

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

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**РЎЗИЕВ ЗУҲРИДДИН ЖАМОЛИДДИНОВИЧ**

**НОЧИЗИҚЛИ ФОТОН КРИСТАЛЛАРИДА ЎЗ - ЎЗИГА ТАЪСИР ВА  
НОСТАЦИОНАР ШАРТЛАРДА ИККИНЧИ ГАРМОНИКА ГЕНЕРАЦИЯСИ**

**01.04.11 – Лазер физикаси**

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

**Тошкент – 2023**

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

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

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

**Рўзиев Зухриддин Жамолиддинович**

Ночизикли фотон кристалларида ўз - ўзига таъсир ва ностационар шартларда иккинчи гармоника генерацияси ..... 3

**Рузиев Зухриддин Джамолиддинович**

Генерация второй гармоник в нелинейных фотонных кристаллах в условиях самовоздействия и нестационарности ..... 21

**Ruziev Zukhriddin Jamoliddinovich**

Second harmonic generation in nonlinear photonic crystals under self-action and nonstationarity conditions ..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 43

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

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА  
УНИВЕРСИТЕТИ**

**РЎЗИЕВ ЗУҲРИДДИН ЖАМОЛИДДИНОВИЧ**

**НОЧИЗИҚЛИ ФОТОН КРИСТАЛЛАРИДА ЎЗ - ЎЗИГА ТАЪСИР ВА  
НОСТАЦИОНАР ШАРТЛАРДА ИККИНЧИ ГАРМОНИКА ГЕНЕРАЦИЯСИ**

**01.04.11 – Лазер физикаси**

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

**Тошкент – 2023**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.3.PhD/FM773 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация И Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.iplt.uz](http://www.iplt.uz)) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) жойлаштирилган.

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Сапаев Усмон Қаландарович</b> физика-математика фанлари доктори
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Болтаев Ганжабой Сапаевич</b> физика-математика фанлари доктори
	<b>Махмудов Хикмат Махаматович</b> физика-математика фанлари доктори
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Урганч давлат университети</b>

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2023 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33- уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz) (Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборотресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2023 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ кунни тарқатилди.  
(2023 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

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

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

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

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Лазерлар яратилгандан бери квадратик ночизикли кристаллар лазер қурилмаларини яратишда ва лазер нурланишининг муҳит билан ўзаро таъсирини ўрганишда муҳим рол ўйнамоқда. Улар лазер нурланишини ултрабинафшадан яқин инфрақизилгача бўлган керакли спектрал соҳаларга самарали айлантира олади. Муайян шароитларда улар лазер нурланишининг энергиясини юқори самарадорлик билан спектрнинг керакли частотасига айлантириш имконини беради. Бироқ, ночизикли кристалларда, шу жумладан ночизикли фотон кристалларида қисқа импульслардан ( $\tau \sim 10$  фс ёки  $\tau \lesssim 10$  фс дан кичик) фойдаланишда муҳитнинг дисперсия ва учинчи тартибли ночизиклийлик таъсирининг кучайишига олиб келади, ва бу иккинчи гармоника генерацияси самарадорлигининг кескин пасайишига олиб келади.

Умуман олганда ночизикли оптик кристаллардан фойдаланишга асосланган частота алмаштиришлар ривожлантириш тенденцияси кенг диафрагма (конформ) нурлар билан нано ва суб-пикосекундли давомийликдаги нурланиш диапазонини юқори эффективлик билан частота алмаштириш жараёнини амалга оширилганлигини осон пайқаш мумкин. Фемтосекунд давомийликдаги импульсларини қўллаш билан гармоника генерациялари эффективлиги пасаяди хусусан: ночизикли оптик кристалларда иккинчи гармоника генерациясини олиш билан боғлиқ жараён мураккаблашади. Сўнги йилларда частота алмаштириш жараёнини самарали амалга ошириш учун импульсларни ва ночизикли фотон кристалларини чирплаш усуллари кенг қўлланилмоқда. Бу усуллар лазер импульси давомийлиги яқин фемтосекундгача бўлган ҳолатлар учун яхши ўрганилган ва қўлланилган бироқ бир неча ўнлаб фемтосекунд ( $10 \text{ фс} > \tau$ ) давомийликдаги импульслар учун яхши ўрганилмаган.

Сўнги йилларда Ўзбекистон Республикасида лазер нурланишини самарали частота алмаштириш қилишнинг янги имкониятларини хусусан, анъанавий ночизикли оптик кристалларга нисбатан бир қатор афзалликларга эга бўлган ночизикли фотон кристаллар каби оптик наноматериаллардан фойдаланишга эътибор кучаймоқда. Мамлакатимиз илм-фани ривожини ва уларни амалиётга татбиқ этишда муҳим аҳамиятга эга бўлган мазкур фундаментал тадқиқот ва ишланмаларнинг йўналишлари 2023–2026-йилларда Янги Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида ўз ифодасини топган (28.01.2023 № ПФ-60).

«Электроника, наноматериаллар физикаси ва амалий математика»<sup>1</sup> фанларининг устувор йўналишлари бўйича халқаро стандартлар даражасида илмий тадқиқот олиб боришнинг асосий вазифалари ва фаолияти йўналишлари белгилаб берилган. Фармоннинг бажарилишини таъминлашда лазер нурланишининг моддалар билан ўзаро таъсири муаммосини ҳал қилиш

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2017-йил 18-майдаги “Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг янги ташкил этилаётган илмий-тадқиқот муассасалари фаолиятини ташкил этиш чора-тадбирлари тўғрисида”ги 292-сон қарори.

назариясини ишлаб чиқиш муҳимдир. Мазкур диссертация тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2023-йил 28-январдаги “Янги Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги ПФ-60-сон фармонларида ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 08.10.2019 йилдаги ПФ-5847-сонли фармони, “Ўзбекистон Республикаси олий таълим тизимини 2030 йилгача ривожлантириш концепцияси” йўл харитасига киритилган “Олий таълим муассасаларининг илмий салоҳиятини ошириш чораларини кўриш”. Шу билан бирга 2017-йил 17-февралдаги “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий-тадқиқот фаолиятини ташкил етиш, бошқариш ва молиялаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПФ-2789-сонли қарорлари ҳамда ушбу фаолият соҳасига оид бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларга маълум даражада мос келади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси фан ва техникасини ривожлантиришининг устувор йўналиши – II «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» га мувофиқ амалга оширилди.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Иккинчи генерация гармоника жараёни тарихи биринчи лазер яратилган йилларга бориб тақалади. Биринчи марта Т. Мейман (Nature V.187, p. 493 1960) томонидан яратилган ва эълон қилинган рубин лазери нурланишини кварц кристалига таъсири П. Франкен (Phys. Rev. Lett. 7, 118, 1961) томонидан ўрганилганда биринчи марта иккинчи гармоника генерацияси жараёни кузатилган эди. Бироқ бу тажрибада унинг самарадорлиги жуда паст бўлган ( $\sim 10^{-12}$  % лар атрофида). Орадан кўп вақт ўтмасдан олимлар самарали иккинчи ва бошқа турдаги частота алмаштиришлар олиш учун ўзаро таъсирлашувчи оптик тўлқинлар орасида фазолар синхронизми пайдо қилиш кераклигини маълум қилишди.

Иккинчи гармоник генерациясини ривожлантиришда навбатдаги муҳим кадам 1962 йилда П. Д. Макер ва унинг жамоаси (Physical review letters V8, p.21 1962) томонидан қилинган. Улар иккинчи гармоника генерациясини олиш учун ассиметрик (анизатропик) кристалл тузилишга эга чизикли бўлмаган оптик кристаллардан фойдаланишни таклиф қилдилар. Бу иккинчи гармоника генерацияси самарадорлигини сезиларли даражада оширишга олиб келганди.

1962 йилда Н. Бломберган ҳаммуаллифлари билан (Phys. Rev. V 127, p.1918, 1962) биринчи марта “квази-синхронизм” усулининг назарий жихатдан мавжудлигини эълон қилишди. Бу усул анча йиллар фақат қоғозда қолиб кетган эди. Бунга сабаб бундай оптик нурларнинг таъсирлашуви имкониятини берувчи мухитларни яратиш технологияларини йўқлиги сабаб бўлган. Бироқ 20 аср охирларида ҳар хил физик хусусиятларга эга бўла оладиган кристалларнинг технологияларини ривожланиши айнан шу таъсирни берувчи кристаллар лаборатория шароитида яратила бошлади ва бу кристаллар ночизикли фотон кристаллар (мунтазам домен структурали кристаллар) деб атала бошлади. Шундан сўнг ночизикли фотон кристалларга қизиқиш яна орта

бошлади ва бугунги кунда бундай ночизикли мухитларни яратиш технологиялари анча илгарилаб кетган (масалан (Hum D. S., Fejer M. M. Quasi-phasematching //Comptes Rendus Physique. ) га қаранг).

Ночизикли фотон кристалларида амалга ошириладиган иккинчи гармоника генерацияси самаралорлиги муҳим катталиклар синфига киради. Бунга эришиш учун охириги йилларда бир нечта тажрибаларда яхши натижаларга эришилган. Масалан Liu H., ҳаммуаллифлари билан ((2020). Optik, 208, 164537) унинг самарадорликни ~20 % етказа олишган. Шу билан бирга Fujioka N., ва бошқалар ~50% етказа олишган. Бироқ улар ишлатган асосий импульс вақтий давомийлиги 40 фс- 100 фс атрофларида бўлган ва колленияр бўлмаган таъсирдан фойдаланишган. Zheng Z. ва бошқалар янада юқорироқ иккинчи гармоника генерацияси учун 60% самарадорликка эришишган. Бунда улар даврий кутибланган литий ниобатдан фойдаланишган. Бироқ бу охириги ишдаям асосий импульс вақтий давомийлиги 200 фс атрофларида бўлган ва ночизикли фотон кристалл даврийлигини ўзгарган ҳолатлари ўрганилмаган.

Шуни ҳам таъкидлаш жоизки, бу йўналишда ўзбек олимлари Т.Б. Усмонов, И.А. Кулагин ва Д.Б. Юсупов лар ночизикли оптик кристалларда мунтазам ва мунтазам бўлмаган доменли тузилишга эга кристалларда иккинчи гармоника генерациясини олишда юқори натижаларга эришишган. Улар асосан нано-, пико- ва суб-пикосекундли лазер импульслари ёрдамида иккинчи гармоника генерацияси ҳосил қилиш жараёнини кўриб чиққанлар. Бундан ташқари У.К. Сапаев томонидан тўлқинларнинг ўзаро таъсирида паст энергия алмашинуви ёки асосий нурланиш энергиясини тўлиқ алмаштириш қилишда маълум амплитуда ва фаза хусусиятларига эга фемтосекунд давомийликли импульсларидан ва мунтазам бўлмаган домен тузилишга эга ночизикли фотон кристалларидан фойдаланган ҳолда иккинчи гармоника генерациясини олишда яхши натижаларга эришган.

Ушбу мақолаларда келтирилган натижалардан тахминан эллик ёки ундан кўп фемтосекунд давомийликдаги импульслар ёрдамида олинганлигини кўриш қийин эмас. Аммо hozirgi вақтда диққат марказида ўта қисқа тахминан 10 фс импульслар турибди. Ушбу диссертация ўтақисқа юқори қувватли лазер импульслари ва бир ҳил ёки бир ҳил бўлмаган домен тузилмалари ёрдамида ночизикли фотон кристалларида иккинчи гармоникани яратиш бўйича тадқиқотларни тақдим этади.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетининг қуйидаги ОТ-Ф2-45 "Структураланган ёруғлик майдонининг нанообъектлар билан ўзаро таъсири" (2017–2020); Ҳалқора лойиҳа Uzb-Ind-2021-96 “Кўп рангли ўтақисқа импульслар манбайи сифатида фемтосекундли лазер импульсларининг ночизикли фотон кристаллари билан ўзаро параметрик таъсирлашуви”. (2021–2023). лойиҳалари доирасида амалга оширилди.

**Тадқиқотнинг мақсади** ночизиқли фотон кристалларида фойдаланганда ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоника генерацияси ҳосил бўлиш самарадорлигини оширишга тўсқинлик қилувчи асосий чекловчи омилларни аниқлаш ва ушбу частота алмашинуви жараёнининг самарадорлигини оширишнинг янги усуллари яратиш.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ночизиқли фотон кристалларида ультрақисқа (фемтосекунд) лазер импульсларининг иккинчи гармоника генерацияси ҳосил қилишда муҳитнинг учинчи тартибли ночизиқли киритувчанлиги ва дисперсияси таъсирини ўрганишнинг сонли ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқиш.

ночизиқли фотон кристаллари домен узунликлари ўзгаришининг иккинчи гармоника генерацияси эффефективлигини оширишда тутадиған ролини ўрганиш.

ночизиқли фотон кристалларда иккинчи гармоника импульси ҳосил бўлиши динамикасида фазали модуляцияланган импульсининг чирплаш чуқурлиги ролини ўрганиш.

мунтазам ва тартибсиз домен тузилмаларига эга бўлган ночизиқли фотон кристалларда фемтосекундли лазер импульслари частотаси икки барабар самарали оширишни янги схемаларини таклиф қилиш.

**Тадқиқотнинг объекти** - ночизиқли фотон кристаллар: литий ниобат ( $\text{LiNbO}_3$ ) ва 5 % ли магний оксидли литий ниобат олинди ( $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ).

**Тадқиқотнинг предмети** Стационар бўлмаган иккинчи гармоника генерациясидаги ўз ўзига таъсирлашув ва дисперсия жараёнлари.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация ишида стационар бўлмаган ва ўз-ўзига таъсир қилиш ҳолатларида шунинг билан бирга домен ўлчамлари бир хил бўлмаган ҳолатларда ночизиқли фотон кристалларда иккинчи гармоникани ҳосил қилиш учун қисқартирилган тўлқин тенгламаларни ечиш учун сонли қўлланилади.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидаги натижалардан иборат:

ночизиқли фотон кристалларида иккинчи гармоника олишда давомийлиги 5 фс ли импульсдан фойдаланганда муҳитда ҳосил бўладиган иккинчи гармоника импульси муҳит дисперсияси таъсирида ўзининг Гаусс "силлиқлигини" йўқотиши ва бир неча қисмларга бўлиниб кетиши аниқланди.

юқори интензивликли ўта қисқа лазер импульсларининг НФК да иккинчи гармоника ҳосил қилиш жараёнида доменларнинг оптимал узунлиги қуйидаги  $\pi/|\Delta k|$  ҳисоблашдан фарқ қилиши аниқланди. Бу муҳитда учинчи тартибли ночизиқли киритувчанликнинг пайдо бўлиши ва муҳит дисперсияси таъсири туфайли юзага келиши аниқланди

мунтазам доменли тузилишга эга кристалларда иккинчи гармоника ҳосил бўлиш жараёнига муҳитнинг учинчи тартибли ночизиқлийлиги ва муҳит дисперсияси таъсири ошиши билан лазер нурланиш тўлқин узунлигининг  $\pi/\Delta k$  ҳисоблашда ишлатилган қийматидан кичик бўлганда юқори самарадорликка эришиш мумкинлиги аниқланди;

ушбу 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> мунтазам домен структурали кристалларида ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини ҳосил қилиш самарадорлигини белгиловчи асосий омил муҳитнинг дисперсияси эканлиги аниқланди;

ночизиқли фотон кристалларида ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини ҳосил қилишда иккинчи тартибли гурушпавий тезлиги дисперсиясини ҳисобга олиш иккинчи гармоника импульсининг дум қисми модуляциясига олиб келиши кўрсатилган. Бироқ бу таъсир асосий гармоникага таъсир қилмайди.

ночизиқли фотон кристалларида спектрал чегараланган импульсларнинг иккинчи гармоникасини ҳосил қилишда, чирпланмаганларга нисбатан паст энергия самарадорлигига эга бўлса ҳам юқори контрастли гауссимон иккинчи гармоника импульсини ҳосил қилиш мумкинлиги кўрсатилди.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари.** Стационар бўлмаган ва ўз-ўзига таъсир қилиш шароитида иккинчи гармоника генерацияси ҳосил қилиш жараёнини тавсифлаш учун ишлаб чиқилган сонли усуллар бошқа частота алмаштириш жараёнларини амалга оширишда қўлланилиши мумкин. Мунтазам ва мунтазам бўлмаган домен структурага эга бўлган ночизиқли фотон кристаллардан шунингдек, чирпланган лазер импульсларидан фойдаланишга асосланган частота алмаштиришда тавсия этилган усул ёрдамида юқори самарадорликка эришиш имконини беради.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** ўзаро таъсирлашувчи тўлқинлар энергиясининг сақланиш қонуни бажарилиши (чунки диссертация ишида муҳитдаги нурланиш ютилиши ҳисобга олинмайди) ва ўзаро таъсирнинг квазистатик узунлиги сақланиши билан текширилган. Қабул қилинган хулосаларнинг ишончлилиги лазер нурланишининг фемтосекунд давомийликка мос соҳасида ишлаган бошқа муаллифларнинг натижаларига мос келишига асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Диссертация ишида олинган натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, унда ночизиқли фотон кристаллар домен узунликларини қисман ўзгартириш билан юқори интенсивлик ва қисқа лазер импульслари ишлатилишда пайдо бўладиган юқори тартибли ночизиқлийликлар ва муҳит дисперсиясининг таъсирларини етарлича камайтира олиш имконияти борлигини тушунтира бера олади.

Ушбу тадқиқот иши натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, бунда олинган натижалар юқори самарадорли режимда ишлатиш мумкин бўлган ночизиқли фотон кристалларни ишлаб чиқаришда қўлланилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг амалиётда жорий қилиниши.** Ушбу “Ночиқли фотон кристалларида ўз - ўзига таъсир ва ностационар шартларда иккинчи гармоника генерацияси” мавзудаги диссертация ЁТ-Фтех-2018-161 (2018-2019 – йилларда ТДТУ да И Таджикибаев томонидан бажарилган илмий лойихадан 16.09.2022 йилда олинган 01/9-14-3072 – сонли маълумотномаси)

лойихасини бажаришда қўйилган масалаларга мос келиши билан катта қизиқиш уйғотди ва ушбу лойихада қуйидаги масалаларни ҳал қилишда фойдаланилди.

ночизиқли фотон кристалларидан фойдаланган ҳолда 1.05 мкм дан 0.525 мкм га юқори эффективлик билан частота алмаштиришни амалга ошириш учун

юқори интенсивликдаги ультрақисқа лазер импульсларидан фойдаланганда фотон кристаллари даврини аниқлаш учун.

икки ўзакли оптик толада  $\Delta n = 0.532$  мкм тўлқин тушурилган ва узунлиги 31 ва 38 мм бўлган боғловчидан ўтгандан кейин олинган кенг полосали ёруғлик спектрининг тажрибада олинган натижалари ва назарий (сонли ҳисоб-китоблар) олинган натижалар билан таққослаш учун.

инфрақизил нурланиш (1,05 мкм) билан дамланганда толали генератор ва тола филтридан иборат икки ўзакли толага асосланган оптик толали қурилмада 0.7-1.7 мкм соҳада бошқариладиган кенг спектрли ўта қисқа нурланиш бўйича олинган тажриба натижаларини ушбу диссертация ишидаги сонли ҳисоблаш усулида олинган натижалар билан солиштириш учун.

Шунинг билан бирга интенсив ўта қисқа лазер импульслари ёрдамида фотон кристаллари даврини аниқлашга доир диссертация тадқиқоти натижалари 3D Digital Silk Road (№ PPI/APM/2019/1/00004) (2019-2021 – йилларда ЎЗМУ да Д Мухамедова томонидан бажарилган илмий лойихадан 16.11.2022 йилда олинган 01/11-7176 – сонли маълумотномаси) ҳалқаро лойиҳани амалга оширишда ҳам фойдаланилган бўлиб бунда турли объектларни фаол рақамли сканерлаш учун инфрақизилдан кўринадиган диапазонга қадар катта эффективлик билан частотаси алмаштирилган лазер нурланишидан фойдаланилиши кераклиги аниқланган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқотларнинг асосий натижалари 7 та илмий-амалий конференцияларда, шу жумладан 2 та халқаро ва 5 та республика миқёсидаги илмий- амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича олинган илмий натижалар 13 та илмий ишларда баён қилинган бўлиб, улардан 6 таси илмий мақола, шу жумладан 4 та чет эл ва 2 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертациясининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларида нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертацияга кириш, тўрт боб, хулоса ва адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 107 бет, 23 та расм ва 94 та адабиётлар рўйхатидан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг **кириш** қисмида мавзунинг долзарблиги ва амалий аҳамиятга эга эканлиги, тадқиқотларнинг республикада фан ва техника тараққиётининг устувор йўналишлари билан алоқаси аниқланган, муаммонинг

ўрганилганлик даражаси очиб берилган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, объектлар аниқланган, мавзулар ва тадқиқот усуллари, тадқиқотнинг илмий янгиликлари баён қилинган, ишни бажариш натижалари ва апробацияси, шунингдек, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумот берилган.

Диссертациянинг биринчи боби **“Муаммонинг ҳозирги кундаги ҳолати: квазисинхрон ночизикли оптика”** деб номланиб бунда адабиётлар таҳлили, ночизикли оптиканинг асосий қонуниятларини қисқача кўриб чиқишга ва қисқартирилган ночизикли тўлқин тенгламаларини келтириб чиқаришга бағишланган. Адабиётлар таҳлиliga келсак, диссертация мавзусига оид илмий мақолаларни кўриб чиқилган. Кўриб чиқилган мақолалар асосида ночизикли оптика тарихи, лазерларнинг ривожланиши, ночизикли фотон кристаллар (НФК), фемтосекундли лазерларни ишлаб чиқариш техникаси ва мақолаларнинг диссертация иши билан боғлиқ жиҳатлари батафсил ёритилган.

Биринчи бобнинг охирида ночизикли фотон кристалларда тўлқинларнинг иккинчи гармоника генерациясини ҳосил қилишнинг бугунги кундаги ҳолатини кўриб чиқиш асосида диссертация ишининг муаммолари шакллантирилган.

Диссертациянинг иккинчи боби **"Ночизикли фотон кристалларда иккинчи гармоника генерациясини ностационар ҳолатда ҳосил қилиш назариясида тақрибий ҳисоблаш моделларининг ўзига хослиги"** деб номланган бўлиб ушбу боб ночизикли фотон кристалларида ночизикли оптик тўлқинларнинг тарқалиши ва ўзаро таъсири назариясида амплитуданинг секин ўзгариши яқинлашуви усулини қўлланилишини ўрганишга бағишланган. Бу бобда Максвелл тенгламасининг бир йўналишли яқинлашуви ёрдамида Максвелл тенгламаларида амплитуданинг секин ўзгариши усуллари ёрдамида иккинчи гармоника генерацияси ҳосил қилиш жараёнини таҳлил қилиш имкониятлари кўриб чиқилади.

Ночизикли фотон кристалларида частотанинг иккиланиш жараёнини сонли ўрганиш учун Максвелл тенгламасини бир томонлама яқинлашуви техникаси ва алгоритми батафсил тавсифланган. Тенгламаларни вақт бўйича хусусий ҳосилалари бўлган ҳолатда ечишни талаб қилувчи ночизикли оптика масалаларини ечишда кенг қўлланиладиган “split-step” усулининг ўзига хос хусусиятлари ҳам кўриб чиқилади. Тўлқинларнинг тарқалиши ва ўзаро таъсири йўналиши бўйича фотон кристалларнинг ночизикли оптик параметрларининг тез ўзгаришини ҳисобга олиш учун диссертациядаги сонли ҳисоблашларга махсус ёндашувлар қўлланилди.

Иккинчи тартибли чизикли бўлмаган кутбланишни ҳисобга олган ҳолда тўлқин тенгламасининг бир томонлама яқинлашуви усулини кўриб чиқилган. Бунда спектрал соҳадаги ва скаляр шаклдаги тенгламани қуйидаги шаклда ёзиш мумкин:

$$\frac{dE(\omega, z)}{dz} = ik(\omega)E(\omega z) + \frac{i\omega^2}{2\varepsilon_0 c^2 k(\omega)} P_{nl}(\omega, z) \quad (2.1)$$

бу ерда  $P_{\text{нл}}(\omega, z) = \chi^{(2)} E^2(t, z)$ . Агар майдонни куйидаги кўринишда олсак,  $E(\omega, z) = A(\omega, z) \exp(ik(\omega)z)$ , у ҳолда амплитудага боғлиқ бўлган ва бир йўналишли импульс тарқалиш тенгламаси билан ишланувчи содда тенглама олинади.

Иккинчи гармоника генерацияси жараёни амплитуданинг секин ўзгариши яқинлашувида ҳаракатланувчи координаталар системасида дисперсиянинг учинчи тартибигача бўлган аниқликда ҳисобга олган ҳолда, хусусий ҳосилалари куйидаги дифференциал тенгламалар системасига келинган:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} - i \frac{g_1}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{h_1}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} &= -i \gamma_1 \sigma(z) A_1^* A_2 e^{-i \Delta k z} \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + v \frac{\partial A_2}{\partial t} - i \frac{g_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{h_2}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} &= -i \gamma_2 \sigma(z) A_1^2 A_2 e^{i \Delta k z} \end{aligned} \quad (2.2)$$

бу ерда,  $A_1$  ва  $A_2$  асосий ва иккинчи гармоника импульсларининг комплекс амплитудалари.

Тақрибий ҳисоблаш усулларнинг қиёсий таҳлили натижаларини тақдим этишдан олдин шуни таъкидлаш керакки, иккала тақрибий усул ҳам 10 фс гача амалда бир хил натижаларни берди, бу биз кутган натижадир. Таққослаш учун биз иккинчи гармоника генерацияси самарадорлигини ва даврий кристаллнинг чиқишида иккинчи гармоника интенсивлигининг вақт режимини танладик.

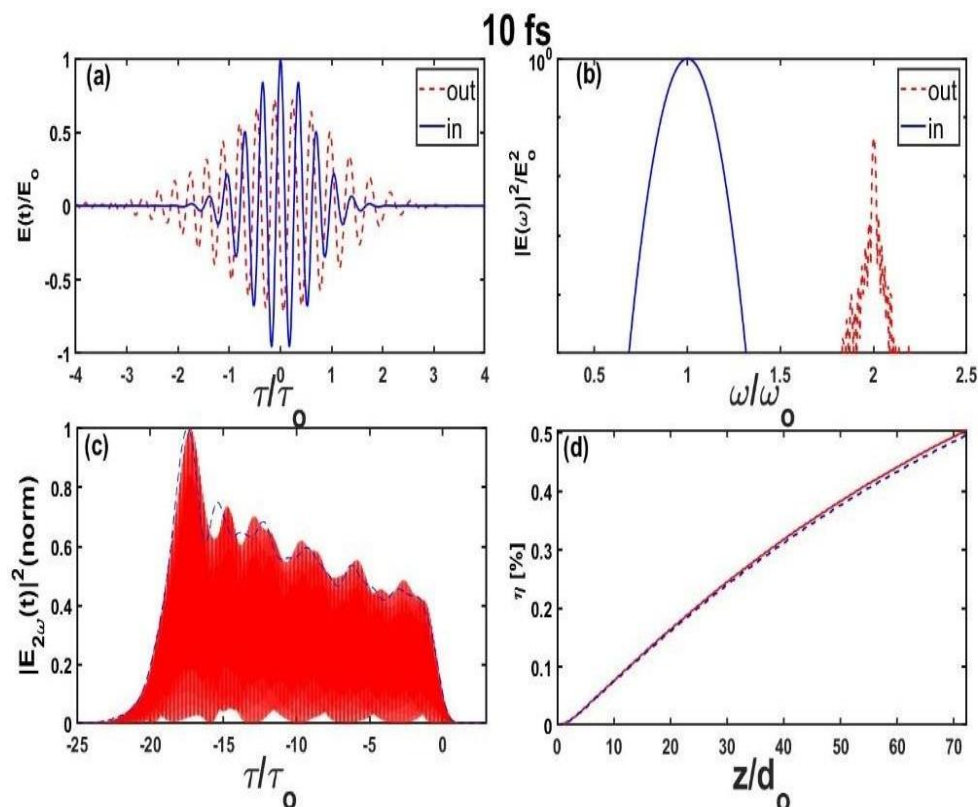
Бир томонлама яқинлашиш бўйича иккинчи гармоника амплитудасининг вақтий профили тескари Фуре алмаштириши ёрдамида нормаллаштирилган частотанинг  $1.5\omega_0$  гача  $2.5\omega_0$  гача бўлган оралик спектридан олинган.

Учинчи боб "**Мунтазам домен тузилишга эга кристалларда интенсив ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоника генерацияси**" деб номланиб мунтазам доменли тузилишга эга кристалларда ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини олишга бағишланган. Кириш қисмида таъкидланганидек, мунтазам домен структурали кристаллар лазер частотасини ўзгартириш жараёнининг ҳар хил турларини амалга ошириш учун кенг қўлланилади. Охирги тадқиқотлар шуни кўрсатдики, амалда даврий домен структурага эга бўлган кристаллар хусусан, иккинчи тартибли киритувчанликли кристаллардан фойдаланиш имконияти туфайли иккинчи гармоника генерацияси юқори энергия самарадорлигини таъминлаши мумкин. Бу хусусият уларнинг амалиётда кенг қўлланилишига олиб келди. Ушбу бобда юқори интенсивликли ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоника генерациясини икки методда олиш ва самарадорликни янада оширишда мунтазам домен структурали кристалларни қўллаш ва муҳокама қилинади.

Амплитуданинг секин ўзгариши методи натижаларини солиштириш учун Максвелл тенгламаларининг бир йўналишли яқинлашуви деб аталадиган модел танланди. Худди шу экспериментал шароитда ушбу яқинлаштириш натижалари таққосланди. Қиёсий таҳлил шуни кўрсатадики, асосий импульс давомийлигининг 10 фс гача бўлган қийматида иккала тақрибий ҳисоблаш усули ҳам частота алмаштириш жараёнини деярли бир хил тарзда

тавсифлайди, ammo 10 фс дан паст давомийликда натижаларда номувофиклик юзага келди. Таққослаш асосан иккинчи гармоника импульсининг вақт профилини шакллантириш ва унинг самарадорлиги бўйича амалга оширилди.

Иккинчи гармоника импульсининг вақтий профилини бир йўналишли яқинлашиш ёрдамида ҳам тақдим этилган, бунда бошланғич шарт сифатида майдон тўлиқ спектрал кўринишда олинган ва ҳисоблашларда вақтий кўринишга ўтказиб натижалар олинган. Амплитуданинг секин ўзгариши усулидан фойдаланганда, дисперсия таъсири учинчи тартибга қадар аниқликда ҳисобга олинган.



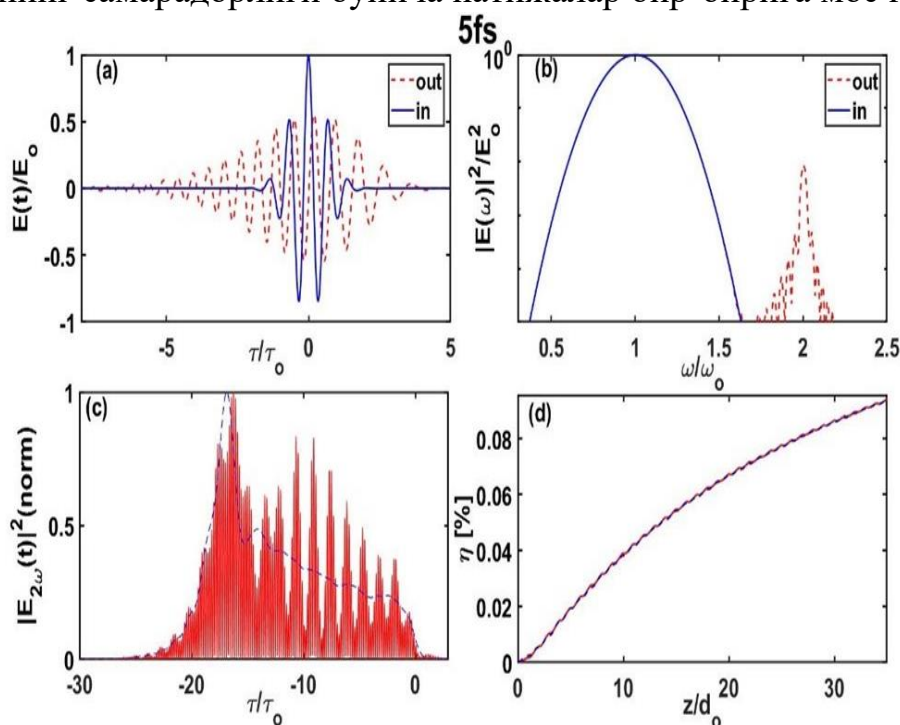
1 – расм. Давомийлиги 10 фс бўлган фундаментал импульс учун сонли ҳисоблаш натижалари: (а) кристаллга киришдаги (узлуксиз эгри чизик) ва чиқишдаги (узлукли эгри чизик) майдоннинг вақтий профили; (б) майдон спектрининг киришдаги (узлуксиз эгри чизик) ва чиқишдаги (узлукли эгри чизик); (с) - даврий кристалл чиқишида иккинчи гармоника интенсивлигининг вақтий профилларининг қиёсий таҳлил натижалари. Бу

ерда узлукли эгри чизик амплитуданинг секин ўзгариши модели натижасидир ва йўналган импульс тарқалиш тенгламаси методи (узлуксиз эгри чизик); (д) иккинчи гармоника эффективлигининг доменлар сонига боғлиқлиги. Бу ерда қаттиқ эгри чизик секин ўзгарувчан амплитудаларнинг яқинлашиши натижасини, нуқтали эгри чизик тўлқин тенгламасининг бир томонлама яқинлашиш натижасини кўрсатади. Бу ерда узлукли эгри чизик амплитуданинг секин ўзгариши модели натижасидир ва узлуксиз эгри чизик йўналган импульс тарқалиш тенгламаси усули.

1-расмда 10 фс ҳолат учун сонли ҳисоблаш натижалари кўрсатилган, бу ерда тахминан 70 домен узунликдаги фотон кристаллидан ўтиш пайтида иккинчи гармониканинг динамикаси ўрганилган: (а) киришдаги майдоннинг вақтий профили. (узлуксиз чизиқ) чиқишдаги (узлуксиз) ва (б) нурланишнинг спектрал кўриниши киришдаги (узлуксиз чизиқ) кристаллдан чиқишдаги (узлукли чизиқ); (с) Иккинчи гармониканинг кристаллдан чиқишида икки ҳолат учун интенсивлигининг вақтга боғлиқлиги кўрсатилган, (д) иккинчи гармоника ҳосил бўлиши самарадорлигининг доменлар сонига боғлиқлиги. Бу ерда узлуксиз эгри чизиқ амплитуданинг секин ўзгариши натижасини, узлукли эгри чизиқ тўлқин тенгламанинг бир томонлама йўналган тарқалиш тенгламаси натижасини кўрсатади. Ушбу расмда деярли иккала тақрибий ҳисоблаш модели ҳам бир хил натижаларни берди.

Аммо иккинчи гармоника интенсивлигининг вақтий режимини таққослашда бир оз фарқ кузатилади ((с) қисм қаранг). Гарчи бу ерда икки хил сонли ҳисоблаш ёрдамида иккинчи гармоника профилларининг бир-биридан кичик оғиши мавжуд бўлса-да, лекин иккинчи гармоник генерацияси самарадорлигини солиштирганда, деярли бир хил натижа берганини кўришимиз мумкин ((д) қисмга қаранг).

Лазер импульси давомийлиги 5 фс бўлган ҳолати учун икки тақрибий ҳисоблаш усулнинг қиёсий натижалари 2-расмда кўрсатилган. Бу ерда эгри чизиқлар ва расмлар тартиби 1-расмдаги каби аниқланади. Ушбу расмда (с) қисмда кўрсатилган иккинчи гармоника интенсивлигининг вақтий режимини таққослашда натижаларнинг сезиларли оғиши кузатилди. Бир томонлама йўналган тарқалиш тенгламаси моделдан фойдаланган ҳолда ҳисоблаб топилган иккинчи гармоника импульси бир неча қисмларга бўлинади, лекин амплитуданинг секин ўзгариши методи билан олинган иккинчи гармоникада бундай бўлинишлар йўқ. Шунга қарамай иккала ҳисоблашда ҳам иккинчи гармониканинг самарадорлиги бўйича натижалар бир-бирига мос келади.



2 – расм. Лазер импульси давомийлиги 5 фс ҳолат учун тақрибий ҳисоблаш усуллари натижалари. Расм шакллари ва эгри чизикларнинг тартиби 1-расмдаги каби аниқланади

Лазер импульсининг давомийликлари  $\sim 5$  фс ва  $\sim 10$  фс ҳолатлари учун натижаларни солиштирганда, агар амплитуданинг секин ўзгариши методиди дисперсияни учинчи тартибли аниқликда ҳисобга олсак-да икки ҳисоблаш методлари берадиган натижалар бир – биридан арзимас даражада кичик фарк қилиши сезилади.

Бундан келиб чиқадики ҳисоб-китобларда иккала яқинлашишдан ҳам фойдаланиш мумкин. Аммо шуни таъкидлаш керакки, бу ерда биз квадратик кутбланишнинг  $\chi^{(2)}$  ночизикли фиксирланган қийматидан фойдаландик. Бироқ бу параметр тушаётган тўлқиннинг частотасига боғлиқ ўзгариши мумкин. Бунда кристаллга тушаётган импульс етарлича кенг спектрга эга бўлса, у ҳолда  $\chi^{(2)}$  нинг  $\omega$  га ( $\chi^{(2)}(\omega)$ ) боғлиқлигини ҳисобга олиш керак. Айнан шу ҳолатда амплитуданинг секин ўзгариши усулини эмас, балки бир томонлама яқинлашишни муваффақиятли қўллаш мумкин.

Сонли ҳисоблаш қуйидаги бошланғич шартлар асосида амалга оширилди: нурланиш интенсивлиги ва тўлқин узунлиги  $I = 2 \cdot 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\lambda = 1560$  нм, импульс давомийлиги  $\tau = 10$  фс,  $d_{13} \approx 3.4$  пм/В,  $\chi_{1111} \approx 2.94 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $\chi_{1212} = \chi_{2121} \approx 7 \cdot 10^{-22}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $\chi_{2222} \approx 5.32 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>. Кристалл синдириш кўрсаткичини ҳисоблашда температура  $T \approx 19.45^\circ$  га тенг деб олинди

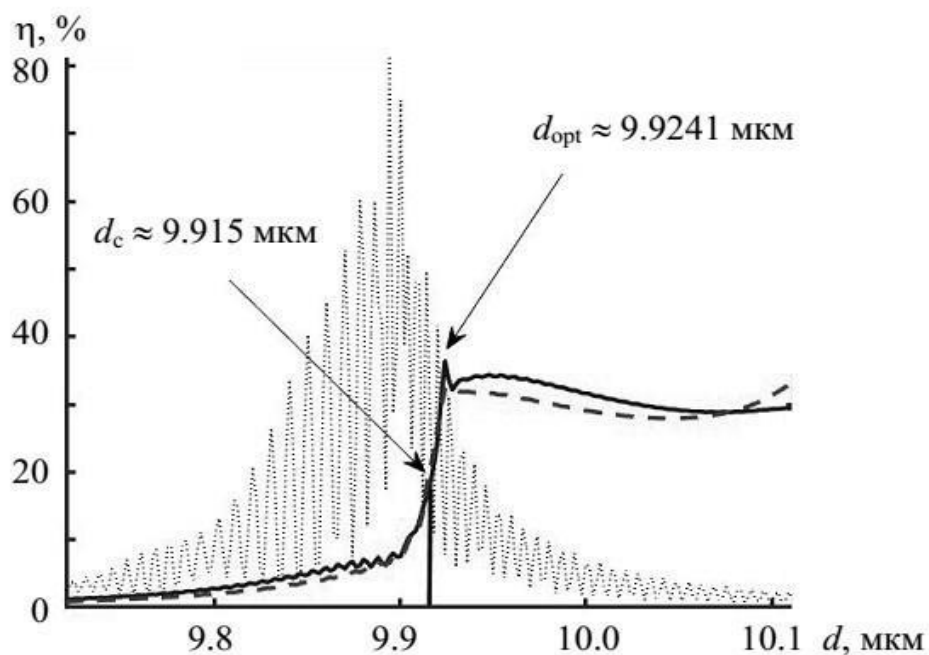
Танланган интенсивлик қийматида Керр эффекти таъсири намоён бўлади ва бу частотанинг иккиланиш жараёни самарадорлигини пасайишига олиб келади, буни 3 - расмдан кўриш мумкин. Бу графикда иккинчи гармоника ҳосил бўлиши самарадорлигининг  $z \approx 3$  см узунликдаги кристаллнинг даврий домен структурага боғлиқлиги кўрсатилган.

Максимал самарадорлик  $d_c = \pi|\Delta k| \approx 9.915$  мкм формула бўйича ҳисобланган домен узунлигининг аниқ қийматида кузатилмади балки оптимал қиймат  $d_{opt} \approx 9.9241$  мкм да кузатилди. Гарчи бу ўзгариш 0,092% бўлсада, амалда самарадорликни деярли икки баравар ошириш имконини берди.

Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, бунда учинчи тартибли киритувчанлик, муҳит дисперсияси ва тўлқин сонининг ночизикли кристалларда "ортиқча" фаза силжишларининг қиймати доменлар ўлчамининг бироз ўсиши билан ўзаро компенсацияси туфайли самарадорликнинг ошиши кузатилди.

Сабаби шундаки биринчидан, ўз-ўзига муҳитнинг таъсири синдириш кўрсаткичининг ўзгаришига олиб келади ва бу квазисихронизмнинг оптимал шартларини бузади. Иккинчидан, ўзаро таъсир қилувчи импульсларнинг Фурье компонентларининг фақат фазасига таъсир қилувчи муҳитнинг дисперсияси шунингдек импульслар муҳитда тарқалаётганда оптимал фаза шароитларини бузади. Агар ҳисоб-китобларда у ёки бу таъсир ҳисобга олинмаса, бу омилларнинг ҳиссасини ажратиш осон.

Ушбу бобда даврий кристалл доменларнинг белгиланган ўлчамлари учун тушаётган нурланиш тўлқин узунлигининг частотанинг иккиланиш жараёни самарадорлигига таъсири ўрганилди.



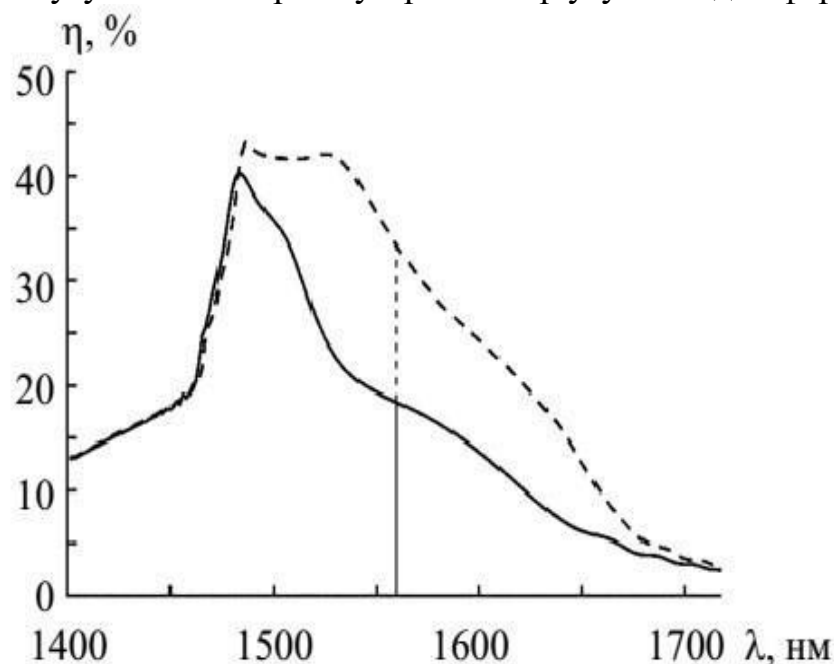
3 – расм. Иккинчи гармоника ҳосил бўлиши самарадорлигининг 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> кристалл домени узунлигига боғлиқлиги;  $\lambda = 1560$  нм; узлуксиз чизик чекловчи омилларни ҳисобга олган ҳолда олинган натижаларга мос келади; узлукли чизик - фақат муҳитнинг тарқалиш шартларини ҳисобга олган ҳолда; нуқтали чизик - фақат учинчи тартибли ночизикликни ҳисобга олган ҳолда

4 - расмда келтирилган ўлчами  $z \approx 3$  см бўлган кристалл учун ҳисоб-китоблар натижаларидан кўриниб турибдики, максимал самарадорлик 1560 нм да эмас, балки  $\lambda \approx 1480$  нм да кузатилди. Бу ерда узлуксиз эгри чизик домен узунлиги  $d_c$ , бўлган дамлаш импульси иккинчи гармоника генерацияси самарадорлигининг тўлқин узунликка боғлиқлиги ва узлукли эгри чизик  $d_{opt}$  ҳолат учун келтирилган.

Натижалар шуни кўрсатдики учинчи тартибли ночизиклилик ва муҳит дисперсияси мунтазам домен структурали кристаллда иккинчи гармоника ҳосил бўлиш жараёнига таъсирининг ошиши билан доменлар узунлигини ёки кристаллга тушувчи тўлқин узунлигига тузатиш киритиш керак бўлади. Ҳозирги кунда лаборатория шароитида  $\pi/\Delta k$  ифодасидан ҳисобланган даврий кристаллар аллақачон мавжуд.

Хулоса қилиб шуни таъкидлаймизки, дисперсиянинг учинчи тартибли ҳадлари ва Керр ночизиклиги таъсирини ҳисобга олган ҳолда 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> мунтазам доменли тузилишга эга кристалларда интенсив ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини ҳосил қилишни ўрганиш учун сонли тажрибалар қўлланилган.

Шундай қилиб ушбу бобда группавий тезликнинг квазисинхронизм ва синхронизм шартлари бир вақтнинг ўзида бажарилган ҳолат кўриб чиқилди. Частота алмаштириш жараёни самарадорлигини сезиларли даражада оширишни таъминлайдиган сонли ҳисоблашлар ёрдамида аниқланган оптимал домен узунлиги когерент ўзаро таъсир узунлигидан фарқ қилди.



4 – расм. Частота иккиланиши самарадорлигининг кристалл узунлиги ва домен узунлигининг доимий қийматларида кристаллга тушувчи лазер импульслари тўлқин узунлигига боғлиқлиги, бунда узлуксиз эгри чизик  $d_c$ , ва узлукли эгри чизик оптимал домен  $d_{opt}$  узунлигига мос келади.

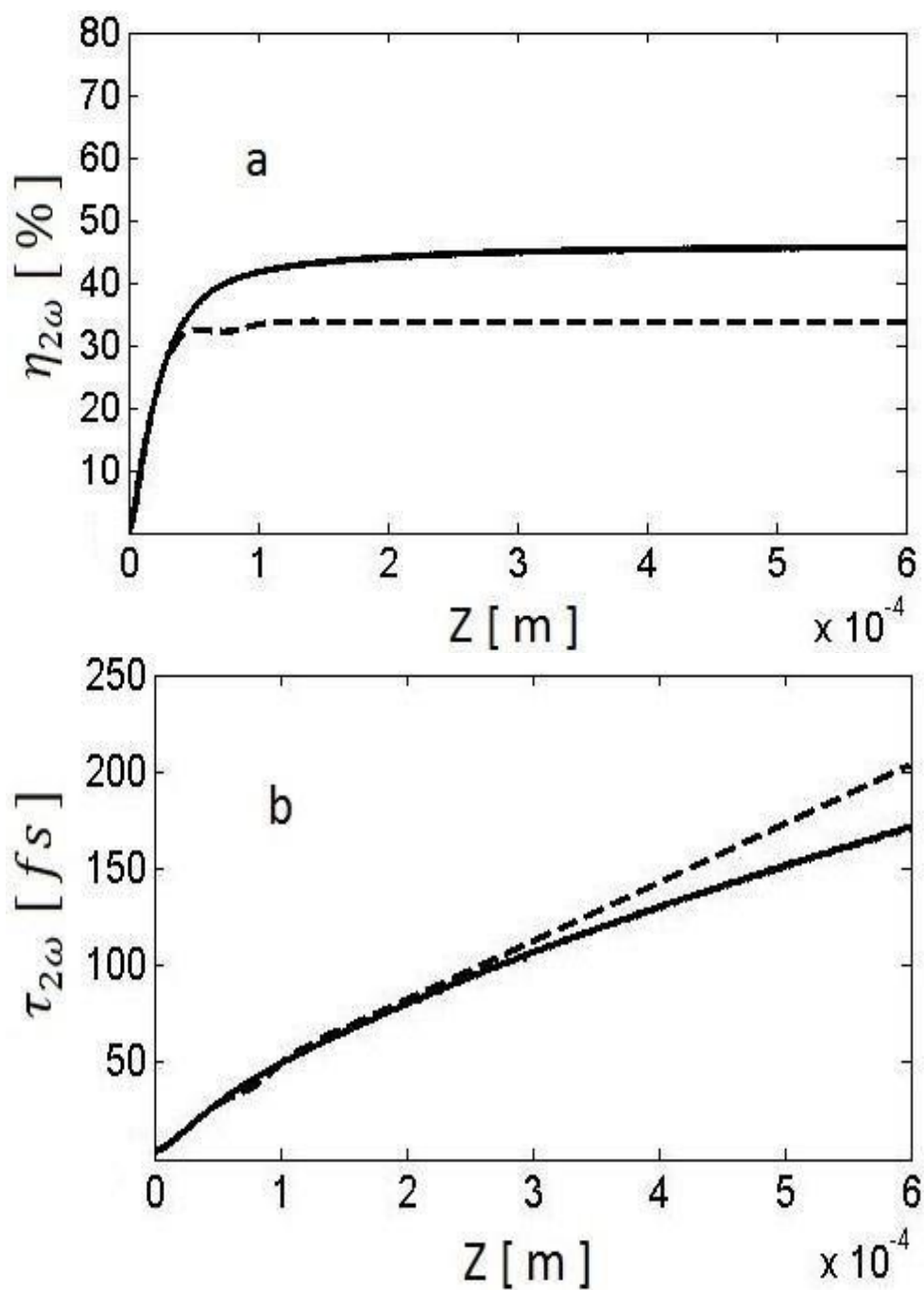
Бунинг сабаби шундаки, домен узунлиги квазисинхронизмга мос келадиган шартларнинг бажарилишини таъминлайдиган қийматдан кичик оғиши учинчи тартибли ночизиклилик ва муҳит дисперсияси таъсирдан келиб чиққан фаза силжишларини компенсациялаш имконини беради.

Юқорида келтирилган натижалар частота алмаштиришнинг бошқа жараёнларини, хусусан даврий кутбланган кристалларда интенсив ўта қисқа лазер импульсларидан ёруғликнинг параметрик кучайтирилишини таҳлил қилиш учун ҳам қўлланилиши мумкин.

Тўртинчи боб “**Мунтазам домен структурага эга бўлмаган кристалларда юқори интенсивликли лазер импульслари частота иккиланиши хусусиятлари**” деб номланиб ушбу бобда ночизикли фотоник кристалларда фемтосекундли лазер импульсларининг ( $\sim 5$  фс гача) частота иккиланиши сонли ҳисоблашлар ёрдамида ўрганилган. Бир қатор омилларнинг (бирламчи нурланиш импульсининг фазали модуляцияси ва ночизикли киритувчанликнинг фазавий модуляцияси, дисперсия ҳадларининг учунчи тартиблигача бўлган ҳадлари) ночизикли частота алмаштириш самарадорлиги ва иккинчи гармоника импульси давомийлигига таъсири ўрганилган. Ўта қисқа ( $\sim 5$  фс гача) лазер импульсларидан фойдаланганда

иккинчи гармоник ҳосил бўлиши самарадорлиги  $\eta_{2\omega} \sim 45\%$  гача етиши мумкинлиги кўрсатилган.

5 – (а) расмдан кўриниб турибдики бошланғич 50 мкм масофада (бу ҳолатда НФК да домен узунлиги  $\sim 6.5$  мкм) иккинчи гармоника генерацияси самарадорлиги икки ҳолатда ҳам ортмоқда ва бу масофадан сўнг тўйинишга эришмоқда. Бу ерда чирпланган НФК да иккинчи гармоника генерацияси самарадорлиги чирпланмаган НФК лига қараганда 10% га кичик бўлиши аниқланди.



5 – расм. Иккинчи гармоника генерацияси самарадорлиги (а) ва иккинчи гармоника генерация импульси давомийлигининг (б) таъсирлашиш

узунлигига боғлиқлиги. Узликсиз чизик чирпланмаган НФК га ва узлукли чизик чирланган НФК га мос келади.

Бу ҳолат бир томондан асосий гармоника ва иккинчи гармоника импульслари 50 мкм масофани босиб ўтгач бир – бирдан ажралишини, шунинг учун ўзаро таъсирлашмаслигини тушунтиради, бошқа томондан еса импульслар ўзлари мустақил тарқалишини англатади. Бошқача айтганда оптимал квази синхронизм шартлари асосий гармоника ва иккинчи гармоника тўлқин узунликларида бажарилмайди.

5 – (b) расмдан маълумки иккинчи гармоника импульси давомийлиги деярли чизикли конуният бўйича ортмоқда. Икки ҳолатда ҳам импульс давомийлиги 300 мкм масофагача бир хил ортмоқда ва бу масофадан кейин давомилик ортиш тезлиги турлича бўлмоқда яъни чирпланган НФК ларида импульс давомийлиги тезроқ ортмоқда.

Частота бўйича модуляция  $\delta\omega$  группавий тезликлар дисперсиясига боғлиқ ва у  $\beta$  билан белгиланади. Нормал дисперсия юз берадиган спектр оралиғида  $\beta > 0$  ва частота фарқи  $\delta\omega$  манфий қийматни олади. Агар импульснинг орқа томондаги олдинги қирраси пасайса модуляция коэффиценти  $\gamma < 0$  бўлади. Бизнинг ҳолатда, 50 фс давомийликли фазаги модуляцияланган асосий нурланиш иккинчи гармоникаси генерацияси импульс давомийлиги ҳам монотон равишда ортади.

Шундай қилиб, ушбу бобда биз фазавий модуляцияланган ва модуляцияланмаган 5 фс ва 50 фс давомийликдаги фемтосекундли лазер импульслари билан чирпланган ва чирпланмаган ночизикли фотон кристалларида частота иккиланиши жараёнини ўргандик ва Иккинчи гармониканинг юқори самарадорликли ва юқори контрастли импульсини олиш усуллари изланди. Ушбу жараёнда дисперсиянинг роли батафсил ўрганилган. Аниқланишича чирпланган ночизикли фотон кристалларида частота алмаштириш самарадорлиги паст бўлса-да, уларда юқори контрастли Гаусс шаклига эга бўлган иккинчи гармоника импульсини олиш мумкин. Шундай қилиб иккинчи гармониканинг ҳосил бўлиш жараёни чирпланган ночизикли фотон кристалларда фазаги модуляцияланган импульслар билан таъсирлаштирилганда самарали частота алмаштириш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

## ХУЛОСА

Ушбу диссертация иши ночизикли фотон кристалларида ўз-ўзига таъсир ва ностационар шартларда юқори интенсивликли ўта қисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини таҳлил қилишга бағишланган. Оптик тўлқинларнинг ўзаро таъсири назариясини ўрганишда амплитуданинг секин ўзгариши методи асосида ҳисоб китоб ишлари олиб борилди. Максвелл тенгламасининг бир йўналишли яқинлашуви асосида амплитуданинг секин ўзгариши методи ўта қисқа давомийликдаги частота алмаштириш жараёнидаги (5 фс гача) аниқлиги текширилди. Ночизикли фотон

кристалларининг турли конструкцияларидан фойдаланган ҳолда юқори самарадорликли иккинчи гармоника генерацияси олишнинг турли имкониятлари таҳлил қилинди.

Диссертация ишида олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Ночизикли фотон кристалларида частотани икки баробар ошириш жараёнида давомийлиги 5 фс ли импульсдан фойдаланганда муҳитда ҳосил бўладиган иккинчи гармоника импульси муҳит дисперсияси таъсирида ўзининг Гаусс "силлиқлигини" йўқотиши ва бир неча бўлақларга бўлиниши аниқланди.
2. Интенсивлиги юқори бўлган ва ўта қисқа лазер импульсларининг НФК да иккинчи гармоника ҳосил қилиш жараёнида доменларнинг оптимал узунлиги кенг тарқалган  $\pi/|\Delta k|$  ҳисоб-китобидан фарқ қилиши аниқланди. Бу муҳитда учинчи тартибли ночизикли киритувчанликнинг пайдо бўлиши ва муҳит дисперсияси таъсири туфайли юзага келиши тушинтирилди
3. Мунтазам доменли тузилишга эга кристалларда иккинчи гармоника ҳосил бўлиш жараёнига муҳитнинг кубик ночизиклилиги ва дисперсияси таъсири кучайиши билан лазер нурланиш тўлқин узунлигининг  $\pi/\Delta k$  ҳисоблашда ишлатилган қийматидан кичик бўлганда юқори самарадорликка эришиш мумкинлиги аниқланди;
4. 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> ДДС-кристалларида ўтақисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини ҳосил қилиш самарадорлигини белгиловчи асосий омил муҳитнинг дисперсияси эканлиги аниқланди;
5. Ночизикли фотон кристалларида ўтақисқа лазер импульсларининг иккинчи гармоникасини ҳосил қилишда иккинчи тартибли гурушпавий тезлиги дисперсиясини ҳисобга олиш иккинчи гармоника импульсининг дум қисми модуляциясига олиб келиши кўрсатилган. Бироқ бу таъсир асосий гармоникага таъсир қилмайди.
6. Ночизикли фотон кристалларда спектрал чегараланган импульсларнинг иккинчи гармоникасини ҳосил қилишда, чирпланмаганларга нисбатан паст энергия самарадорлигига эга бўлса ҳам юқори контрастли гауссимон иккинчи гармоника импульсини ҳосил қилиш мумкинлиги кўрсатилди.

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

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**РУЗИЕВ ЗУХРИДДИН ДЖАМОЛИДДИНОВИЧ**

**ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В НЕЛИНЕЙНЫХ ФОТОННЫХ  
КРИСТАЛЛАХ В УСЛОВИЯХ САМОВОЗДЕЙСТВИЯ И  
НЕСТАЦИОНАРНОСТИ**

**01.04.11 – Лазерная физика**

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

**Ташкент – 2023**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2022.3. PhD/FM 773.**

Диссертация выполнена в Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Автореферат диссертации на трех языках (русский, узбекский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.ispm.uz](http://www.ispm.uz)) и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Сапаев Усман Каландарович**  
доктор физика-математических наук

**Официальные оппоненты:**

**Болтаев Ганжабой Сапаевич**  
доктор физика-математических наук

**Махмудов Хикмат Махаматович**  
доктор физика-математических наук

**Ведущая организация:**

**Ургенчский государственный университет**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023г. в \_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 по присуждению ученых степеней при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз (адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (99871) 262–32–54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz)).

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.  
(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2023 г.).

**Х.Б. Ашуров**

Председатель одnorазового  
научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.т.н.,  
профессор

**И.Д. Ядгаров**

Ученый секретарь одnorазового  
научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м. н., с.н.с.

**Б.Е. Умирзаков**

Председатель научного семинара  
одnorазовом научном совете по  
присуждению ученых степеней,  
д.ф.-м.н., профессор.

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** С момента создания лазеров кристаллы с квадратичной нелинейностью играют важную роль в создании лазерных установок и в исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом. Они преобразуют лазерное излучение в требуемые диапазоны спектра, охватывая от ультрафиолета до ближнего инфракрасного. В определенных условиях они позволяют преобразовать энергию лазерного излучения в требуемую частоту спектра с высокой эффективностью. Однако, использование коротких импульсов ( $\tau \sim 10$  фс или  $\tau \lesssim 10$  фс меньше) в нелинейных кристаллах, в том числе в нелинейных фотонных кристаллах, вызывает увеличение влияния дисперсии и кубической нелинейности, что может снизить эффективность генерации второй гармоники.

Следуя за тенденцией развития преобразователей частоты, основанных на использовании нелинейно-оптических кристаллов не трудно заметить, что, в основном различные процессы преобразования частоты с высокой эффективностью были реализованы с широко-апертурными (конформными) пучками и в нано и суб-пикосекундном диапазоне длительностей. С применением фемтосекундных импульсов ситуация с получением эффективной генерации гармоник, в частности, генерации второй гармоники в нелинейных кристаллах становится сложной. В последние годы для эффективной реализации процесса преобразований частоты широко используются методы chirпированных импульсов и chirпированных нелинейных фотонных кристаллов. Эти методы хорошо изучены и используются при длительности лазерного импульса вплоть до несколько десятков фемтосекундов, но плохо изучены для импульсов длительностью которых в пределах или меньше десятков фемтосекунд ( $10 \text{ фс} > t$ ).

В последнее время в Республике Узбекистан усилилось внимание к изучению новых возможностей эффективного преобразования частоты лазерного излучения, в частности с использованием оптических наноматериалов типа нелинейных фотонных кристаллов, обладающих рядом преимуществ по сравнению с традиционными нелинейно оптическими кристаллами. Направления этих фундаментальных исследований и разработок имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию нового Узбекистан на 2023–2026 годы (от 28.01.2023 г. № УП-60).

Определены основные задачи и направления деятельности научных исследований на уровне международных стандартов в приоритетных областях «Электроника, физика наноматериалов и прикладная математика»<sup>2</sup>. При

---

<sup>2</sup> Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 18 мая 2017 года №292 «О мерах по организации деятельности вновь созданных научно-исследовательских учреждений академии Наук Республики Узбекистан»

обеспечении исполнения постановления важно развивать теорию решения задачи взаимодействия лазерного излучения с веществом. Данное диссертационное исследование, в определённой степени соответствует задачам, поставленным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О стратегии действий по дальнейшему развитию нового Узбекистан» от 28 января 2023 года и Постановление Президента Республики Узбекистан № ПФ-5847 от 08.10.2019 г. «О принятии мер по повышению научного потенциала высших учебных заведений», включенное в дорожную карту «Концепция развития системы высшего образования Республики Узбекистан». Республики Узбекистан до 2030 года». В то же время № УП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной области деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии в Республике.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан – II. «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

**Степень изученности проблемы.** История процесса генерации второй гармоники начинается с времен создания первого лазера в 1960 году (Т. Мейман (Nature V.187, p. 493 1960)). Впервые П. Франкен с соавторами (Phys. Rev. Lett. 7, 118, 1961) получили генерацию второй гармоники в кристалле кварца с излучением рубинового лазера. Однако в этом эксперименте ее эффективность была очень низкой (в порядке  $\sim 10^{-12}$  %). Вскоре ученые обнаружили, что для получения эффективных генераций вторых и более высоких гармоник необходимо создать фазовый синхронизм между взаимодействующими оптическими волнами. Следующий важный шаг в развитии генерации второй гармоники был сделан в 1962 году П. Д. Макер и его коллегами. Они предложили использовать нелинейные оптические кристаллы с несимметричной кристаллической структурой для получения генерации второй гармоники. Это привело к значительному увеличению эффективности генерации второй гармоники.

В 1962 году Н. Бломберган с соавторами впервые сообщили о нескольких теоретических методах, в том числе о возможности «квази-синхронизма» при процессах преобразования частоты. Этот метод долгие годы оставался только на бумаге и были изучены только теоретически. Главной причиной этого было отсутствие технологий создания нелинейно-оптических сред, позволяющих создать квазисинхронное нелинейное воздействие оптических волн. Однако в конце 20 века развитие технологий выращивания кристаллов, которые могут иметь различные физические свойства, привело к созданию кристаллов с таким квазисинхронным эффектом в лабораторных условиях, и эти кристаллы стали называть нелинейными фотонными кристаллами (кристаллами с регулярной доменной структурой).

После этого интерес к нелинейным фотонным кристаллам снова вырос (см., напр., в обзор Hum D. S., Fejer M. M. Quasi-phasematching //Comptes Rendus Physique.

Эффективность генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах является важным параметром. Для этого в последние годы в ряде экспериментов были достигнуты хорошие результаты. Например, Liu H., с соавторами смогли достичь эффективности генерации второй гармоники до ~20%. Fujioka N и др. также удалось получить ее эффективность до ~50%. Однако они использовали импульсы основного излучения длительностью около 100 фс и использовали неколлинеарное взаимодействие. Zheng Z. и др добились еще более высокой эффективности генерации второй гармоники, равной 60%. При этом они использовали ниобат лития, который был периодическим. Однако в последнем случае длительность основного импульса составляла около ~200 фс.

В этом направлении узбекские ученые, такие как Т.Б. Усманов, И.А. Кулагин и Д.Б. Юсупов, провели огромную работу по генерации второй гармоники в нелинейно-оптических кристаллах и кристаллах с регулярной и нерегулярной доменной структурой. В основном они рассматривали процесс генерации второй гармоники с помощью нано-, пико- и субпикосекундных лазерных импульсов. Исследования генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах с неоднородными доменами также были проведены для создания фемтосекундных импульсов второй гармоники с определенными амплитудными и фазовыми характеристиками при низкой энергетической обменной взаимодействии волн или при полном истощении энергии основного излучения другим узбекским ученым - У.К. Сапаевым.

Легко заметить, что результаты, представленные в этих работах, были получены с помощью импульсов длиной около пятидесяти или больше фемтосекунд. Но в настоящее время основное внимание уделяется очень коротким импульсам, примерно 10 фс. В данной диссертации представлены исследования по генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах с использованием сверхкоротких мощных лазерных импульсов и однородных или неоднородных доменных структур.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа выполнена в рамках следующих проектов Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова: ОТ-Ф2-45 «Взаимодействия структурированного светового поля с нанообъектами» (2017–2020 гг.); Uzb-Ind-2021-96 “Параметрические взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах как источник многоцветных сверхкоротких импульсов”. (2021–2023 гг.).

**Целью** данной работы является выявление основных ограничивающих факторов, препятствующих повышению эффективности генерации второй

гармоники коротких лазерных импульсов при использовании нелинейных фотонных кристаллов и предложение новых методов для повышения эффективности данного процесса преобразования частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи исследования**:

разработать численные модели для исследования влияния кубической нелинейности и дисперсии среды при реализации генерации второй гармоники коротких (фемтосекундных) лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах.

исследовать роль изменения размера доменов фотонных кристаллов для реализации эффективной генерации второй гармоники.

исследовать роль глубины чирпа фазово-модулированного импульса накачки на динамику формирования импульса второй гармоники.

предложить новые схемы для эффективной реализации удвоения частоты фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах с регулярной и нерегулярной доменными структурами.

**Объектом** нелинейные фотонные кристаллы: ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) и ниобат лития с 5% добавкой оксидом магния ( $5\%\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ).

**Предметом** Эффекты самовоздействия и дисперсии нелинейно-оптической среды при нестационарной генерации второй гармоники.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применены численные и аналитические методы для решения укороченных уравнений генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах в условия нестационарности и самовоздействия, а также в условиях неоднородности размера доменов.

#### **Научная новизна:**

выявлено, что временной профиль импульса второй гармоники при удвоении частоты потеряет гауссовую “гладкость” и разделяется на несколько частей при использовании сверхкоротких лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах из-за сильного влияния дисперсии среды.

установлено, что оптимальная толщина доменов отличается от широко принятого вычисления по когерентной длине при генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах.

показано, что при использовании интенсивных коротких лазерных импульсов с увеличением влияния кубической нелинейности и дисперсии среды на процесс генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах необходимо выбрать длиннее диапазон длины волны лазерного излучения чем вычисляемого по когерентной длине взаимодействия.

выявлено, что основным определяющим фактором эффективности генерации второй гармоники ультракоротких лазерных импульсов в периодических  $5\%\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  кристаллах является дисперсия среды.

показано, что учет дисперсии групповых скоростей второго порядка при генерации второй гармоники ультракоротких лазерных импульсов в

нелинейных фотонных кристаллах приводит к модуляции хвостовой части импульса второй гармоники. При этом этот эффект не влияет на импульс основной гармоники.

выявлено, что ГВГ спектрально-ограниченных импульсов в чирпированных НФК хотя имеет низкую энергетическую эффективность по сравнению с не чирпированным, но ими можно получить высококонтрастной импульс второй гармоники с гауссовой формой.

**Практические результаты исследования.** Разработанные численные и аналитические методы, описывающие процесс генерации второй гармоники в условиях нестационарности и самовоздействия могут использоваться при реализации других процессов преобразования частоты лазерного излучения. Предложенные методы, основанные на использовании нелинейных фотонных кристаллов с однородными и неоднородными доменными структурами, а также, на использование чирпированных лазерных импульсов позволяют создать высокоэффективные преобразователи частот.

**Достоверность результатов исследований** обеспечена обоснованностью закона сохранения энергии взаимодействующих волн (поскольку в работе не учитывается поглощения среды) и квазистатической длины взаимодействия. Достоверность сделанных выводов основывается согласованностью с результатами других авторов, работающих в области преобразования частоты лазерного излучения с фемтосекундной длительностью.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов, полученных в диссертационной работе заключается в том, что они могут объяснить тот факт, что путем частичного изменения длин доменов нелинейных фотонных кристаллов можно в достаточной степени уменьшить эффекты нелинейностей высокого порядка и дисперсии среды, возникающие при использовании интенсивных и коротких лазерных импульсов.

Практическая значимость результатов данного исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при создании нелинейных фотонных кристаллов, которых можно использовать для реализации эффективной генерации второй гармоники.

**Внедрение результатов исследования.** Результаты диссертационного исследования на тему «Генерация второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах в условиях самовоздействия и нестационарности» обладают актуальностью, представляют большой практический интерес и результаты были использованы при выполнении проекта ЁОТ-Фтех-2018-161 (01/9-14-3072 - справка, полученная 16.09.2022 года на основе научного проекта, выполненного в ТГТУ И. Таджибаевым в 2018-2019 годах) по следующим пунктам:

- для эффективного преобразования частоты от 1.05 мкм к 0.525 нм с использованием нелинейных фотонных кристаллов

- для точного определения периода фотонных кристаллов при использовании интенсивных коротких лазерных импульсов.

- при сравнении результатов экспериментальных данных с теорией (численными расчетами) для спектра широкополосного света, полученного в двухжильном волокне при накачке с  $\lambda_n = 0.532$  мкм, и после прохождения ответвителя с длинами 31 и 38 мм.

- при сравнении полученных экспериментальных результатов с численными результатами по сверхширокополосному излучению с управляемым спектром в области 0.7-1.7 мкм в цельно-волоконном устройстве на основе двухжильного волокна, состоящего из волокна-генератора и волокна-фильтра, при накачке инфракрасным излучением (1.05 мкм).

Результаты диссертационного исследования по точному определению периода фотонных кристаллов при использовании интенсивных коротких лазерных импульсов также были использованы при выполнении международного проекта 3D Digital Silk Road (№ PPI/APM/2019/1/00004) (01/11-7176 - справка, полученная 16.11.2022 года на основе научного проекта, выполненного в НУУз, Д. Мухамедовой в 2019-2021 годах) для активного цифрового сканирования различных объектов, где было необходимо использовать лазерное излучение, высоко-эффективнее преобразованное от инфракрасного к видимому диапазону.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на 7 конференциях, в том числе на 2 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 13 научных трудах, из которых 6 статей в научных журналах, в том числе 4 в зарубежных и 2 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 107 страниц с 23 рисунками. Список литературы содержит 94 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

Первая глава «**Современное состояние проблемы: квазисинхронная нелинейная оптика (обзор литературы)**» посвящена анализу литературных

источников, краткому обзору основных законов нелинейной оптики, выводу укороченных уравнений нелинейной оптики. Что касается анализа литературы, рассматривали научные статьи, относящиеся к теме диссертации. На основе этих статей подробно описываются истории нелинейной оптики, развития лазеров, нелинейных фотонных кристаллов, техники получения фемтосекундных лазеров и их аспектов, связанных с диссертационной работой этих статей.

В конце первой главы на основе проведенного обзора современного состояния генерации второй гармоники нелинейных волн в нелинейных фотонных кристаллах сформулирована постановка задач диссертационной работы.

Вторая глава «**Особенности приближенных методов в теории нестационарной генерации второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах**» посвящена основным методикам решения процесса генерации второй гармоники с использованием однонаправленного приближения уравнения Максвелла и метода медленно-меняющихся амплитуд Максвелла для определения их точности.

Более подробно описана методика и алгоритм однонаправленного приближения уравнения Максвелла для численного исследования процесса удвоения частоты в нелинейных фотонных кристаллах. Также обсуждается специфика метода "split-step", который широко используется для решения задач нелинейной оптики, требующих решения уравнений в частных производных по времени.

Для учета мгновенного изменения нелинейных оптических параметров фотонных кристаллов по направлению распространения и взаимодействия волн в диссертации применяются специальные подходы к численным расчетам.

Рассмотрим теперь методику однонаправленного приближения волнового уравнения с учётом нелинейной поляризации второго порядка. В этом случае уравнение в спектральной области и в скалярном виде можно записать в следующем виде :

$$\frac{dE(\omega, z)}{dz} = ik(\omega)E(\omega z) + \frac{i\omega^2}{2\varepsilon_0 c^2 k(\omega)} P_{nl}(\omega, z) \quad (2.1)$$

где  $P_{nl}(\omega, z) = \chi^{(2)} E^2(t, z)$ . Если учитываем поле как,  $E(\omega, z) = A(\omega, z) \exp(ik(\omega)z)$ , тогда получается простое уравнение, которое зависит от амплитуды и работает с уравнением распространения однонаправленного импульса.

Процесс ГВГ с учётом дисперсии до третьего порядка малости в движущейся системе координат в приближении ММА имеет следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} - i \frac{g_1}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + \frac{h_1}{6} \frac{\partial^3 A_1}{\partial t^3} &= -i\gamma_1 \sigma(z) A_1^* A_2 e^{-i\Delta k z} \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + v \frac{\partial A_2}{\partial t} - i \frac{g_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + \frac{h_2}{6} \frac{\partial^3 A_2}{\partial t^3} &= -i\gamma_2 \sigma(z) A_1^2 A_2 e^{i\Delta k z} \end{aligned} \quad (2.2)$$

здесь,  $A_1$  и  $A_2$  комплексные амплитуды основной и второй гармоники,

Прежде чем представить результаты сравнительного анализа приближенных методов следует отметить, что оба приближенных метода дали практически одинаковые результаты вплоть до 10 фс, что и мы ожидали. Для сравнения выбрали эффективность ГВГ и временной профиль интенсивности второй гармоники на выходе из периодического кристалла. При расчётах однонаправленного приближения временной профиль амплитуды второй гармоники был получен от спектра самого поля от  $1.5 \omega_0$  до  $2.5 \omega_0$  нормированной частоты с использованием обратного преобразования Фурье.

Третья глава «**Генерация второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой**» посвящена исследованию процесса генерации второй гармоники коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой. Как отмечено во Введении, что регулярной доменной структурой -кристаллы широко используются для реализации различных типов процессов преобразования частоты лазерного излучения. Исследования последних лет показали, что на практике кристаллы с периодической доменной структурой может обеспечить, в частности, высокую энергетическую эффективность генерации второй гармоники благодаря возможностью использования их с наиболее большим значением восприимчивости второго порядка. Эта особенность обусловила их широкое применение на практике. В этой главе обсуждается применение регулярной доменной структурой -кристаллы в получении генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в основе двух методов и дальнейшего повышения эффективности.

Для сравнения результатов приближения медленно-меняющихся амплитуд выбраны результаты т.н., однонаправленного приближения уравнений Максвелла.

При одинаковых условиях эксперимента проведено сравнение результатов этих приближений. Сравнительный анализ показывает, что вплоть до 10 фс длительности основного импульса оба приближенных метода описывают этот процесс преобразования частоты практически одинаково, но ниже 10 фс наблюдается расхождение результатов. Сравнение проводилось, главным образом по формированию временного профиля импульса второй гармоники и её эффективности. Представлена также методика получения временных профилей импульса второй гармоники при использовании однонаправленного приближения, где падающее поле используется целиком, как в спектральной, так и во временной области расчета. При использовании

приближения медленно-меняющихся амплитуд учтено влияние дисперсии до третьего порядка малости

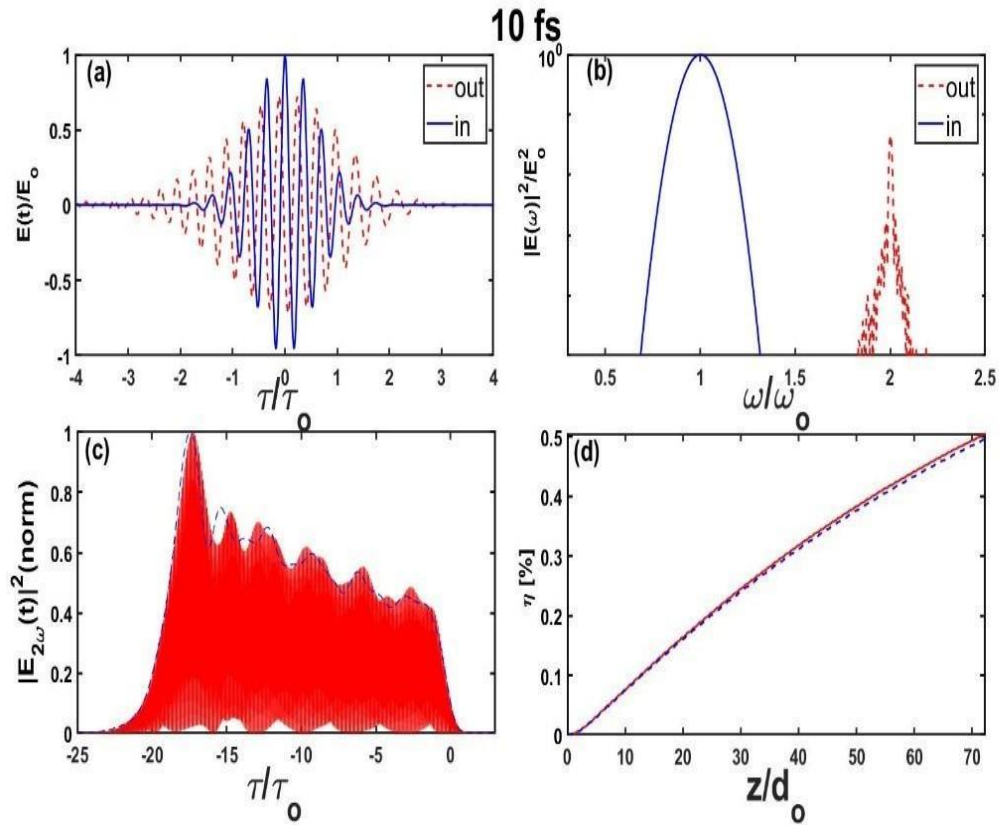


Рис. 1. — Результаты численных расчётов для 10 фс импульса основной гармоники: (а)- временной профиль самого поля на входе (сплошная кривая) и на выходе (пунктирная кривая) из кристалла; (б) его спектр на входе (сплошная кривая) и на выходе (пунктирная кривая); (с) - результаты сравнительного анализа, где показан временной профиль интенсивности второй гармоники на выходе из периодического кристалла. Здесь пунктирная кривая- результаты приближения медленно-меняющихся амплитуд, а сплошная-одна направленного приближения; (d) – зависимость эффективности генерации второй гармоники от числа доменов. Здесь сплошной кривой показан результат приближения медленно-меняющихся амплитуд, пунктирной- одна направленного приближения волнового уравнения.

На рис.1 показаны результаты численных расчётов для случая 10 фс, где динамика второй гармоники исследована при прохождении фотонного кристалла с доменами приблизительно 70: (а)- временной профиль самого поля на входе (сплошная кривая) и на выходе (пунктирная кривая) из кристалла; (б) - его спектр на входе (сплошная кривая) и на выходе (пунктирная кривая); (с) - результаты сравнительного анализа, где показан временной профиль интенсивности второй гармоники при выходе из кристалла. Здесь пунктирная кривая- результаты приближения медленно-меняющихся амплитуд, а сплошная- одна направленного приближения; (d) – зависимость эффективности генерации второй гармоники от числа доменов.

Здесь сплошной кривой показан результат приближения медленно – меняющихся амплитуд, пунктирной- однонаправленного приближения волнового уравнения.

На этом рисунке практически оба приближенных метода дают одинаковые результаты. Но только наблюдается незначительное отличие при сравнении временного профиля интенсивности второй гармоники (см., часть (с)). Хотя здесь в двух разных расчётах наблюдается маленькое отклонение профилей второй гармоники друг от друга, но при сравнении эффективности генерация второй гармоники они совпадают друг на друга (см., часть (d)).

Сравнительные результаты двух приближенных методов для случая 5 фс показаны на рис.2. Здесь кривые и порядок рисунков определяются как на рис.1. На этом рисунке наблюдаются заметное отклонение результатов при сравнении временного профиля интенсивности второй гармоники, который показан на части (с). В расчётах по однонаправленному приближению наблюдается разделение импульса второй гармоники на несколько частей, а по приближению медленно-меняющихся амплитуд - нет. Несмотря на это, результаты по эффективности второй гармоники в обоих расчётах совпадают друг на друга.

Сравнивая результаты для случаев  $\sim 5$  фс и  $\sim 10$  фс наблюдаем, что результаты при двух приближениях отличаются друг от друга незначительно, если в приближении медленно-меняющихся амплитуд учитывается дисперсию до третьего порядка малости.

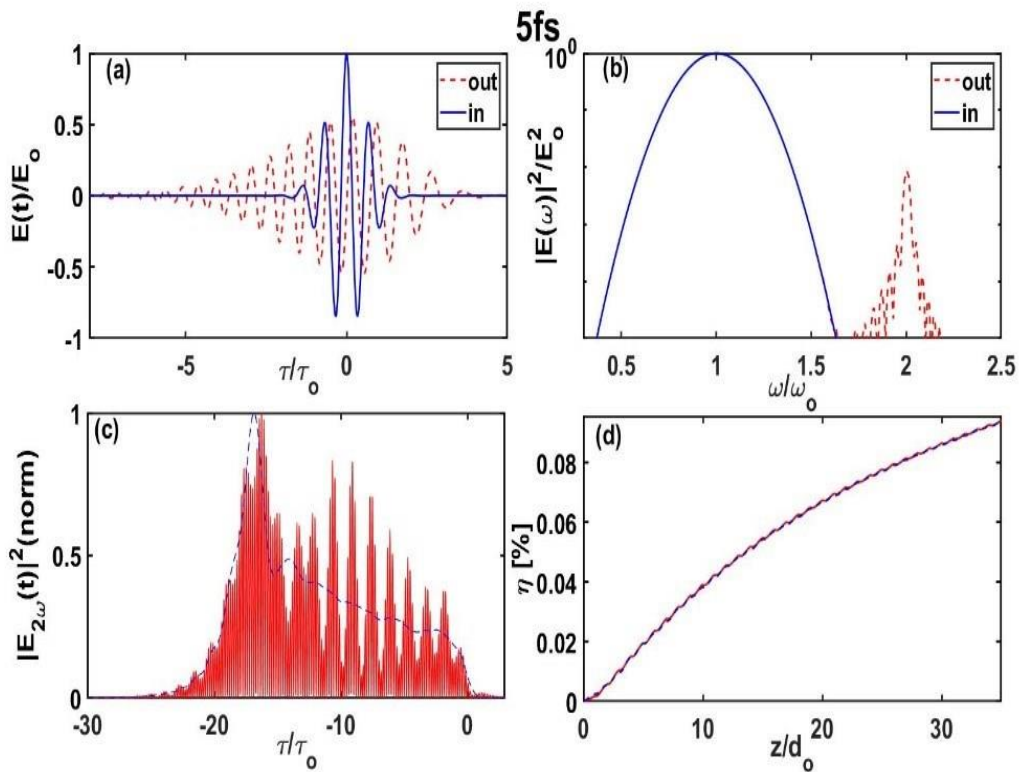


Рис. 2. — Результаты приближенных методов для случая 5 фс. Порядок рисунков и кривые определяются как на рисунке 1

Из этого следует что оба приближения можно использовать в расчётах. Однако, следует отметить, что здесь мы использовали фиксированное значение  $\chi^{(2)}$  квадратичной нелинейности поляризации. Однако этот параметр могут завесить от частоты излучения падающей волны. В этом случае если падающий импульс на кристалл имеет достаточно широкий спектр, то необходимо учитывать зависимость  $\chi^{(2)}$  от  $\omega$ , также как  $\chi^{(2)}(\omega)$ . Именно в этом случае успешно можно применить однонаправленное приближение чем приближения медленно-меняющихся амплитуд.

Численный расчет проводился для следующих условий: интенсивность излучения  $I = 2 \cdot 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\lambda = 1560$  нм, длительность импульса  $\tau = 10$  фс при FWHM,  $d_{13} \approx 3.4$  пм/В,  $\chi_{1111} \approx 2.94 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $\chi_{1212} = \chi_{2121} \approx 7 \cdot 10^{-22}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>,  $\chi_{2222} \approx 5.32 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/В<sup>2</sup>. Использовано фиксированное значение комнатной температуры  $T \approx 19.45^\circ$ .

При выбранном уровне интенсивности проявляется влияние эффектов Керра, что приводит к снижению эффективности удвоения частоты. Это видно из рис. 3, где показана зависимость эффективности генерации второй гармоники от размера домена периодического кристалла при  $z \approx 3$  см. Максимальная эффективность наблюдается не при точном значении размера доменов, которое вычисляется по формуле  $d_c = \pi/|\Delta k| \approx 9.915$  мкм, а при некотором оптимальном значении  $d_{opt} \approx 9.9241$  мкм. Хотя это увеличение составляет 0.092%, но оно практически позволяет повысить эффективность почти в два раза.

Как показывают расчеты, с увеличением размера доменов повышение эффективности вызвано взаимной компенсацией фазовых сдвигов, обусловленных кубической нелинейностью, дисперсией среды и “избыточной” величиной волнового числа нелинейной решетки. Причина состоит в том, что, во-первых, эффекты само- и кросс-воздействия приводят к изменению показателя преломления среды, нарушая оптимальные условия квазисинхронизма. Во-вторых, дисперсия среды, влияя лишь на фазу Фурье-компонент взаимодействующих импульсов, по мере распространения импульсов в среде также нарушает оптимальные фазовые условия. Вклад этих факторов нетрудно разделить, если в расчетах не учитывать тот или иной эффект.

На том же рисунке 3 показана зависимость эффективности второй гармоники от размера доменов, полученная с учетом только влияния кубичной нелинейности керровского типа (штриховая кривая). В этом случае максимальное значение находится в областях, где толщина доменов меньше точного значения. Отображена также зависимость эффективности второй гармоники, полученная только с учетом всех порядков дисперсии среды.

Исследовано влияние длины волны падающего излучения на эффективность процесса удвоения частоты при фиксированных размерах кристалла и доменов. Из результатов расчетов для кристалла размером  $z \approx 3$  см, представленных на рис.4, видно, что максимальная эффективность

наблюдается на  $\lambda \approx 1480$  нм, а не 1560 нм. Здесь сплошная кривая — зависимость эффективности генерации второй гармоники от длины волны импульса накачки при толщине доменов  $d_c$ ,  $\lambda = 1560$  нм, штриховая — при  $d_{opt}$ . Результаты подтверждают, что с увеличением влияния кубической нелинейности и дисперсии среды на процесс генерации второй гармоники в кристалле с регулярной доменной структурой необходимо корректировать либо толщину доменов, либо длину волны падающего излучения. Последнее важно, если в лабораторных условиях уже имеются периодические кристаллы с периодом, рассчитанным по выражению  $\pi/\Delta k$ .

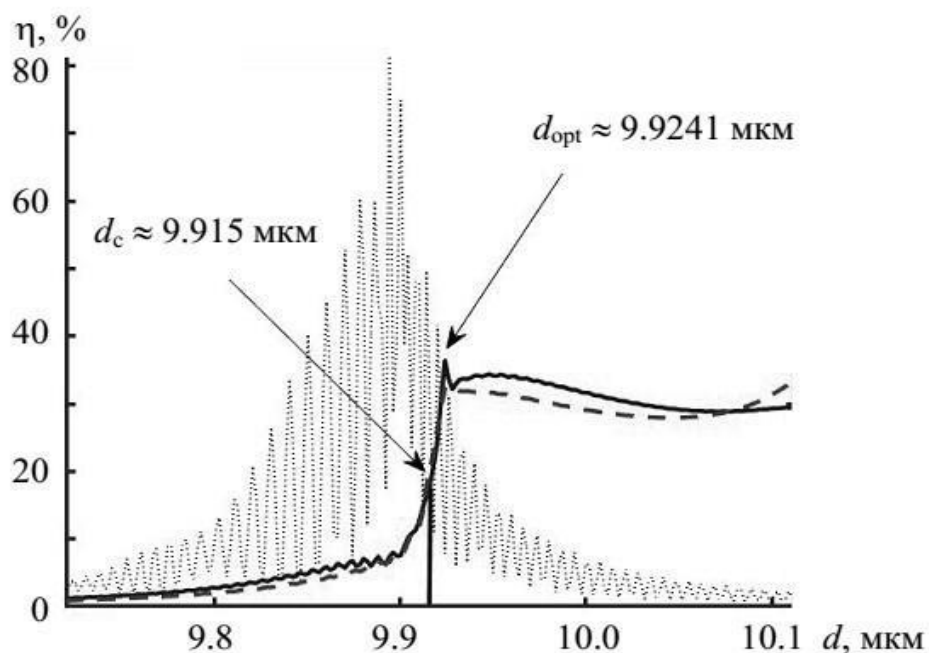


Рис. 3 — Зависимость эффективности генерации второй гармоники от толщины домена кристалла 5 % MgO:LiNbO<sub>3</sub>;  $\lambda = 1560$  нм; сплошная линия соответствует результатам, полученным с учетом ограничивающих факторов; штриховая кривая — с учетом только слагаемых дисперсии среды; пунктирная кривая — с учетом только нелинейности третьего порядка

В заключение отметим, что численными экспериментами исследован процесс генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> с учетом влияний дисперсии среды до третьего порядка и кубической нелинейности керровского типа.

Таким образом в данной главе рассмотрен случай, когда одновременно выполняются условия квазисинхронизма и синхронизма групповых скоростей. Численно определяемая оптимальная толщина доменов, обеспечивающая значительное увеличение эффективности процесса преобразования частоты, отличается от когерентной длины взаимодействия. Это обусловлено тем, что небольшое отклонение размера доменов от величины, обеспечивающей выполнение условий квазисинхронизма, позволяет компенсировать фазовые сдвиги, вызванные влиянием кубической нелинейности и дисперсии среды.

Представленные результаты могут быть использованы для анализа других процессов преобразования частоты, в частности параметрического усиления света интенсивных коротких лазерных импульсов в периодически поляризованных кристаллах.

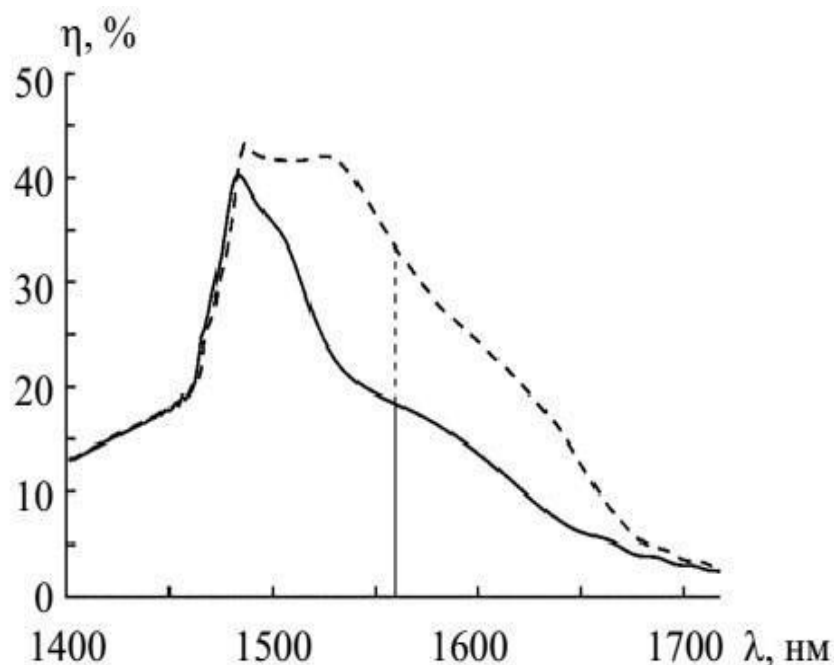


Рис. 4 — Зависимость эффективности удвоения частоты от длины волны падающего импульса при фиксированных значениях длины периодического кристалла и толщины доменов; сплошная кривая — эффективность генерации для  $d_c$ , штриховая — для  $d_{opt}$

В четвертой главе «**Особенности удвоения частоты интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с не регулярной доменной структурой**» численно исследовано удвоение частоты фемтосекундных лазерных импульсов (до  $\sim 5$  фс) в нелинейных фотонных кристаллах. Исследовано влияние ряда факторов (фазовая модуляция импульса первичного излучения и пространственная модуляция нелинейной восприимчивости, дисперсии вплоть до третьего порядка малости нелинейного фотонного кристалла) на эффективность нелинейного преобразования и длительность второй гармоники. Показано, что эффективность генерации второй гармоники может достигать  $\eta_{2\omega} \sim 45\%$  при использовании сверхкоротких (до  $\sim 5$  фс) лазерных импульсов.

Из этого рисунка 5 (а) видно, что в начальном этапе до расстояния порядка 50 мкм (в данном случае период НФК приблизительно равен  $\sim 6.5$  мкм) эффективность второй гармоники в обоих случаях растет, затем выходят на насыщение.

При этом в случае chirпированного НФК эффективность меньше примерно на 10% по всей длине, чем в случае НФК. Это обстоятельство с одной стороны объясняется тем, что пройдя расстояние порядка 50 мкм импульсы основного излучения и второй гармоники отстают друг от друга и поэтому между ними не происходит взаимодействия, другими словами каждый импульс распространяется сам по себе. С другой стороны, условия оптимального квази-синхронизма не выполняется не для всех длин волн в пределах ширины спектра основного излучения и второй гармоники.

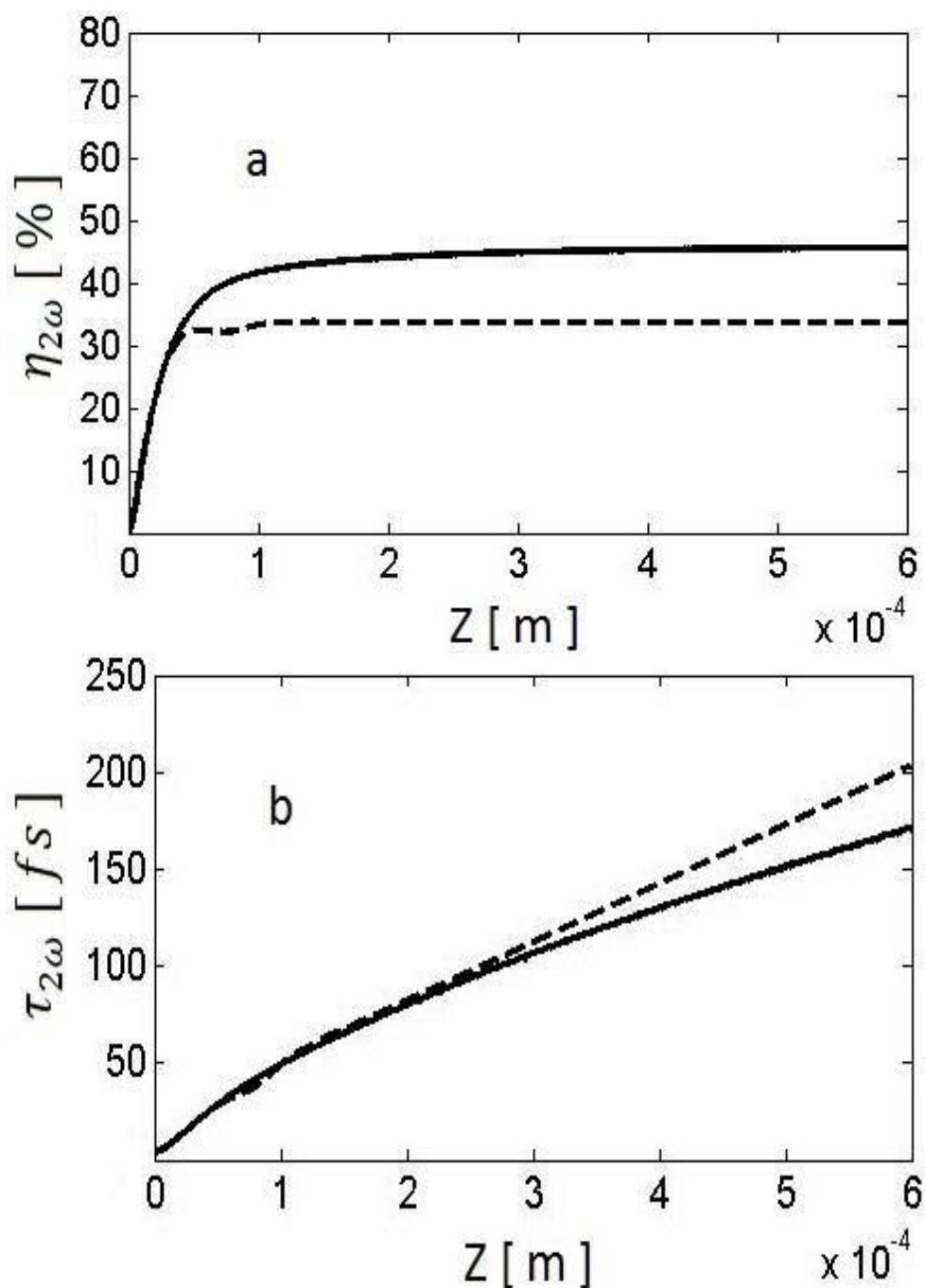


Рисунок 5 - Зависимости эффективности процесса ГВГ (а) и длительности импульса второй гармоники (б) от длины взаимодействия. Сплошная кривая соответствует НФК без chirпа, пунктирная- с chirпом.

Из части (b) рисунка 5 видно, что длительность импульса второй гармоники растет почти линейно, их значения для обоих рассматриваемых случаев совпадают до расстояния порядка 300 мкм и далее расходятся с увеличением длины взаимодействия, причем в случае ЧНФК растет быстрее (хотя мы ожидали обратного поведения).

Модуляция по частоте  $\delta\omega$  зависит от дисперсии групповых скоростей и от знака  $\beta$ . В области нормальной дисперсии спектра  $\beta > 0$  и разность частот  $\delta\omega$  имеет отрицательное значение. Если передний фронт импульса к заднему уменьшается то коэффициент модуляции  $\gamma < 0$ . В нашем случае импульс в случае основного излучения с фазово – модулированными длительностью 50 фс длительность импульса второй гармоники увеличивается также монотонно.

Таким образом в данной главе исследован процесс удвоения частоты в чирпированных и нечирпированных нелинейных фотонных кристаллах при возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами длительностями 5 фс и 50 фс, как с фазовой модуляцией, так и без фазовой модуляции, соответственно. Изучены методы получения высоко – эффективного и высоко – контрастного импульса второй гармоники. Роль дисперсии среды изучена подробно. Выявлено, что в чирпированных нелинейных фотонных кристаллах хотя коэффициент полезного действия преобразования низкая, то в них можно получить импульс второй гармоники с высоко – контрастной гауссовой формой. И наконец, процесс генерации второй гармоники наиболее эффективно протекает при возбуждении его импульсом основного излучения с фазово-модулированными импульсами в чирпированных нелинейных фотонных кристаллах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертационная работа посвящена исследованию генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах в условиях самовоздействия и нестационарности. Теоретические расчеты проведены на основе приближений медленно-меняющихся амплитуд в теории взаимодействия оптических волн. Благодаря определению точности приближения медленно-меняющихся амплитуд на основе однонаправленного приближения уравнения Максвелла, был исследован этот процесс преобразования частоты в сверхкоротком диапазоне длительностей (вплоть до 5 фс). Проанализированы различные возможности получения высокоэффективной генерации второй гармоники с использованием различных конструкций нелинейных фотонных кристаллов.

На основе проведенных в диссертационной работе исследований представлены следующие выводы и заключения:

1. Выявлено, что временной профиль импульса второй гармоники при удвоении частоты потеряет гауссовую “гладкость” и разделяется на несколько частей при использовании 5 фс основного импульса в нелинейных фотонных кристаллах из-за сильного влияния дисперсии среды.

2. Установлено, что оптимальная толщина доменов отличается от широко принятого вычисления  $\pi/|\Delta k|$  при генерации второй гармоники интенсивных коротких лазерных импульсов в НФК. Это объясняется появлением влияний нелинейной восприимчивости третьего порядка и дисперсии среды;
3. С увеличением влияния кубической нелинейности и дисперсии среды на процесс генерации второй гармоники в кристаллах с регулярной доменной структурой необходимо выбрать длиннее диапазон длины волны лазерного излучения чем вычисляемого по выражению  $\pi/\Delta k$ ;
4. Выявлено, что основным определяющим фактором эффективности генерации второй гармоники ультракоротких лазерных импульсов в РДС-кристаллах 5% MgO:LiNbO<sub>3</sub> является дисперсия среды;
5. Показано, что учет дисперсии групповых скоростей второго порядка при ГВГ ультракоротких лазерных импульсов в НФК приводит к модуляции хвостовой части импульса второй гармоники. При этом этот эффект не влияет на импульс основной гармоники;
6. Выявлено, что ГВГ спектрально-ограниченных импульсов в чирпированных НФК хотя имеет низкую энергетическую эффективность по сравнению с не чирпированным, но ими можно получить высококонтрастной импульс второй гармоники с гауссовой формой.

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

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM  
KARIMOV**

**RUZIEV ZUKHRIDDIN JAMOLIDDINOVICH**

**SECOND HARMONIC GENERATION IN NONLINEAR PHOTONIC  
CRYSTALS UNDER SELF-ACTION AND NONSTATIONARITY  
CONDITIONS**

**01.04.11 - Laser physics**

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

**TASHKENT-2023**

**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2022.3.PhD/FM773.**

The Dissertation was implemented at the Tashkent state technical university.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.iplt.uz](http://www.iplt.uz) and on the website of “ZiyoNet” Information and Educational Portal at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific supervisor:** **Sapaev Usman Kalandarovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Official opponents:** **Boltaev Ganjaboy Sapaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
**Makhmudov Khikmat Maxamatovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Leading organization:** **Urgench state university**

The defense of the doctoral dissertation will be held on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023, at \_\_\_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54, e-mail: [info@iplt.uz](mailto:info@iplt.uz)).

The doctoral dissertation can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № \_\_\_\_\_) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54 Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of the dissertation was distributed on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023.  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2023)

**Kh.B. Ashurov**  
Chairman of scientific council  
on award of scientific degrees,  
doctor of technical science, professor

**I.D. Yadgarov**  
Scientific secretary of scientific council on  
award of scientific degrees, doctor physical  
and mathematical science, senior researcher

**B.E.Umirzakov**  
Chairman of scientific seminar under  
scientific council on award of scientific  
degrees, doctor physical and mathematical  
science, professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The purpose of the research** is to identify the main limiting factors hindering the increase in the efficiency of the generation of the second harmonic of short laser pulses when using nonlinear photonic crystals and to propose new methods to improve the efficiency of this frequency conversion process.

**The objects of the research** non-linear photonic crystals: lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) and lithium niobate with 5% magnesium oxide ( $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ).

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

it was found that the time profile of the second-harmonic pulse loses its Gaussian “smoothness” when the frequency is doubled and is divided into several parts when using ultrashort laser pulses in nonlinear photonic crystals due to the strong influence of the medium dispersion;

it has been established that the optimal domain thickness differs from the widely accepted calculation from the coherent length in the generation of the second harmonic of intense short laser pulses in nonlinear photonic crystals;

it is shown that when using intense short laser pulses with an increase in the influence of cubic nonlinearity and dispersion of the medium on the process of second harmonic generation in nonlinear photonic crystals, it is necessary to choose a longer range of laser radiation wavelength than that calculated from the coherent interaction length;

the main determining factor in the efficiency of generation of the second harmonic of ultrashort laser pulses in crystals with a regular domain structure ( $5\% \text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  crystals) is the dispersion of the medium;

it is shown that taking into account the second-order group velocity dispersion in the generation of the second harmonic of ultrashort laser pulses in nonlinear photonic crystals leads to modulation of the tail part of the second-harmonic pulse. However, this effect does not affect the pulse of the fundamental harmonic.

it was found that the generation of the second harmonic of spectrally limited pulses in chirped nonlinear photonic crystals has a low energy efficiency compared to non-chirped ones. But a chirped non-linear photonic crystal makes it possible to obtain a high-contrast second-harmonic pulse with a Gaussian shape.

**Implementation of research results.** The results of the dissertation research on the topic "Second harmonic generation in nonlinear photonic crystals under conditions of self-action and non-stationarity" are relevant, are of great practical interest, and the results were used in the implementation of the YOT-Ftech-2018-161 (2018-2019) project on the following points:

- for efficient frequency conversion from  $1.05 \mu\text{m}$  to  $0.525 \mu\text{m}$  using non-linear photonic crystals
- to accurately determine the period of photonic crystals when using intense short laser pulses.
- to take into account the influence of the dispersion of frequency converters based on the interactions of quasi-synchronous interactions.
- when comparing the results of experimental data with theory (numerical calculations) for the spectrum of broadband light obtained in a two-core fiber when

pumped with  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$  and after passing through a coupler with lengths of 31 and 38 mm.

- when comparing the obtained experimental results with the numerical results of Ruziev Z.J. on ultra-wideband radiation with a controlled spectrum in the region of 0.7-1.7  $\mu\text{m}$  in an all-fiber device based on a two-core fiber, consisting of a generator fiber and a filter fiber, when pumped with infrared radiation (1.05  $\mu\text{m}$ ).

The results of the dissertation research on the accurate determination of the period of photonic crystals using intense short laser pulses were also used in the implementation of the international project 3D Digital Silk Road (No. PPI/APM/2019/1/00004) (2019-2021) for active digital scanning of various objects, where it was necessary to use laser radiation, highly-efficiently converted from infrared to visible range.

**Approbation of results of a research.** The main results of the work were reported and discussed at 7 conferences, including 2 international and 5 republican scientific and practical conferences.

**Publishing results.** The main results of research on the topic of the dissertation were published in 13 scientific papers, of which 6 articles were in scientific journals, including 4 in foreign and 2 in republican journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion. The full volume of the dissertation is 107 pages with 23 figures. The list of references contains 94 titles.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Ruziev Z.J, Fedotova M.O, Khasanov Kh. O, Sapaev U.K. Features of Second Harmonic Generation of Intense Short Laser Pulses in Crystals with a Regular Domain Structure Under Conditions of Self-Action, Nonstationarity, and Synchronism of Group Velocities // Journal of Applied Spectroscopy. 2021, V. 88 № 3, p. 514-518. (No.1. Web of Science, Scopus: IF= 0.476).

2. Olimov A.N, Ruziev Z.J, Yusupov D.B, Sapaev U.K Frequency. Doubling of femtosecond laser pulses in nonlinear photonic crystals with account of high-order dispersion // Journal of Russian Laser Research. 2019, V 40 № 3 p. 280-287. (No.1. Web of Science, Scopus: IF=0.95).

3. Ruziev Z.J, Sapaev B, Sapaev I.B, Sapaev U.K, Amanov R, Nazaraliev D. On theory of approximation methods in the study of second harmonic generation of ultrashort laser pulses in periodic crystals // AIP Conference Proceedings. 2023, V 2432 № 1, p. 020008. (No.1. Web of Science, Scopus: IF=0.405).

4. Рузиев, З. Д., Собиров, О. И., Корабоев, К. А., & Сапаев, У. К. Численное моделирование генерации второй гармоники ультракоротких лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах. // *Математическое моделирование и численные методы*. (2023). 1 (33), 3-14.

5. Рузиев З. Дж., Сапаев У.К. Удвоение частоты интенсивных коротких лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой в условиях самовоздействия // «Узбекский физический журнал». 2020 т 22 № 5 с 282-286 (01.00.00. № 5).

6. Рузиев З.Ж, Олимов А.Н., Юсупов Д.Б., Сапаев У.К. Утроение частоты сверхкороткого лазерного импульса // «Узбекский физический журнал». 2019. т 21. № 3. с 161-167. (01.00.00. № 5).

**II бўлим (II часть; part II)**

7. Ro`ziyev Z.J., Olimov A.N, Aminboyev B.M, Sapaev U.K. Argon gazida femtosekund lazer impulslarining uchinchi garmonika generatsiyasi \\ Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi (RIAK-XI).Toshkent – 2018. b. 66-68.

8. Olimov A.N, Ro`ziyev Z.J, Aminbayev B.M, Sapaev U.K. Foton kristallarida femtosekundli lazer impulslari chastotasini ikkilantirish. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi (RIAK-XI).Toshkent – 2018. b. 68-70.

9. Ro`ziyev Z.J, Aminova M. Z, Begimqulov Sh.A., Sapaev U. K. Nochiziqli muhitlar hossalari tahlil qilishda qo`llaniladigan metodlar aniqlik darajasi tahlili Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi (RIAK-XII). Toshkent – 2019. b 145-146.

10. Ro`ziyev Z.J, Rashidov D, Saydazimov B.I, Muminov S, Akbarova N. Ultra qisqa lazer impulslarining nochiziqli optik muhitlar bilan o`zaro ta`sirini o`rganishda matematik modellar tahlili // II- International scientific and practical conference “problems and prospects of innovative machinery and technologies in the agri-food chain”. Toshkent – 2023. b 417-419.

11. Юсупов Д.Б, Сапаев У.К, Рузиев З.Д, Собиров О.И, Карабаев К.А. 2020 Алгоритм для исследования генерации второй гармоники ультракоротких лазерных импульсов в нелинейных фотонных кристаллах. DGU 09219

12. Ro`ziyev Z.J, Sapaev U.K. Argon gazida ultra-qisqa lazer impulslarining uchinchi garmonika generasiasining xususiyatlari //Texnika yulduzlari. Toshkent 2018. т 1. 112-115

13. Z.J. Ro`ziyev , D.B. Yusupov , U.K. Sapaev Third Harmonic Generation of High-Intense Ultra-Short Pulses Around Ionization Threshold in Argon // Academy of sciences of Uzbekistan physical–technical institute the optical society (OSA) international centre for theoretical physics (ICTP), 14-17 August 2018 Tashkent, Uzbekistan, p,46

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali tahririyat bo‘limida tahrirdan o‘tkazildi.

Bosishga ruxsat etildi: 25.03.2023  
Bichimi: 60x84 1/8 «Times New Roman»  
garniturada raqamli bosma usulda bosildi.  
Shartli bosma tabog‘i 2,3. Adadi: 100. Бююртма: 76

«DAVR MATBUOT SAVDO» MChJ  
bosmaxonasida chop etildi.  
100198, Toshkent, Qo‘yliq, 4-mavze, 6.