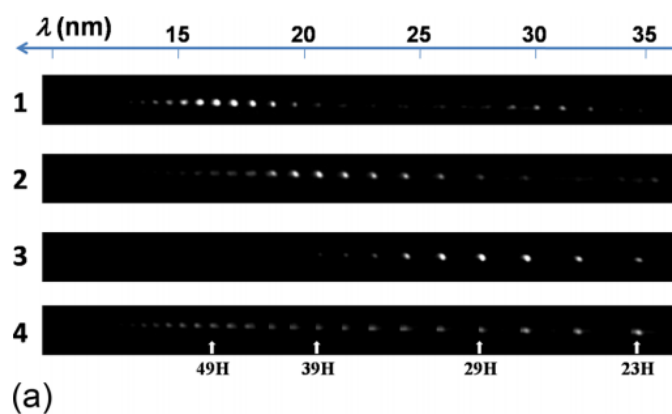
$3 \cdot 10^9 \text{ W/sm}^2$ intensivlikdagi qizdirish impulslari yordamida amalga oshirildi. Bu intensivlik kuchsiz ionlangan plazma hosil qilish uchun eng maqbul yechim sifatida tanlandi va eksperimentning muvaffaqiyatini ta'minladi. Hosil bo'lgan plazma alangasini davriy bo'laklarga ajratish uchun, yuqorida ta'kidlaganimizdek, KTN dan foydalanildi. 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 shakllar hosil qilindi.



4.4-rasm: a) Kumush nishonida KTN orqali davriy plazma bo'laklarini hosil qilish va b) uning shakllanishi.

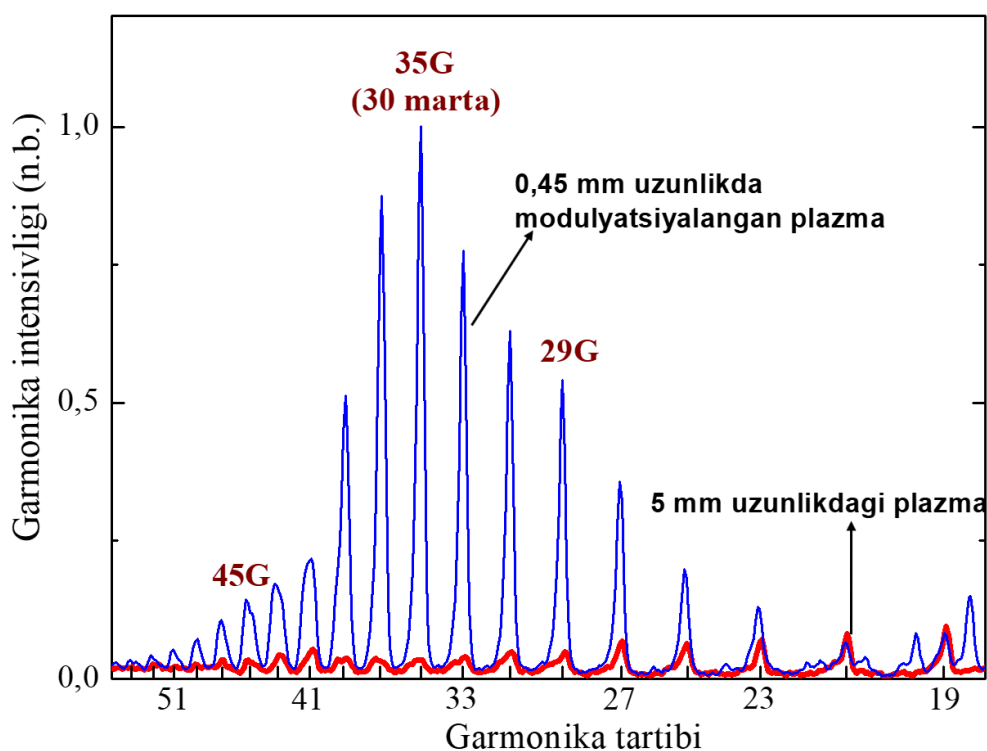
4.4-rasmda ushbu davriy bo'laklardan iborat plazma kumush nishon yuzasida hosil qilindi. Tajriba davomida olingan davriy plazmalar nishon sirtida hosil bo'lgan krater joylari bilan bir xil taqsimlanganligi kuzatildi. Modulyatsilangan plazma o'lchamlari, shuningdek, KTN orqali tarqaladigan nurlanishning geometrik xususiyatlaridan hisoblab aniqlandi. Hosil bo'lgan davriy plazmalarni tekshirish uchun zondlash impulsi plazma ichiga ortogonal yo'nalishda fokuslandi. Bu impuls 400 mm fokus masofaga ega sferik linza orqali namuna sirtidan taxminan $200 \mu\text{m}$ masofada yo'naltirildi. Zondlash impulsi intensivligi $3 \cdot 10^{14} \text{ W sm}^{-2}$ tanlandi, chunki bu qiymat garmonika generatsiyasini samarali amalga oshirishni taminlashi tajriba davomida aniqlandi. Modulyatsilangan plazma o'lchamlari, shuningdek, KTN orqali tarqaladigan nurlanishning geometrik xususiyatlaridan hisoblab aniqqlan. Garmonikalar (hech bo'lmaganda, yuqori darajali) bir karrali zaryadlangan ionlardan hosil bo'ladi. Shunday qilib, kengaytirilgan plazma bo'laklarining ionlanish darajasining o'sishi dastlab YuTGG ning kuchayishiga olib keladi. Ionlanish darajasining

keyingi o'sishi qo'shimcha paydo bo'lgan erkin elektronlarning konsentratsiyasining oshishiga olib keladi. Ko'p jihatdan elektronlarning musbat dispersiyasidan kelib chiqadigan faza nomuvofiqligi zondlash impulsi va garmonik to'lqinlar o'rtasidagi fazalarning optimal munosabatini buzadi. Bunday sharoitda garmonika samaradorligi pasayadi. Nihoyat, yuqori darajadagi ionlanish bilan garmonikalar spektrdan yo'qoladi va faqat plazma emissiyasigina qoladi. Ushbu muammoni bartaraf etish uchun namuna sirtini kuchliroq qo'zg'atishga imkon beruvchi qisqaroq davriy bo'laklarga bo'lish, shu bilan birga kuchaytirilgan garmonikalarning kogerentlik uzunligi ushbu plazma bo'laklarining o'lchamlaridan qisqaroq bo'lishi kerak. KTN orqali tarqalishdan keyin qizdirish impulsining energiyasi kamayadi. Shu bilan birga, qizdirish impulsining namuna sirtidagi oqimi bir xil bo'lib, har bir tirqishdan hosil bo'layotgan nishin sirtidagi intensivlik saqlanadi. Bu shuni anglatadiki, bu holatda elektron va plazma zichligi har bir davriy plazmada deyarli teng miqdorda bo'ladi. $0,9 \text{ J/sm}^2$ qizdirish nurlanish zichligida 5 mm uzunlikdagi kumush plazmasining garmonika generatsiya spektrlari qisqaroq to'lqin uzunligi oralig'ida garmonikalarning intensivligi asta-sekin kamayishi bilan plato sohasiga o'xshash bo'lmagan bo'lib, 4.5b-rasmning 4-tsvirida kengaytirilgan plazmadan olingan garmonikalarning spektral taqsimotining ishlov berilmagan tasviri ko'rsatilgan, bu tasvirda E_c taqriban 51- tartibli garmonika bilan tugagan. 4.5b-rasmning boshqa tasvirlari teleskopning tashqarisida va ichida turli pozitsiyalarda joylashgan KTN yordamida olingan garmonikalarning uchta ishlov berilmagan tasviridagi spektrlarini tasvirlaydi: uzunligi 0,3 mm bo'lgan sakkizta (4.5b-rasmning 1-tsviri), 0,38 mm uzunlikdagi oltita (4.5b-rasmning 2-tsviri) va to'rtta 0,5 mm uzunlikdagi (4.5b-rasmning 3-tsviri) modifikatsiyalangan plazmalar hosil qilingan bo'lib, maksimal yaxshilanishlar mos ravishda 49, 39 va 29-garmonika tartiblari uchun erishildi. Maksimal kuchaytirilgan garmonikalar $L_{kog} \times q_{kog}$ munosabat asosida



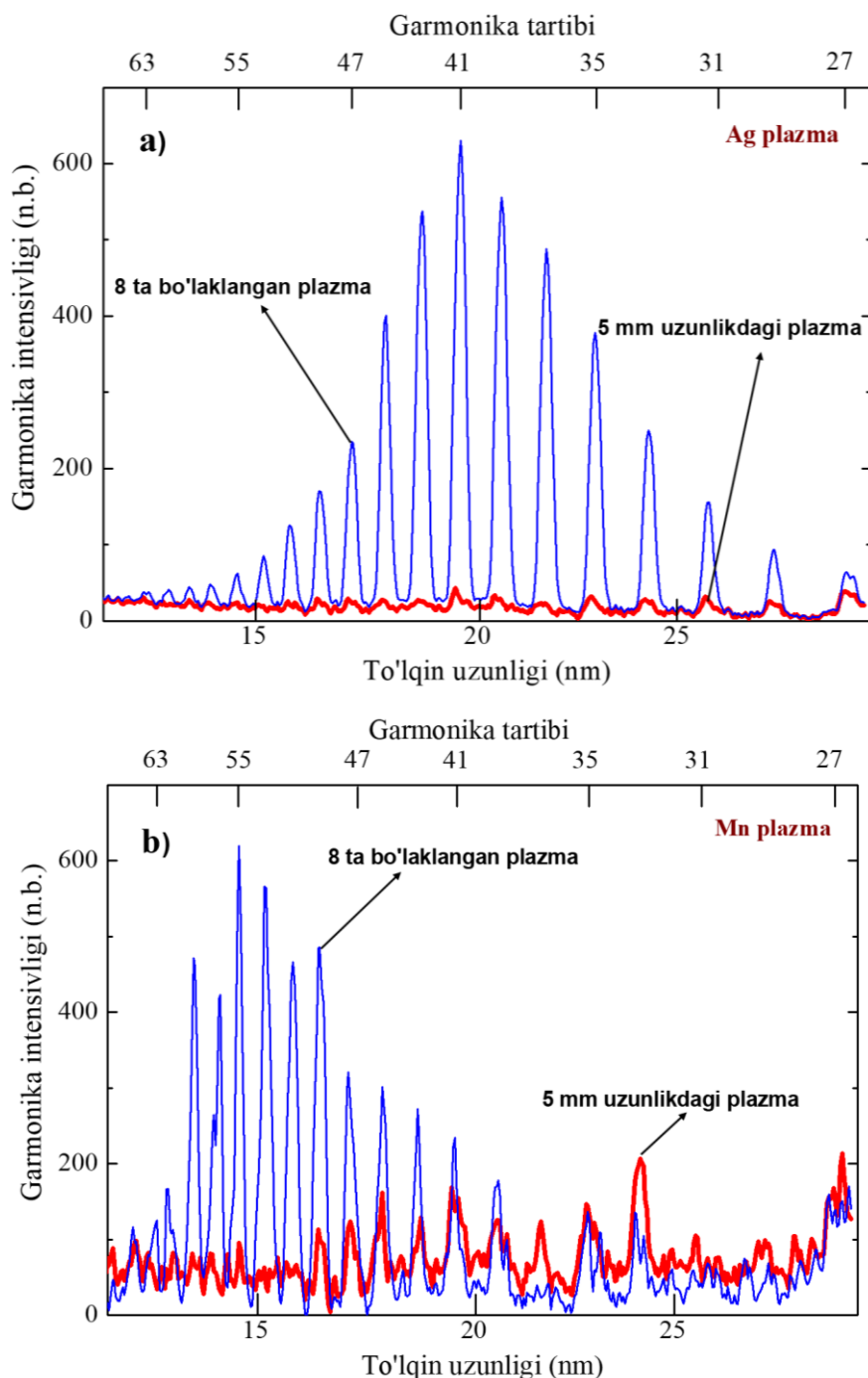
4.5-rasm. KTN yordamida hosil qilingan plazma bo‘laklarida va bitta uzun (5 mm) plazmada hosil qilingan garmonikalar generatsiyasi. elektron zichligi (chunki $L_{coh} \times q_{coh} = 1.4 \times 10^{18}/N_e$) aniqlandi. Garmonika spektrlarning shunga o‘xshash o‘zgarishlari Mn plazmasi holatida ham kuzatildi.

Qizdirish va zondlash impulslari orasidagi kechikish plazma plumlarning garmonika hosil bo‘lishini optimallashtirish uchun muhim hisoblanadi. Plazma hosil bo‘lishining dastlabki bosqichlarida zarrachalar (atomlar va bir zaryadlangan ionlar) tezligi $\sim 10^4 m \cdot s^{-1}$ bo‘lgan zarralar plazma kengayishining boshida zondlash nurining tarqalishi uchun bu zarralarning konsentratsiyasi garmonika hosil qilish uchun yetarli emas. Plazma hosil qiluvchi va zondlash impulslari orasidagi kechikish vaqtini sozlash, zondlash impulsining yo‘nalishida yetarli miqdorda plazma zarrachalarining paydo bo‘lishiga olib keldi. Bu esa tajribalar davomida garmonikalar generatsiyasi barqaror o‘shishini taminladi. Kechikishning yanada oshishi $\sim 35-45$ ns gacha bo‘lganda garmonika generatsiyasining to‘yinganligiga va uzoqroq kechikishlarda (>70 ns) almashtirish samaradorligining asta-sekin pasayishiga olib kelinganligi kuzatildi. Lazer yordamida hosil qilingan plazma generatsiyalarining barqarorligi turli spektral diapazonlarda barqaror kuchaytirilgan emissiya hosil qilish uchun zarur. Bizning tadqiqotlarimiz shuni ko‘rsatdiki, 10 Hz impulsning takrorlanish tezligida barqaror garmonika samaradorligi $\sim 10^{-3}$ bo‘lib, nishonni yuqoriga va pastga surib, garmonika emissiya barqarorligini sezilarli darajada oshirish mumkin. 5 mm uzunlikdagi plazma alangasidan foydalanish bilan solishtirganda ko‘p bo‘lakli plazma alangalarida q_{kog} ni kuchaytirish samaradorligi ~ 30 marta oshganligini kuzatdik.



4.6-ram. Ag plazmaning 5 mm uzunlikdagi va 0,45 mm uzunlikdagi oltita plazma bo‘laklariga ajratilgan holatida olingan garmonikalarning spektral taqsimoti [3A].

Shuningdek, sirti silliqilgan Ag va Mn nishonlari yuzalarida 0,4 mm uzunlikdagi sakkizta plazma bo‘laklaridan hosil bo‘lgan ikki xil materialdagi plazma garmonikalarining KFM asosida qiyosiy tahlillari o‘tkazildi. 4.6-rasmda 20 nm (Ag plazma; 41-garmonika, 4.7(a)-rasm) va 15 nm (Mn plazma; 55-garmonika, 4.7(b)-rasm) diapazonlarida garmonikalarning kuchaytirilgan guruhlarini spektrlari ko‘rsatilgan. Shu bilan birgalikda, bu rasmda bir xil nishonlarda hosil qilingan 5 mm uzunlikdagi kengaytirilgan plazmalardagi garmonika spektrlarini taqsimoti farqi ham keltirilgan.



4.7-rasm. (a) Ag va (b) Mn sakkiz bo‘lakli plazmalarda hosil bo‘lgan KFM asosida kuchaytirilgan garmonika spektrlari [3A].

Ag plazma modulyatsilangan bo‘laklarida hosil qilingan 41-garmonika (ko‘krangdagi spektrlar) va Mn plazma bo‘laklarida hosil qilingan 55-garmonika (ko‘k rangdagi spektrlar) uchun 5mm uzunlikdagi bo‘laklanmagan plazmaga (qizil rangdagi spektrlar) nisbatan kuchaytiruvchi omil ~ 20 va 12 marta oshganini ko‘rish mumkin. KFM shartlarini shakllantirish uchun ko‘rsatilgan yondashuvning afzalliklari orasida bir nechta plazma oqimlarida elektron konsentratsiyasini tartibga

solishning soddaligi va yuqori kuchaytiruvchi omillar tahlilining mavjudligi bilan ajralib turadi. Ajratilgan plazma oqimlarining belgilangan o'lchamlarida maksimal darajada kuchaytirilgan garmonikalarning kogerentlik formulasidan N_e ni hisoblash imkonini mavjud. Xususan, kumush nishonining o'xshash qo'zg'alishida hosil bo'lgan turli xil ko'p bo'lakli plazmalardagi elektron konsentratsiyasini $N_e = 1,4 \times 10^{18} / (L_{kog} \times q_{kog})$ orqali tajribada qo'llanilgan KTN holatlarida L_{kog} va q_{kog} ning eksperimental o'lchangan qiymatlari yordamida 6.2×10^{16} , 8×10^{16} , va $8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ekanligi aniqlandi. Bu yerda q_{kog} KFM mintaqasidagi eng yuqori intensivlikka ega garmonika tartibi bo'lib, L_{kog} alohida plazma bo'laklarining o'lchamlariga mos keladi. Biz shuningdek, N_e qiymatlari ITAP IMD kodi asosidagi hisoblashlarga mos kelishini aniqladik. Bu hisoblashlarda elektronlar konsentratsiyasi $N_e = 7.2 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$. Shu bilan birga, sirt ablatsiyasining bir xil sharoitlarida Ag va Mn nishonlari yuzasida hosil qilingan ko'p bo'lakli plazmalaridan YuTGG jarayonining qiyosiy tahlillari amalga oshirildi. Ushbu tahlillar natijasida mos ravishda 41-garmonika (Ag uchun) va 55-garmonika (Mn uchun) uchun q_{kog} qiymatlarining farq qilishi aniqlandi. Ablatsiya jarayonida Ag atomlarining nisbatan past ionlanish energiyasiga ega ekanligi sababli, Ag plazmasida erkin elektron konsentratsiyasi yuqori darajada oshadi. Bu Ag atomlari ablatsiya paytida ko'proq erkin elektronlar chiqarishini ta'minlaydi. Yuqori elektron konsentratsiyasi rezonansli garmonikalarni, ya'ni past tartibli garmonikalarni kuchaytirishga yordam beradi, chunki elektronlar zichligi yuqori bo'lgan plazmada KFM orqali past tartibdagi garmonikalar samarali hosil bo'ladi. Mn plazmasida esa xuddi shu ablatsiya sharoitlarida erkin elektron konsentratsiyasi nisbatan past bo'ladi. Mn atomining ko'p bosqichli ionlanish xususiyati uning d-elektronlariga bog'liq bo'lib, bu d-elektronlarning bir nechta bosqichda ionlanishi sababli yuqori zaryadlangan ionlarni hosil qilish uchun ko'proq energiya talab etiladi. Buning natijasida, Mn plazmasida hosil bo'lgan elektronlar zichligi past bo'lsa-da, bu plazmada kengroq rezonans sohasini shakllantirishga yordam beradi. Shu sababli, Mn plazmasida erkin elektronlar konsentratsiyasining nisbatan pastligi YuTGG jarayonida yuqori tartibli, ya'ni 55-tartibli garmonikani kuchaytirish imkonini beradi. Shunday qilib, YuTGG jarayonida turli

materiallarning ablatsiya jarayonida hosil qiladigan plazma xususiyatlari YuTGG samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Turli garmonika tartiblarning hosil bo'lishi aynan shu plazma parametrlari va KFM sharoitlari bilan chambarchas bog'liq.

IV-bobning muhim xulosalari.

Zn va ZnSe nanozarralaridan iborat kolloid suspenziyada aniqlangan manfiy nochiziqli refraksiya ushbu nanozarralardan tarkib topgan plazmada 40–80 nm diapazondagi YuTGG ning samaradorligini oshirishda muhim rol o‘ynadi.

Ekstremal ultrabinafsha nurlanish garmonikalarining maksimal tartibi Zn nanozarralari uchun 33, ZnSe nanozarralari uchun esa 27 tartibda hosil bo‘ldi. Garmonikalar tartibining kamayishi uch bosqichli model asosida izohlandi.

Asosiy (1030 nm) va ikkinchi garmonikasi (515 nm) yordamida hosil bo‘lgan 9 va 10-garmonikalarining yuqori yorqinligi Zn nanozarralaridagi rezonans xususiyatlari bilan bog‘liq bo‘lib, bu nanozarralarning o‘lchami va dielektrik xususiyatlariga mos keladi. ZnSe nanozarralarida esa rezonans chastotasi lazer nurlanishi bilan mos kelmaganligi sababli garmoniklar samaradorligida kuzatilmadi.

Tadqiqot davomida lazer ablatsiyasi natijasida Mn va Ag materiallari sirtida hosil bo‘lgan plazma bo‘laklari orasidagi masofa va ularning o‘lchamlarini nazorat qilish imkonini beruvchi uslub ishlab chiqildi. Ushbu usul teleskop ichiga va silindrik linza oldiga ko‘p tirqishli niqob qo‘yish orqali amalga oshirildi.

0,1 dan 1 mm gacha bo‘lgan ko‘p bo‘lakli davriy plazmalar hosil qilish orqali KFM shartlarida garmonikalarni sozlash va samaradorligini oshirish imkoniyati ko‘rsatildi.

Tadqiqot natijalariga ko‘ra, lazer ablatsiyasi orqali hosil qilingan plazma bo‘laklarining masofa va o‘lchamlarini boshqarish orqali KFM sharoitlarini yaxshilash va elektron zichligini (N_e) aniqlash usuli ishlab chiqildi.

UMUMIY XULOSALAR

1. Impuls davomiyligi 28 ps bo'lgan infraqizil lazer ($\lambda_w=1064$ nm) nurlanishining uglerod tarkibli gaz holatidagi muhitlarda uchinchi tartibli garmonika ($\lambda_{3w}=345$ nm) generatsiyasi o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, normal havo sharoitida generatsiyalangan uchinchi garmonikaga nisbatan 24 baravar yuqori samaradorlikka erishildi. Ushbu yuqori samaradorlik hodisasi uglerod tarkibli gazlarda nanoo'lchamli zarrachalarning mavjudligi va ularda yuz beruvchi nohiziqli optik jarayonlarning kuchayishi bilan izohlandi.
2. Sham alangasida uchinchi garmonikani generatsiyasining tahlili davomida shisha tagliklarga yotqizilgan uglerod tarkibli mikrotuzilmalar 155° suv tomchisi kontakt burchagi bilan supergidrofobik xususiyatlarni namoyon qildi. Bu natija gidrofobik qoplamalar yaratish va amaliy qo'llash uchun keng imkoniyatlarni ochadi.
3. Lazer ablatsiyasi orqali sintez qilingan Zn va ZnSe nanozarralarning nohiziqli optik xususiyatlari tizimli ravishda ilk bor tadqiq etildi. 1030 nm da Zn nanozarralari uchun nohiziqli sindirish γ va nohiziqli yutilish β koeffitsientlari mos ravishda -1.4×10^{-13} sm²/W va $2,7 \times 10^{-11}$ sm/W ni tashkil etgan bo'lsa, ZnSe nanozarralari uchun $\gamma=-4,9 \times 10^{-14}$ sm²/W va $\beta = 0,5 \times 10^{-11}$ sm/W ekanligi aniqlangan. Aniqlangan nohiziqli 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-skanerlash usuli yordamida o'lchangan Zn va ZnSe nanozarralarning nohiziqli optik xossalari, mazkur nanozarralardan 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 nohiziqli refraksiya effektiga ega ekanligi to'liq uzunliklari 40 – 80 nm garmonikalar samaradorligini oshirishga ijobiy ta'siri qayd etildi. Uch-qadamli modeliga asosan, Zn nanozarralaridan tashkil topgan plazmada garmonikalar maksimal 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 nanozarralarda 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 yaratadi.
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-garmonik 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 namoyish etildi.

CHOP ETILGAN ISHLAR RO‘YXATI

I-qism

1. 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/10.1063/1.4905524>
2. G. S. G Boltaev, A. M. Abu Baker, Mazhar 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* (2022), <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab58ec>.
3. 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>.
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).
5. Ganeev, R. A., Boltaev, G. S., Reyimbaev, Sh., Sherniyozov, K., & Usmanov, T. (2015). Use of extended laser plasma for generation of high-order harmonics of picosecond duration. *Quantum Electronics*, 45(7), 648–653. <https://doi.org/10.1070/QE2015v045n07ABEH015710>.

II-qism:

1. 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.
2. 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
 3. 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 истиқболлари» мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий конференцияси, Тошкент - 26 октябр, 2023 й., 50-51-бетлар.
 4. Sh.B. Reyimbaev, V.V. Gorbushin, Sh.R. Kamalov, B.R. Sobirov, Sh.D. Payziev, G.S. Boltaev, “A combined q-switching using cr^{4+} :yag and lbo crystals” , « Оптика ва лазер физикасининг муаммо ва истиқболлари» мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий конференцияси, Тошкент - 26 октябр, 2023 й., 67-68-бетлар.
 5. G.S.Boltaev, R.A.Ganeev, Sh.Reyimboyev, B.R.Sobirov, T.Y.Shermatov, B.R.Kutlimuratov, T.Usmanov, V.V.Kim,1 N.Y.Iskandarov, Z.T.Azamatov, N.S.Khalilova, M.Iqbal, S.A.Khan,1 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.
 6. 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-б

7. Б.Р.Собиров, Ш.Рейимбоев, Х.О.Шерниёзов, Ш.Р.Хайдаров. Металл наноэрозиялари олишнинг лазер абляция усули ва уларнинг физикавий хусусиятлари. “XXI аср – интеллектуал авлод асри” шиори остидаги Самарқанд ҳудудий илмий-амалий конференцияси, 2015 йил, 3-4 июнь, 184-186 б.
8. 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.бетлар.
9. Sh. Reyimboyev, V.V. Gorbushin, Sh.R. Kamalov, B.R. Sobirov, Y.A. Boriev va G.S. Boltaev, SESAM asosidagi modulyatsiyalangan lazerlarda sa`maradorlikni oshirish uchun zondlash pozitsiyasini optimallashtirish // Kogerent optika va lazer fizikasining dolzarb muammolari mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy anjuman, Toshkent davlat texnika universiteti, O‘zbekiston, 2024-yil 6-7-noyabr, 119-122-b.
10. 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.
11. Sh. Reyimboyev, G.S. Boltaev. Modification of modulated plasma plumes for the quasi-phasematching 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.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. R. W. Boyd and B. R. Masters, "Nonlinear Optics, Third Edition," *J. Biomed. Opt.* 14(2), 029902 (2009).
2. R. R. Alfano and S. L. Shapiro, "Direct Distortion of Electronic Clouds of Rare-Gas Atoms in Intense Electric Fields," *Phys. Rev. Lett.* 24(22), 1217–1220 (1970).
3. M. Rumi and J. W. Perry, "Two-photon absorption: an overview of measurements and principles," *Adv. Opt. Photonics* 2(4), 451 (2010).
4. S. S. Mukrimaa, Nurdyansyah, E. F. Fahyuni, A. Yulia Citra, N. D. Schulz, Dr. Ghassan, T. Taniredja, E. M. Faridli, and S. Harmianto, "Subjective Health Perception and Health-Related Indicators in Elderly Home-Dwellers: A Covariance Structural Analysis" (2016), 6(August).
5. J. M. Finn, A. J. Cole, and D. P. Brennan, "Error field penetration and locking to the backward propagating wave," *Phys. Plasmas* 22(12), 120701 (2015).
6. P. A. Shaw, E. Forsyth, F. Haseeb, S. Yang, M. Bradley, and M. Klausen, "Two-Photon Absorption: An Open Door to the NIR-II Biological Window?," *Front. Chem.* 10, (2022).
7. Y. B. Band, "Optical Properties and Applications of Reverse Saturable Absorbers," in *Methods of Laser Spectroscopy* (Springer US, 1986), pp. 117–121.
8. K. P. J. Reddy, "Applications of Reverse Saturable Absorbers in Laser Science," *Curr. Sci.* 61(8), 520–526 (1991).
9. K. P. J. Reddy, "No Title," *Curr. Sci.* 61(Applications of Reverse Saturable Absorbers in Laser Science.), 520–526 (1991).
10. L. Chen and M. Hong, "Functional nonlinear optical nanoparticles synthesized by laser ablation," *Opto-Electronic Sci.* 1(5), 210007–210007 (2022).
11. P. B. Corkum, "Plasma perspective on strong field multiphoton ionization," *Phys. Rev. Lett.* 71(13), 1994–1997 (1993).
12. J.-F. Adam, J.-P. Moy, and J. Susini, "Table-top water window transmission x-ray microscopy: Review of the key issues, and conceptual design of an instrument for biology," *Rev. Sci. Instrum.*

- 76(9), (2005).
13. E. A. Gibson, A. Paul, N. Wagner, R. Tobey, D. Gaudiosi, S. Backus, I. P. Christov, A. Aquila, E. M. Gullikson, D. T. Attwood, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "Coherent Soft X-ray Generation in the Water Window with Quasi-Phase Matching," *Science* (80-.). 302(5642), 95–98 (2003).
 14. G. Tallents, E. Wagenaars, and G. Pert, "Lithography at EUV wavelengths," *Nat. Photonics* 4(12), 809–811 (2010).
 15. C. Kern, M. Zürch, and C. Spielmann, "Limitations of Extreme Nonlinear Ultrafast Nanophotonics," *Nanophotonics* 4(3), 303–323 (2015).
 16. T. Nlo, "Nonlinear optics," *Lect. Notes Phys.* 824(2), 137–163 (2010).
 17. M. V. Ammosov, V. P. Krainov, V. M. Ristic, P. A. Galangainsky, and I. Y. Kiyan, "Tunneling ionization of atoms and atomic ions in an intense laser field with a nonhomogeneous space–time distribution," *J. Opt. Soc. Am. B* 9(8), 1225 (1992).
 18. M. V. Ammosov, N. B. Delone, and V. P. Krainov, "Tunnel Ionization Of Complex Atoms And Atomic Ions In Electromagnetic Field," in J. A. Alcock, ed. (1986), p. 138.
 19. N. Aközbek, A. Iwasaki, A. Becker, M. Scalora, S. L. Chin, and C. M. Bowden, "Third-Harmonic Generation and Self-Channeling in Air Using High-Power Femtosecond Laser Pulses," *Phys. Rev. Lett.* 89(14), 143901 (2002).
 20. F. Krausz and M. Ivanov, "Attosecond physics," *Rev. Mod. Phys.* 81(1), 163–234 (2009).
 21. R. A. Ganeev, G. S. Boltaev, R. I. Tugushev, T. Usmanov, M. Baba, and H. Kuroda, "Low- and high-order nonlinear optical characterization of C60-containing media," *Eur. Phys. J. D* 64(1), 109–114 (2011).
 22. H.-W. Zang, H.-L. Li, Y. Su, Y. Fu, M.-Y. Hou, A. Baltuška, K. Yamanouchi, and H. Xu, "Third-harmonic generation and scattering in combustion flames using a femtosecond laser filament," *Opt. Lett.* 43(3), 615 (2018).
 23. E. V. Melik-Gaykazyan, S. S. Kruk, R. Camacho-Morales, L. Xu, M.

- Rahmani, K. Zangeneh Kamali, A. Lamprianidis, A. E. Miroshnichenko, A. A. Fedyanin, D. N. Neshev, and Y. S. Kivshar, "Selective Third-Harmonic Generation by Structured Light in Mie-Resonant Nanoparticles," *ACS Photonics* 5(3), 728–733 (2018).
24. M. Lippitz, M. A. van Dijk, and M. Orrit, "Third-Harmonic Generation from Single Gold Nanoparticles," *Nano Lett.* 5(4), 799–802 (2005).
 25. G. S. Boltaev, R. A. Ganeev, I. A. Kulagin, and T. Usmanov, "Resonance enhancement of the 11th harmonic of 1064 nm picosecond radiation generating in lead plasma," *J. Opt. Soc. Am. B* 31(3), 436 (2014).
 26. I. A. Kulagin and T. Usmanov, "Optimal conditions for the generation of the third harmonic of focused radiation in a self-interaction regime," *Quantum Electron.* 28(12), 1092–1096 (1998).
 27. H. Xu, H. Xiong, R. Li, Y. Cheng, Z. Xu, and S. L. Chin, "X-shaped third harmonic generated by ultrashort infrared pulse filamentation in air," *Appl. Phys. Lett.* 92(1), (2008).
 28. L. Zhao, K. Zhao, W.-G. Yan, and Z. Liu, "Preparation of Assembled Carbon Soot Films and Hydrophobic Properties," *Materials (Basel)*. 11(11), 2318 (2018).
 29. B. Karthikeyan, C. S. S. Sandeep, R. Philip, and M. L. Baesso, "Study of optical properties and effective three-photon absorption in Bi-doped ZnO nanoparticles," *J. Appl. Phys.* 106(11), (2009).
 30. Y. Zhang and Y. Wang, "Nonlinear optical properties of metal nanoparticles: a review," *RSC Adv.* 7(71), 45129–45144 (2017).
 31. R. A. Ganeev, G. S. Boltaev, R. I. Tugushev, and T. Usmanov, "Nonlinear optical absorption and refraction in Ru, Pd, and Au nanoparticle suspensions," *Appl. Phys. B* 100(3), 571–576 (2010).
 32. E. V. García Ramírez, S. A. Sabinas Hernández, D. Ramírez Martínez, G. Díaz, and J. A. Reyes Esqueda, "Third order nonlinear optics in Ag nanocubes: local and nonlocal optical responses as a function of excitation wavelength and particle size," *Opt. Express* 25(25), 31064 (2017).
 33. P. Horáková, S. Skalická, L. Urbánková, D. Baholet, S. Kociová, Z. Bytesníková, E. Kabourková, Z. Lacková, N. Cernei, M. Gagic, V.

- Milosavljevic, V. Smolikova, E. Vaclavkova, P. Nevrkla, P. Knot, O. Krystofova, D. Hynek, P. Kopel, J. Skladanka, V. Adam, and K. Smerkova, "Zinc phosphate-based nanoparticles as a novel antibacterial agent: in vivo study on rats after dietary exposure," *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10(1), 17 (2019).
34. M. Umekar, R. Chaudhary, G. Bhusari, and A. Potbhare, "Fabrication of zinc oxide-decorated phyto-reduced graphene oxide nanohybrid via *Clerodendrum infortunatum*," *Emerg. Mater. Res.* 10(1), 75–84 (2021).
 35. R. G. Chaudhary, A. K. Potbhare, S. K. T. Aziz, M. S. Umekar, S. S. Bhuyar, and A. Mondal, "Phytochemically fabricated reduced graphene Oxide-ZnO NCs by *Sesbania bispinosa* for photocatalytic performances," *Mater. Today Proc.* 36, 756–762 (2021).
 36. B. Pejova and I. Grozdanov, "Three-dimensional confinement effects in semiconducting zinc selenide quantum dots deposited in thin-film form," *Mater. Chem. Phys.* 90(1), 35–46 (2005).
 37. R. Xie, L. Li, Y. Li, L. Liu, D. Xiao, and J. Zhu, "Fe:ZnSe semiconductor nanocrystals: Synthesis, surface capping, and optical properties," *J. Alloys Compd.* 509(7), 3314–3318 (2011).
 38. Q. Zhang, H. Li, Y. Ma, and T. Zhai, "ZnSe nanostructures: Synthesis, properties and applications," *Prog. Mater. Sci.* 83, 472–535 (2016).
 39. F. Mosmer, M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, and D. Dorrnian, "Optical Properties of Pure ZnSe Nanocrystals Synthesized by Laser Ablation in Organic Liquids," *J. Clust. Sci.* 24(3), 905–914 (2013).
 40. R. A. Ganeev, M. Suzuki, M. Baba, M. Ichihara, and H. Kuroda, "Low- and high-order nonlinear optical properties of BaTiO₃ and SrTiO₃ nanoparticles," *J. Opt. Soc. Am. B* 25(3), 325 (2008).
 41. A. Janotti and C. G. Van de Walle, "Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor," *Reports Prog. Phys.* 72(12), 126501 (2009).
 42. A. V. Kachynski, A. N. Kuzmin, M. Nyk, I. Roy, and P. N. Prasad, "Zinc Oxide Nanocrystals for Nonresonant Nonlinear Optical Microscopy in Biology and Medicine," *J. Phys. Chem. C* 112(29), 10721–10724 (2008).
 43. A. Rout, G. S. Boltaev, R. A. Ganeev, K. S. Rao, D. Fu, R. Y. Rakhimov, S. S. Kurbanov, S. Z. Uralanga, Z. S. Shaymardanov, and

- C. Guo, "Low- and high-order nonlinear optical studies of ZnO nanocrystals, nanoparticles, and nanorods," *Eur. Phys. J. D* 73(11), 235 (2019).
44. R. Karimzadeh and N. Mansour, "The effect of concentration on the thermo-optical properties of colloidal silver nanoparticles," *Opt. Laser Technol.* 42(5), 783–789 (2010).
 45. M. Rashidian, M. Ghoranneviss, and D. Dorrnian, "Thermo optical properties of Ag nanoparticles produced by pulsed laser ablation," *Opt. Quantum Electron.* 47(12), 3729–3745 (2015).
 46. A. Gnoli, L. Razzari, and M. Righini, "Z-scan measurements using high repetition rate lasers: how to manage thermal effects," *Opt. Express* 13(20), 7976 (2005).
 47. M. Mashayekh and D. Dorrnian, "Size-dependent nonlinear optical properties and thermal lens in silver nanoparticles," *Optik (Stuttg.)* 125(19), 5612–5617 (2014).
 48. G. S. Edwards, S. J. Allen, R. F. Haglund, R. J. Nemanich, B. Redlich, J. D. Simon, and W. C. Yang, "Applications of Free-Electron Lasers in the Biological and Material Sciences," *Photochem. Photobiol.* (2005).
 49. P. G. O'Shea and H. P. Freund, "Free-Electron Lasers: Status and Applications," *Science* (80-.). 292(5523), 1853–1858 (2001).
 50. I. R. Khairulin, V. A. Antonov, M. Y. Ryabikin, and O. Kocharovskaya, "Sub-fs pulse formation in a seeded hydrogenlike plasma-based x-ray laser dressed by an infrared field: Analytical theory and numerical optimization," *Phys. Rev. Res.* 2(2), 023255 (2020).
 51. H. Daido, "Review of soft x-ray laser researches and developments," *Reports Prog. Phys.* 65(10), 1513–1576 (2002).
 52. K. Midorikawa, "High-Order Harmonics: Application and Prospects," in *Laser Congress 2017 (ASSL, LAC)* (OSA, 2017), p. JM1A.2.
 53. S. Kim, J. Jin, I.-Y. Park, and S.-W. Kim, "High Order Harmonic Generation Based on Resonant Plasmon Field Enhancement," in *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing* (OSA, 2008), p. FTuBB2.
 54. S. Kim, J. Jin, Y.-J. Kim, I.-Y. Park, Y. Kim, and S.-W. Kim, "High-

- harmonic generation by resonant plasmon field enhancement," *Nature* 453(7196), 757–760 (2008).
55. J. Che, X. Yao, H. Jian, and M. Wang, "Application and preparation of ZnSe nanometer powder by reduction process," *Ceram. Int.* 30(7), 1935–1938 (2004).
 56. G. Li, Y. Jiang, K. Huang, P. Ding, and J. Chen, "Preparation and properties of magnetic Fe₃O₄–chitosan nanoparticles," *J. Alloys Compd.* 466(1–2), 451–456 (2008).
 57. H. Zhang, J. Mo, and X. Lü, "Synthesis and photoluminescence properties of wash-board belt-like ZnSe nanostructures," *Optoelectron. Lett.* 9(6), 401–404 (2013).
 58. L. Yang, L. Liu, D. Xiao, and J. Zhu, "Preparation and characterization of ZnSe nanocrystals by a microemulsion-mediated method," *Mater. Lett.* 72, 113–115 (2012).
 59. H. Gong, H. Huang, M. Wang, and K. Liu, "Characterization and growth mechanism of ZnSe microspheres prepared by hydrothermal synthesis," *Ceram. Int.* 33(7), 1381–1384 (2007).
 60. B. Feng, J. Cao, J. Yang, S. Yang, and D. Han, "Characterization and photocatalytic activity of ZnSe nanoparticles synthesized by a facile solvothermal method, and the effects of different solvents on these properties," *Mater. Res. Bull.* 60, 794–801 (2014).
 61. E. G. Gamaly, A. V. Rode, B. Luther-Davies, and V. T. Tikhonchuk, "Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics," *Phys. Plasmas* 9(3), 949–957 (2002).
 62. R. A. Ganeev, L. B. Elouga Bom, and T. Ozaki, "Deposition of nanoparticles during laser ablation of nanoparticle-containing targets," *Appl. Phys. B* 96(2–3), 491–498 (2009).
 63. N. G. Semaltianos, "Nanoparticles by Laser Ablation," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 35(2), 105–124 (2010).
 64. P. Camarda, L. Vaccaro, F. Messina, and M. Cannas, "Oxidation of Zn nanoparticles probed by online optical spectroscopy during nanosecond pulsed laser ablation of a Zn plate in H₂O," *Appl. Phys. Lett.* 107(1), 013103 (2015).

65. M. A. Gondal, A. M. Ilyas, and U. Baig, "Pulsed laser ablation in liquid synthesis of ZnO/TiO₂ nanocomposite catalyst with enhanced photovoltaic and photocatalytic performance," *Ceram. Int.* 42(11), 13151–13160 (2016).
66. K. Zhang, S. K. Maurya, R. A. Ganeev, K. S. Rao, and C. Guo, "Ablated nickel nanoparticles: third harmonic generation and optical nonlinearities," *J. Opt.* 20(12), 125502 (2018).
67. J.-P. Sylvestre, A. V. Kabashin, E. Sacher, and M. Meunier, "Femtosecond laser ablation of gold in water: influence of the laser-produced plasma on the nanoparticle size distribution," *Appl. Phys. A* 80(4), 753–758 (2005).
68. F. Abrinaei, "Laser ablation of magnesium in water and investigation of optical nonlinearity by the Z-scan technique," *J. Opt. Soc. Am. B* 33(5), 864 (2016).
69. A. Rout, G. Boltaev, R. Ganeev, Y. Fu, S. Maurya, V. Kim, K. Rao, and C. Guo, "Nonlinear Optical Studies of Gold Nanoparticle Films," *Nanomaterials* 9(2), 291 (2019).
70. R. A. Ganeev, G. S. Boltaev, V. V. Kim, K. Zhang, A. I. Zvyagin, M. S. Smirnov, O. V. Ovchinnikov, P. V. Redkin, M. Wöstmann, H. Zacharias, and C. Guo, "Effective high-order harmonic generation from metal sulfide quantum dots," *Opt. Express* 26(26), 35013 (2018).
71. J. Liang, Y. H. Lai, W. Fu, C. Guo, and W. Li, "Distinguishing monomer and nanoparticle contributions to high-harmonic emission from laser-ablated plumes," *Opt. Express* 29(15), 23421 (2021).
72. H. Singhal, R. A. Ganeev, P. A. Naik, A. K. Srivastava, A. Singh, R. Chari, R. A. Khan, J. A. Chakera, and P. D. Gupta, "Study of high-order harmonic generation from nanoparticles," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* 43(2), 025603 (2010).
73. R. A. Ganeev, S. Y. Stremoukhov, A. V. Andreev, and A. S. Alnaser, "Application of Quasi-Phase Matching Concept for Enhancement of High-Order Harmonics of Ultrashort Laser Pulses in Plasmas," *Appl. Sci.* 9(8), 1701 (2019).
74. I. J. Kim, C. M. Kim, H. T. Kim, G. H. Lee, Y. S. Lee, J. Y. Park, D. J. Cho, and C. H. Nam, "Highly Efficient High-Harmonic Generation

- in an Orthogonally Polarized Two-Color Laser Field," *Phys. Rev. Lett.* 94(24), 243901 (2005).
75. R. A. Ganeev, "Two-color pump of laser plasmas for harmonic generation," *Opt. Spectrosc.* 120(5), 766–772 (2016).
 76. A. Paul, R. A. Bartels, R. Tobey, H. Green, S. Weiman, I. P. Christov, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, and S. Backus, "Quasi-phase-matched generation of coherent extreme-ultraviolet light," *Nature* 421(6918), 51–54 (2003).
 77. X. Zhang, A. L. Lytle, T. Popmintchev, X. Zhou, H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, and O. Cohen, "Quasi-phase-matching and quantum-path control of high-harmonic generation using counterpropagating light," *Nat. Phys.* 3(4), 270–275 (2007).
 78. T. Augustine, B. Carré, and P. Salières, "Quasi-phase-matching of high-order harmonics using a modulated atomic density," *Phys. Rev. A* 76(1), 011802 (2007).
 79. J. Seres, V. S. Yakovlev, E. Seres, C. Streltsov, P. Wobrauschek, C. Spielmann, and F. Krausz, "Coherent superposition of laser-driven soft-X-ray harmonics from successive sources," *Nat. Phys.* 3(12), 878–883 (2007).
 80. V. Tosa, V. S. Yakovlev, and F. Krausz, "Generation of tunable isolated attosecond pulses in multi-jet systems," *New J. Phys.* 10(2), 025016 (2008).
 81. K. O'Keeffe, T. Robinson, and S. M. Hooker, "Quasi-phase-matching high harmonic generation using trains of pulses produced using an array of birefringent plates," *Opt. Express* 20(6), 6236 (2012).
 82. A. H. Sheinfux, Z. Henis, M. Levin, and A. Zigler, "Plasma structures for quasiphase matched high harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.* 98(14), (2011).
 83. R. A. Ganeev, M. Suzuki, and H. Kuroda, "Quasi-phase-matching of high-order harmonics in multiple plasma jets," *Phys. Rev. A* 89(3), 033821 (2014).
 84. R. A. Ganeev, M. Suzuki, and H. Kuroda, "High-order harmonic enhancement using the quasi-phase-matching in a laser plasma," *JETP Lett.* 99(7), 368–372 (2014).

85. M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T.-H. Wei, D. J. Hagan, and E. W. Van Stryland, "Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam," *IEEE J. Quantum Electron.* 26(4), 760–769 (1990).
86. M. Sheik-bahae, A. A. Said, and E. W. Van Stryland, "High-sensitivity, single-beam n_2 measurements," *Opt. Lett.* 14(17), 955 (1989).
87. "No Title," (n.d.).
88. Q. Yang, "Image Denoising Combining the P-M Model and the LLT Model," *J. Comput. Commun.* 03(10), 22–30 (2015).
89. R. L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics* (CRC Press, 2003).
90. H.-W. Sun, P.-C. Huang, Y.-H. Tzeng, J.-T. Huang, C. D. Lin, C. Jin, and M.-C. Chen, "Extended phase matching of high harmonic generation by plasma-induced defocusing," *Optica* 4(8), 976 (2017).
91. V. V. Strelkov and R. A. Ganeev, "Quasi-phase-matching of high-order harmonics in plasma plumes: theory and experiment," *Opt. Express* 25(18), 21068 (2017).
92. K. Zhang, R. A. Ganeev, G. S. Boltaev, P. V Redkin, and C. Guo, "Effect of different hardness and melting point of the metallic surfaces on structural and optical properties of synthesized nanoparticles," *Mater. Res. Express* 6(4), 045027 (2019).
93. G. S. Boltaev, R. A. Ganeev, P. S. Krishnendu, K. Zhang, and C. Guo, "Nonlinear optical characterization of copper oxide nanoellipsoids," *Sci. Rep.* 9(1), 11414 (2019).
94. H. T. Salloom, T. K. Hamad, and A. S. Jasim, "Effect of concentration on the nonlinear optical response of gold poly(methyl methacrylate) nanocolloids," *J. Opt. Technol.* 86(10), 614 (2019).
95. A. V. Simakin, V. V. Voronov, N. A. Kirichenko, and G. A. Shafeev, "Nanoparticles produced by laser ablation of solids in liquid environment," *Appl. Phys. A* 79(4–6), 1127–1132 (2004).
96. X. Liu, S. Guo, H. Wang, and L. Hou, "Theoretical study on the closed-aperture Z-scan curves in the materials with nonlinear refraction and strong nonlinear absorption," *Opt. Commun.* 197(4–6), 431–437 (2001).
97. L. Irimpan, A. Deepthy, B. Krishnan, V. P. N. Nampoore, and P. Radhakrishnan, "Nonlinear optical characteristics of self-assembled

- films of ZnO," *Appl. Phys. B* 90(3–4), 547–556 (2008).
98. Y. H. Lee, Y. Yan, L. Polavarapu, and Q.-H. Xu, "Nonlinear optical switching behavior of Au nanocubes and nano-octahedra investigated by femtosecond Z-scan measurements," *Appl. Phys. Lett.* 95(2), 023105 (2009).
 99. P. Zaca-Morán, R. Ramos-Garcia, J. G. Ortega-Mendoza, F. Chávez, G. F. Pérez-Sánchez, and C. Felipe, "Saturable and two-photon absorption in zinc nanoparticles photodeposited onto the core of an optical fiber," *Opt. Express* 23(14), 18721 (2015).
 100. Y. Yang, M. Nogami, J. Shi, H. Chen, G. Ma, and S. Tang, "Controlled surface-plasmon coupling in SiO₂-coated gold nanochains for tunable nonlinear optical properties," *Appl. Phys. Lett.* 88(8), 081110 (2006).
 101. R. A. Ganeev, M. Suzuki, M. Baba, M. Ichihara, and H. Kuroda, "Low- and high-order nonlinear optical properties of Au, Pt, Pd, and Ru nanoparticles," *J. Appl. Phys.* 103(6), 063102 (2008).
 102. G. S. Boltaev, M. Iqbal, N. A. Abbasi, V. V. Kim, R. A. Ganeev, and A. S. Alnaser, "Enhanced XUV harmonics generation from diatomic gases using two orthogonally polarized laser fields," *Sci. Rep.* 11(1), 5534 (2021).
 103. L. Zheng, X. Chen, S. Tang, and R. Li, "Multiple quasi-phase-matching for enhanced generation of selected high harmonics in aperiodic modulated fibers," *Opt. Express* 15(26), 17985 (2007).
 104. R. A. Ganeev, M. Baba, M. Suzuki, and H. Kuroda, "Analysis of nonlinear self-interaction of femtosecond pulses during high-order harmonic generation in laser-produced plasma," *J. Opt. Soc. Am. B* 23(7), 1332 (2006).
 105. L. Zhang, X. Du, G. Yang, and D. Qin, "Biomimetic synthesis and assembly of HgS nanocrystals via a protein inducing process," *Res. Chem. Intermed.* 41(11), 9067–9083 (2015).
 106. O. V. Ovchinnikov, M. S. Smirnov, B. I. Shapiro, T. S. Shatskikh, A. S. Perepelitsa, and N. V. Korolev, "Optical and structural properties of ensembles of colloidal Ag₂S quantum dots in gelatin," *Semicond.* 2015 493 49(3), 373–379 (2015).
 107. G. S. Boltaev, R. A. Ganeev, V. V. Strelkov, V. V. Kim, K. Zhang, M.

- Venkatesh, and C. Guo, "Resonance-enhanced harmonics in mixed laser-produced plasmas," *Plasma Res. Express* 1(3), 035002 (2019).
108. R. A. Ganeev, M. Baba, M. Suzuki, S. Yoneya, and H. Kuroda, "Low- and high-order harmonic generation in the extended plasmas produced by laser ablation of zinc and manganese targets," *J. Appl. Phys.* 116(24), (2014).
 109. B. Verhoff, S. S. Harilal, J. R. Freeman, P. K. Diwakar, and A. Hassanein, "Dynamics of femto- and nanosecond laser ablation plumes investigated using optical emission spectroscopy," *J. Appl. Phys.* 112(9), (2012).
 110. H. Singhal, R. A. Ganeev, P. A. Naik, J. A. Chakera, U. Chakravarty, H. S. Vora, A. K. Srivastava, C. Mukherjee, C. P. Navathe, S. K. Deb, and P. D. Gupta, "High-order harmonic generation in a plasma plume of in situ laser-produced silver nanoparticles," *Phys. Rev. A* 82(4), 043821 (2010).
 111. T. D. Donnelly, T. Ditmire, K. Neuman, M. D. Perry, and R. W. Falcone, "High-Order Harmonic Generation in Atom Clusters," *Phys. Rev. Lett.* 76(14), 2472–2475 (1996).
 112. J. W. G. Tisch, T. Ditmire, D. J. Fraser, N. Hay, M. B. Mason, E. Springate, J. P. Marangos, and M. H. R. Hutchinson, "Investigation of high-harmonic generation from xenon atom clusters," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* 30(20), L709–L714 (1997).
 113. S. X. Hu and Z. Z. Xu, "Enhanced harmonic emission from ionized clusters in intense laser pulses," *Appl. Phys. Lett.* 71(18), 2605–2607 (1997).
 114. J. W. G. Tisch, "Phase-matched high-order harmonic generation in an ionized medium using a buffer gas of exploding atomic clusters," *Phys. Rev. A* 62(4), 041802 (2000).
 115. R. A. Ganeev, C. Hutchison, I. Lopez-Quintas, F. McGrath, D. Y. Lei, M. Castillejo, and J. P. Marangos, "Ablation of nanoparticles and efficient harmonic generation using a 1-kHz laser," *Phys. Rev. A* 88(3), 033803 (2013).
 116. M. Wöstmann, P. V. Redkin, J. Zheng, H. Witte, R. A. Ganeev, and H. Zacharias, "High-order harmonic generation in plasmas from

- nanoparticle and mixed metal targets at 1-kHz repetition rate," *Appl. Phys. B* 120(1), 17–24 (2015).
117. R. A. Ganeev, M. Suzuki, and H. Kuroda, "High-order harmonic generation in Ag, Sn, fullerene, and graphene nanoparticle-contained plasmas using two-color mid-infrared pulses," *Eur. Phys. J. D* 70(1), 21 (2016).
 118. M. Suzuki, R. A. Ganeev, T. Ozaki, M. Baba, and H. Kuroda, "Enhancement of two-color high harmonic by using two compound strong ionic transitions in double-target scheme," *Appl. Phys. Lett.* 90(26), (2007).
 119. R. A. Ganeev, L. B. E. Bom, J.-C. Kieffer, M. Suzuki, H. Kuroda, and T. Ozaki, "Demonstration of the 101st harmonic generated from a laser-produced manganese plasma," *Phys. Rev. A* 76(2), 023831 (2007).
 120. L. B. Elouga Bom, J.-C. Kieffer, R. A. Ganeev, M. Suzuki, H. Kuroda, and T. Ozaki, "Influence of the main pulse and prepulse intensity on high-order harmonic generation in silver plasma ablation," *Phys. Rev. A* 75(3), 033804 (2007).

MUNDARIJA

KIRISH.....	3
SHARTLI QISQARTMALAR RO‘YXATI.....	5
I-BOB. NANOZARRALAR VA PLAZMALAR YORDAMIDA GARMONIKALAR GENERATSIYASINI HOSIL QILISHNING ZAMONAVIY USULLARI BO‘YICHA ADABIYOTLAR SHARHI.....	6
1.1. § Nochiziqli optik jarayonlar (umumiy tushunchalar).....	6
1.1.1. Nochiziqli sindirish ko‘rsatgichi.....	9
1.1.2. Ikki fotonli yutilish.....	10
1.1.3. To‘yinuvchi yutilish.....	12
1.1.4. Teskari to‘yinuvchi yutilish.....	14
1.1.5. Yuqori tartibli nochiziqli jarayonlar va yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi.....	17
1.2. § Yonish alangalarida uchinchi tartibli nochiziqli jarayonlar.....	19
1.3. § Nanozarralarning nochiziqli va termo-optik xossalari.....	21
1.4. § Yuqori tartibli garmonika generatsiyasini samaradorligini oshirish.....	24
1.4.1. Nanozarralardan tarkib topgan plazmada yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi.....	26
1.4.2. Ikki to‘lqinli lazer maydonining garmonikalar samaradorligiga ta’siri.....	29
1.4.3. Garmonikalar samaradorligini kvazi-fazaviy moslashish yordamida oshirish.....	31
I-bob xulosalari.....	34
II-BOB. QUIYI TARTIBLI NOCHIZIQLI JARAYONLAR VA YUQORI TARTIBLI GARMONIKALAR GENERATSIYASI HOSIL QILISH METODIKASI. EKSPERIMENTAL QURILMALAR TAVSIFI.....	36

2.1. § Yonish alangalarida qo‘llaniladigan qurilmalar va ularning tavsifi.....	36
2.2. § Lazer ablatsiyasi yordamida suyuqliklarda nanozarralarni sintez qilish.....	38
2.3. § Nanozarralar suspenziyasi uchun Z-skanerlash usuli tavsifi.....	39
2.3.1. Ochiq apertura.....	40
2.3.2. Yopiq apertura.....	41
2.4. § Nanozarralardan tarkib topgan namuna nishonlarini tayyorlash.....	43
2.5. § Davriy plazmalarni modifikatsiyalash texnologiyasi va ularning mexanizmlari.....	44
II-bobning muhim xulosalari.....	51
III-BOB. YONISH ALANGALARIDA VA LAZER ABLATSIYASI YORDAMIDA SINTEZ QILINGAN NANOZARRALARDA QUIYI TARTIBLI NOCHIZIQLILIK.....	52
3.1. § Uglerod tarkibli yonish alangalarida uchinchi tartibli garmonika generatsiyasi.....	52
3.2. § Alanga nanozarralarining gidrofobik xususiyatlari.....	61
3.3. § Zn va ZnSe nanozarralarning morfologiyasi va chiziqli optik xossalari.....	66
3.4. § Zn va ZnSe nanozarralarining quyi tartibli nochiziqli optik xossalari.....	71
III-bobning muhim xulosalari.....	77
IV-BOB. NANOZARRALAR VA MODULYATSIYALANGAN PLAZMADA YUQORI TARTIBLI GARMONIKALARNI HOSIL QILISH VA OPTIMALLASHTIRISH.....	78
4.1. § Zn va ZnSe nanozarralari plazmasida yuqori tartibli garmonikalar generatsiyasi.....	78
4.2. § Zn atomlari uchun uch qadam hisoblash modeli.....	82
4.3. § Turli modulyatsiyalangan plazma shakllarida yuqori tartibli garmonikalar eneratsiyasi.....	89

IV-bobning muhim xulosalari.....	97
XULOSALAR.....	98
CHOP ETILGAN MAQOLALAR RO‘YXATI.....	100
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI.....	103

**REYIMBAYEV SHERZOD BOZORBOYEVICH, BOLTAYEV
GANJABOY SAPAYEVICH**

**LAZER ABLYATSIYASI YORDAMIDA OLINGAN
NANOZARRALARNING NOCHIZIQLI OPTIK XOSSALARI**

MONOGRAFIYA

Bosh muharrir: Eshkarayev S. Ch.

Texnik muharrir: Eshqorayev S.S

Musahhih: Javgashev Y.J

Tasdiqnoma № 255979, 13.04.2024

Bosishga 05.12.2025 da ruxsat berilgan. Format 60x84/16.

Garnitura Times New Roman. Shartli bosma tobog‘i 6.0. Adadi 60 dona.

Buyurtma № 410

“**TERMIZ PUBLISHING CENTER**” nashriyotida tayyorlandi va chop
etildi.

Surxondaryo viloyati, Termiz shahri, Ibn Sino ko‘chasi 38B-uy, Toshkent
sh., "TRASTBANK" XA BANKINING BOSH OFISI, MFO: 00491,

INN: 311209934 H/R: 20208000307031406001

Telefon: +998-88-808-21-07

ISBN 978-9910-624-20-9



7822



**TERMIZ
PUBLISHING
CENTER**

TERMIZ - 2025