ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

ТАЖИБАЕВ ИЛХОМЖОН ИБРОХИМЖОНОВИЧ

СПЕКТРНИНГ КЎРИНАРЛИ ВА ЯҚИН ИҚ СОҲАЛАРИДАГИ ЛАЗЕР НУРЛАНИШИ ПАРАМЕТРЛАРИНИ ҚАЙТА ЎЗГАРТИРИШНИНГ ИНТЕРФЕРЕНЦИОН НУРТОЛАЛИ ОПТИК ТИЗИМЛАРИ

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2019

УДК 681.7.068

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

Тажибаев Илхомжон Иброхимжонович
Спектрнинг кўринарли ва яқин ИҚ соҳаларидаги лазер нурланиши параметрларини қайта ўзгартиришнинг интерференцион нуртолали оптик тизимлари.....3

Тажибаев Илхомжон Иброхимжонович
Интерференционные волоконно – оптические системы преобразования параметров лазерного излучения в видимой и ближней ИК области спектра.....19

Tajibayev Ilxomjon Ibrokhimjonovich
Interference fiber - optical systems for the transformations of parameters of the laser radiation in the visible and near IR spectral regions.....35

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works.....39

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

ТАЖИБАЕВ ИЛХОМЖОН ИБРОХИМЖОНОВИЧ

СПЕКТРНИНГ КЎРИНАРЛИ ВА ЯҚИН ИҚ СОҲАЛАРИДАГИ ЛАЗЕР НУРЛАНИШИ ПАРАМЕТРЛАРИНИ ҚАЙТА ЎЗГАРТИРИШНИНГ ИНТЕРФЕРЕНЦИОН НУРТОЛАЛИ ОПТИК ТИЗИМЛАРИ

01.04.05 – Оптика

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

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.PhD/FM129 рақам билан рўйхатга олинган.

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

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.iplt.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталига (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Захидов Эркин Агзамович** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Қодиров Мўмин Қодирович** физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим
	Очилов Одил физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим
Етакчи ташкилот:	**Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «____» май соат 14^{00} даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (+99871) 262-32-54, email: info@iplt.uz, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел: (+99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» май куни тарқатилди.

(2019 йил «____» майдаги ____ рақамли реестр баённомаси).

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

Д.Т.Усманов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

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. Бугунги кунда жаҳонда спектрнинг яқин инфрақизил соҳасида (1,0 – 1,8 мкм) жуда кам оптик йўқотишлар ва минимал дисперсия билан характерланадиган эритилган кварц асосидаги замонавий оптик нуртолалар ва улар асосида тезлиги 1Тбит/с дан юқори бўлган янги оптик аҳборот узатиш тизимлар ишлаб чиқиш имконини бермоқда. Бу эса ўз навбатида ахборот-коммуникация ва ҳисоблаш тизимлари тезкорлиги ва самарадорлигини сифат жиҳатидан ошириш учун ноёб имкониятларни очди. Шу жумладан, оптик нуртолаларнинг ўзига хос геометрияси, ёруғликнинг 1 кмгача ва ундан кўп тарқалиш узунлиги давомида оптик нуртола ўзагининг ~5 мкмли соҳасида жамланганлиги, бу каби муҳитларда ёруғлик нурланишларининг ночизиқли ўзаро таъсирлашуви ва ўзгаришлари учун қулай шароитлар яратади.

Ҳозирги вақтда дунёнинг нуфузли илмий марказларида юқоридаги ҳолатни ҳисобга олган ҳолда, бу каби оптик нуртолаларнинг оптик ва ночизиқли-оптик хоссаларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Турли хил оптик нуртолалар ва нуртолали интерферометрлар ишлаб чиқилган бўлиб, улар ёруғлик тўлқинларининг турли тўлқин узунликда тарқалишининг тўлқинли режимини назорат қилиш, шунингдек юқори интенсивликли лазер нурланишларининг бу каби тўлқинли муҳит билан ночизиқли ўзаро таъсир интенсивлигини бошқариш имконини беради. Шундай қилиб, юқори самарали ва кам йўқотишларга эга турли хил оптик нуртолали функционал қурилмалар яратишда (тармоқлагичлар, спектрал фильтрлар ва б.) ҳамда оптик алоқа ва маълумотларни қайта ишлаш тизимлари учун нурланиш манбаларини яратишнинг янги физик принципларини ишлаб чиқиш ва ночизиқли хоссаларини тадқиқ этиш бу соҳанинг долзарб муаммоларидан биридир.

Ўзбекистон Республикасида сўнгги йилларда физиканинг долзарб муаммоларидан бирига айланган лазер нурланишларининг оптик нуртолалар билан ўзаро таъсирларини тадқиқ этиш ва у асосида турли оптик тизимлар ҳамда бошқа спектроскопик мақсадларда қўллаш учун нурланишнинг юқори самарали ўзгартиргичларини яратиш борасида жадал илмий тадқиқот ва инновацион ишлар олиб борилмоқда. Хусусан, ташқи физик майдонлар таъсирига сезгир ва белгиланган спектрал хусусиятларга эга ёруғлик тўлқинларини шакллантириш имконини берувчи толали интерферометрларнинг яратилиши бир қатор тадқиқотлар мавзусига айланди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида илмий-тадқиқот ва инновацион фаолиятларни рағбатлантириш, илмий-инновацион ютуқларни амалиётга татбиқ этишнинг самарали механизмларини ишлаб чиқиш вазифалари кўрсатиб ўтилган. Шунга кўра ахборот-коммуникацион тизимлар ва технологиялар элементлар базасини ривожлантириш ҳамда самарадорлик ва юқори тезлик кўрсаткичлари бўйича рақобатбардош нуртолали структураларни яратиш бу соҳадаги муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ–2789-сонли «Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий – ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг: III. «Энергетика, энергоресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши» ва II. «Физика, астрономия, энергетика ва машинасозлик» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Оптик нуртолаларнинг ноёб физик ва тўлқин хоссалари уларни нафақат ёруғлик узатувчилари сифатида, балки лазер нурланишлари параметрларини ўзгартиришда қўллаш борасида ҳам кенг қамровли изланишлар олиб боришга туртки берди. Бир қатор ҳалқаро илмий марказларда оптик алоқа ва маълумотларни қайта ишлаш тизимларида қўллаш учун лазер нурланиши ночизиқли ўзгаришлари физик хоссаларини аниқлаш ва у асосида янги авлод нурланиш манбаларини яратиш мақсадида турли хил оптик толалар ва толали интерферометрларнинг тўлқин ва ночизиқли-оптик хоссалари ўрганилган. Россиялик олимлар академик Е.М. Дианов, А.Я. Карасик, П.В. Мамишев, О.Г. Охотников ҳамда Республикамиз олимлари М.А. Касимджанов, С.А. Бахрамов, Э.А. Захидов ва бошқаларнинг ишларида мазкур масалалар тадқиқ этилган.

Ҳозирги кунда оптик нуртолада лазер нурланишининг тарқалиши ва ўзаро таъсир жараёнининг характеристикаларини ҳамда нуртолада ночизиқли-оптик жараёнлар натижасида генерацияланадиган нурланишлар спектрал-вақтий параметрларини баҳоловчи оптик нур толаларнинг бир қатор таянч физик хоссалари аниқланган.

Ушбу диссертация иши бошланишидан олдин оптик нуртолалар ёрдамида белгиланган спектрал-кинетик характеристикаларга эга нурланиш олиш ва нуртолали интерферометрлар ёрдамида бу каби нурланишларни спектрал фильтрлаш усуллари ҳақида маълумотлар мавжуд эмас эди. Турли ночизиқли эффектлар ҳисобига нур толалардаги нурланиш генерацияси хоссасини ўрганиш бўйича олиб борилган тарқоқ тадқиқотлар ва тўлқин характеристикаларини назорат қилиш қийин бўлган конструкцияли нуртолали интерферометрлар, улар асосида турғун ва юқори аниқликдаги тўлиқ нуртолали қурилмаларни яратиш имконини бермади ва шу сабабли бу каби муҳитлар ночизиқли-оптик хоссаларини аниқлаш ўта муҳимдир.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг ОТ-Ф2-05 «Сунъий фотосинтез тизимларида ёруғлик уйғонишлари ва зарядларнинг кўчиш жараёнлари» (2017–2020), Ф2-ФА-Ф147 «Фотосинтезнинг бирламчи жараёнларида қуёш энергиясини юқори самарали ўзлаштирилишининг физикавий механизмларини ўрганиш» ва ФА-А4-Ф047 «Қишлоқ хўжалиги экинларида фотосинтез самарадорлигини мониторинглаш учун флуоресцент услублари ва асбоб-ускуналарни ишлаб чиқиш» (2015–2017) давлат илмий-техникавий лойиҳалари асосида бажарилган.

Тақиқотнинг мақсади белгиланган спектрал хоссаларга эга ёруғлик нурланишларини олиш учун тўлиқ нуртолали конструкцияларда (оптик нуртола–генератор + оптик нуртола–спектрал фильтр) ёруғлик континуумининг юқори самарали генерацияси ва спектрал фильтрацияси физик шартларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Nd^{3+}:YAG гранатли неодим лазери (100 пс, 1,064 мкм/0,532 мкм, 200 кВт) асосида, нур толали интерферометрларда ёруғлик фильтрациясининг турли режимларини тадқиқ этиш учун, нуртола-генератор, давомий ёруғлик генерацияси берадиган тадқиқот қурилмасини ишлаб чиқиш;

икки толали нуртоладан спектрнинг кўзга кўринадиган ва яқин ИҚ соҳасида ишловчи ажратгич шакллантириш ва уларда ёруғлик континуумини спектраль фильтрлаш жараёнини моделлаштириш усулларини ишлаб чиқиш;

нуртолали ҳалқа ва иккилаган ҳалқа орқали ёруғлик импульслари ўтишининг чизиқли ва ночизиқли режимларини тадқиқ этиш ва бу каби нур толали интерферометрлардаги ўта қисқа импульсларнинг самарали алмашиниши ва ёруғлик узлуксизлиги спектрал фильтрацияси оптимал режимларини аниқлаш;

нуртола икки ёруғлик ўтказувчи ўзаклари орасидаги тўлқин алоқа параметрларини танлаш орқали белгиланган спектр нурланишини ажратиш йўли билан, икки ўзакли нуртоладан тайёрланган тармоқлагичда ёруғлик континуми спектрал фильтрациясини амалга ошириш;

спектрнинг яқин ИҚ 1,3 – 1,7 мкм соҳасида ишловчи нур толали тармоқловчи ёрдамида, тўлқин узунлик бўйича мультиплексирлаш тизими учун полоса кенглиги 1 нм гача бўлган нурланишнинг спектрал модуляциясини шакллантириш.

Тадқиқот объекти сифатида бирмодали оптик нуртолалар ва йўналтиргичли тармоқлагичга эга нуртолали интерферометрлар танланган.

Тадқиқот предмети оптик нуртолаларда лазер нурланиши ўзгаришининг ночизиқли-оптик жараёнлари, нуртолали интерферометрларда ёруғлик импульсларининг алмашиниши ва ёруғлик континуумининг спектрал фильтрацияси ҳисобланади.

Тадқиқот усуллари. Диссертацияда лазер нурланишининг модда билан ночизиқли ўзаро таъсири усули, ёруғлик ўтувчи нуртолаларни бирлаштириб нуртолали интерферометрларни яратиш усули, нуртолали интерферометрларда

ёруғлик континууми генерацияси ва унинг спектрал фильтрациясини спектрал-кинетик тадқиқ этиш усулларидан фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

нуртолали ҳалқа орқали ёруғлик континуумлари ўта қисқа импульсларининг чизиқли ва ночизиқли ўтиш режимлари аниқланган, ҳалқа ўтказиш ва қайтариш коэффициентларининг нурланиш тўлқин узунлиги ва қувватига боғлиқлиги аниқланган;

нуртолали ҳалқада ўтувчи нурланишнинг тармоқланиш коэффициенти ва қувватини танлаш орқали нурланиш ўта қисқа импульсларининг (ўтиш ва қайтиш каналлари орасида) юқори самарали ўзказилиши имкониятлари аниқланган (кучсиз-ассиметрик тармоқлагичли 2 м узунликдаги ҳалқада 950 Вт қувватда ўтказилишнинг максимал даражаси – 10 га эришилган);

илк бор иккиланган нуртолали ҳалқадан ўтувчи ёруғлик континуумининг ҳалқанинг икки тармоқлагичлари тўлқин хоссалари ва нурланиш қувватига боғлиқ бўлмаган ҳолда ўтиш ва қайтиш каналлари орасида симметрик (0,5/0,5) бўлиниши ва амалий аҳамияти аниқланган;

илк бор нуртоланинг унча катта бўлмаган қисмида ёруғлик ўтказувчи ўзакларни эритиб ва чўзиб яқинлаштириш орқали шакллантириладиган икки ўзакли нуртоладан нуртолали тармоқлагич ишлаб чиқилган;

икки ўзакли нуртоладан ясалган нуртолали тармоқлагичда нурланишнинг тор полосасини шакллантириш ёки 1 нм гача кенгликка эга спектр бўйича модуляцияланган нурланиш ҳосил қилиш орқали ёруғлик континуумларини спектрал фильтрлаш имкониятлари кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

оптик нуртолада лазер нурланишларининг юқори самарали ўзгаришларини олиш учун тадқиқот усуллари ва қурилмалари ишлаб чиқилган;

спектрнинг кўринувчи (0,4 – 0,7 мкм) ва яқин инфрақизил (0,7 – 1, 7 мкм) соҳаларида пикосекундли давомийликка эга импульсли ёруғлик континуумлари генерацияси ва нуртолали интерферометрлар ёрдамида уларнинг спектрал-танланган фильтрацияси олинган;

яқин инфрақизил соҳада ишловчи ўта юқори тезликли оптик алоқа учун истиқболли бўлган, ёруғлик континуумларининг спектраль модуляциясида, кенглиги 1 нмгача бўлган ўта тор полосали нурланиш олиш имкониятлари кўрсатилган бўлиб, бу тўлқин узунлиги зичлаштирилган (WDM) кўп тармоқли нуртолали-оптик алоқа тизимлари ривожланиши учун сифат жиҳатидан янги истиқболларни очиб беради.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги оптика ва лазер спектроскопиясининг замонавий юқори аниқликдаги қурилмалари ва тадқиқот усуллари, юқори турғунликдаги уйғотувчи манбалар ва ўлчовчи нурланишлар, шунингдек маълумотларни тўплаш шаклида бокскар-интегратор ёрдамида кўп марта ўлчаш усулларининг қўлланилиши билан асосланган. Тадқиқот маълумотларининг батафсил таҳлили ва уларни нуртолали интерферометрлардаги ёруғлик континуумлари спектрал фильтрация жараёнларини рақамли моделлаштириш натижасида олинган натижалар билан солиштириш, белгиланган спектрал характеристикаларга эга нурланиш ажратиб

олиш учун муқобил физик шароитни аниқлаш имконини берган. Тадқиқот натижалари ва улар таҳлили асосида олинган хулосалар, лазер нурланишининг модда билан ўзаро таъсири назариясининг асосий йўналишлари ва қоидаларига асосланган ҳамда бошқа муаллифлар томонидан олинган муҳим натижалари билан мос келган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти нуртолали-генераторда лазер нурланишларининг ночизиқли ўзгартирилиши асосида белгиланган спектрал-кинетик характеристикаларга эга тўлиқ нуртолали нурланиш манбаи ва унинг нуртолали интерферометрда спектрал фильтрлаш концепциясиининг ишлаб чиқилганлиги билан белгиланган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, таклиф этилган қурилма тўлқин узунлиги етарлича сиқиладиган (WDM) юқори тезликли оптик алоқа ва маълумотларни қайта ишлаш тизимларида нурланиш манбаи сифатида қўлланилиши мумкин. Бу каби қурилманинг тўлиқ нуртолали конфигурацияси, турли қўлланилиш шароитларида ушбу қурилма ишчи характеристикаларининг юқори турғунлигини таъминлаши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Нуртолали ҳалқа ва икки ўзакли нуртоладан тайёрланган тармоқлагичда ёруғлик нурланишларининг ўтиш ва спектрал фильтрациясининг физик шартларини аниқлаш натижалари асосида:

нуртолали ҳалқа ва икки ўзакли нуртоладан тайёрланган тармоқлагичда ёруғлик континуумини ҳосил қилиниши ва спектрал фильтрацияси бўйича олинган натижалар Ф2-ФА-Ф146 рақамли «Фуллеренлар эритмаларида кластер ҳосил бўлиш, ўз-ўзидан йиғилиш ва ўз-ўзидан ташкилланиш жараёнлари» лойиҳада фуллеренларнинг турли эритмаларининг спектрал-кинетик характеристикаларини ўлчашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 26 мартдаги 2/1255-929-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланиши фуллерен эритмалари ютилиш характеристикаларини юқори аниқликда ўлчаш имконини берган;

яратилган нано ва пикосекунд давомийликдаги кенг спектрли (700-1700 нм) нуртолали ёруғлик импульслар генератори ФА-А11-ТО31 рақамли «Экдистерон ва унинг полисинтетик ҳосилалари асосида қандли диабетни даволаш учун самарали воситани яратиш» лойиҳада экдистероидлар каби биологик фаол бирикмаларнинг инфрақизил ютилиш спектрлари ва бошқа оптик хусусиятларини юқори аниқликда ўлчашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 26 мартдаги 2/1255-930-сон маълумотномаси). Яратилган ёруғлик импульслар генераторидан фойдаланиш экдистероид каби биологик фаол бирикмаларни инфрақизил ютилиш спектрлари ва бошқа оптик хусусиятларини юқори аниқликда ўлчаш имконини берган;

спектрнинг кўринарли соҳасидаги ўта қисқа (100 пс) импульслар генератори ФА-А11-ТО31 рақамли «Экдистерон ва унинг полисинтетик ҳосилалари асосида қандли диабетни даволаш учун самарали воситани яратиш» лойиҳада экдистероид типидаги биологик фаол молекулаларни флуоресцент

спектрларини аниқлашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 26 мартдаги 2/1255-930-сон маълумотномаси). Когерент нурланиш манбаининг қўлланилиши спектрнинг кўринарли соҳасидаги флуоресцент спектрлари ёрдамида муҳим биологик фаол бирикмаларни структуравий параметрларини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 12 та ҳалқаро ва республика анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган нашрларда 6 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 28 та расм ва 2 та жадвалдан иборат. Диссертациянинг ҳажми 116 бетни ташкил этади.

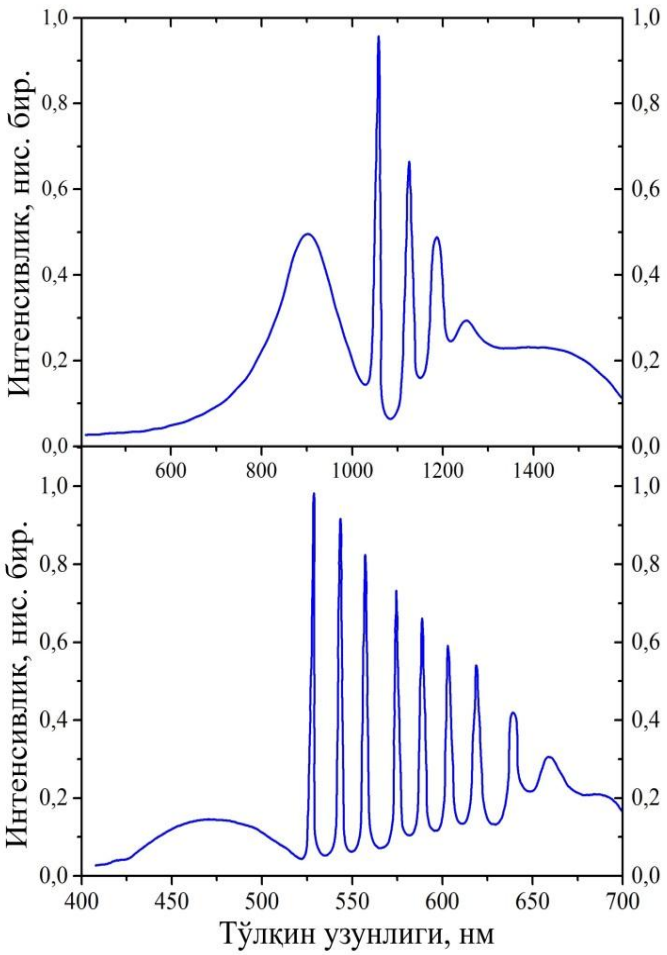
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация иши мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари аниқланган, тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг асосий устувор йўналишларига мослиги, илмий янгилиги кўрсатилган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, улардан амалда фойдаланилганлиги, чоп этилганлиги ва апробацияси ҳамда диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Нуртолали интерферометрлар лазер нурланиши параметрларини қайта ўзгартирувчилар сифатида»** деб номланган биринчи бобида оптик алоқа тизимларида маълумотларни ўта юқори тезликда узоқ масофаларга узатишни амалга оширишни таъминловчи, жуда кичик йўқотишлар ва дисперсияга эга оптик нуртолаларни тадқиқ қилишнинг замонавий ҳолати таҳлил қилинган. Нуртолаларда лазер нурланишининг ночизиқли таъсирлашиши амалга оширилган ва у асосида турли тўлқин узунликларга эга нурланиш генерацияси, хусусан, спектрнинг турли соҳаларида ёруғлик континууми олинган тадқиқотлар кўриб чиқилган. Боғланган икки тўлқин принципига асосан ишлаб чиқилган нуртолали интерферометрлар оптик алоқа ва ахборот узатиш тизимларида турли функционал элементлар сифатида хизмат қилиши мумкинлиги кўрсатиб берилган

«Нуртолали интенрферометрларда лазер нурланишини ўзгартириш жараёнларини тадқиқ қилишнинг тажрибавий методлари» номли иккинчи бобда кам ва бир модали нуртолаларда ёруғлик континууми ҳосил қилиш ва унинг нуртолали интерферометрларда спектрал фильтрацияси жараёнларини ўрганиш учун яратилган тажриба қурилмалари ва методлари, икки ўзакли нуртоладан берилган тўлқин тарқатиш ва спектрал характеристикали

йўналтирилган тармоқлагич тайёлаш портатив қурилмаси ҳамда иккиланган нуртола шакллантириш тавсиф қилинган.



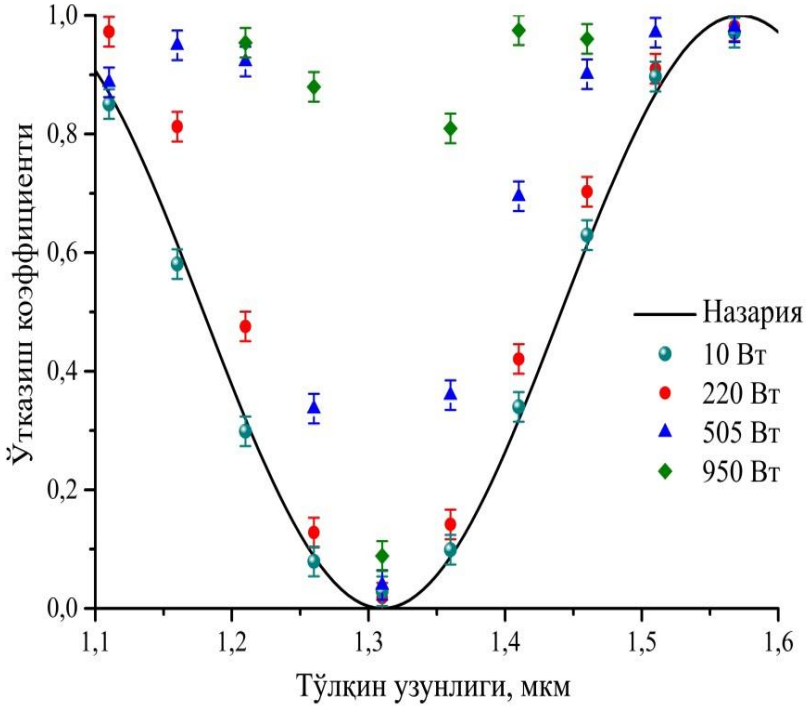
1-расм. Оптик нуртолада 1,064 мкм (а) ва 0, 532 мкм (б) тўлқин узунликдаги лазер нурланиши пикосекунд импульслари билан қўзғатилганда генерация қилинган ёруғлик континууми спектрлари

0,532 ва 1,064 мкм тўлқин узунликларида турғун нурла-ниш берувчи, тажрибаларда фойдаланилган лазер нурлани-ши манбаи (Nd^{3+}:YAG, ЛТИ-501)нинг турли режимлари энергетик ва вақт характерис-тикалар келтирилган. Фаол асллик модуляцияси ва модалар синхронизациясида бундай лазерда пик қуввати 200 кВт гача ва давомийлиги 100 пс гача бўлган импульлар олинган. Мос тажрибаларда лазер генерацияси қувватини ошириш ва спектрал кенглиги-ни торайтиришнинг шартлари аниқланган. Кўринарли (0,4–0,7 мкм) ва яқин ИҚ (0,7–1,7 мкм) спектрал соҳаларда ёруғлик континууми ҳосил қилиш нуртолани мос равишда 0,532 ва 1,064 мкм тўлқин узунликли нурланиш билан қўзғатиш ёрдамида амалга оширилган (1-расм). Бундай континуум самарали ҳосил қилишни таъминловчи нуртолаларнинг тўлқин тарқатиш характеристикалари кўрсатиб ўтилган. Нуртолали қурилмаларни тайёрлаш жараёни спектрлар ўзгаришини назорат қилиш учун турғун узлуксиз ёруғлик манбаи, 0,465, 0,525 и 0,640 мкм тўлқин узунликларида нурланувчи RGB-ёруғлик диодидан ҳам фойдаланилган.

Кичик соҳаларда бир вақтда эритиш ва чўзиш принципида ишловчи икки ўзакли нуртоладан нуртолали қурилма ҳосил қилишда фойдаланилган электрёйли пайвандлаш қурилмаси тўлиқ тавсиф қилинган. Қурилма ҳаракатланувчи узелларини юқори механик аниқлиги, бундай интерферометрлар ўтказиш коэффициентини бевосита тайёрлаш жараёнида бошқариш имконияти ҳамда қўшимча оптик йўқотишларни турли эритиш температурларидаги нуртолани чўзиш тезлигига боғлиқ эканлигини аниқланиши берилган спектрал характеристикаларга эга нуртолали интерферометрлар яратиш имконини берди.

«Оптик нурланиш параметрларини нуртолали ҳалқаларда қайта ўзгартирилиши» номли учинчи бобда ёруғлик тўлқинини нуртолали ҳалқадан

чизиқли ва ночизиқли тартибда ўтиши таҳлил қилинган ва эксперименталь тадқиқ қилинган. A_0 амплитуда ва I_0 ($A_0 = \sqrt{I_0}$) интенсивликка эга нурланиш нутолали ҳалқага киритилганда α бўлиниш коэффициентли тармоқлагичда амплитудалари $A_{cc} = \sqrt{I_{cc}} = \sqrt{\alpha I_0} = \sqrt{\alpha} A_0$ ва $A_{cck} = \sqrt{-I_{cck}} = \sqrt{-(1-\alpha) I_0} = i\sqrt{(1-\alpha)} A_0$ бўлган, мос равишда соат стрелкаси ва унга қарши тарқалувчи икки нурга бўлинади.

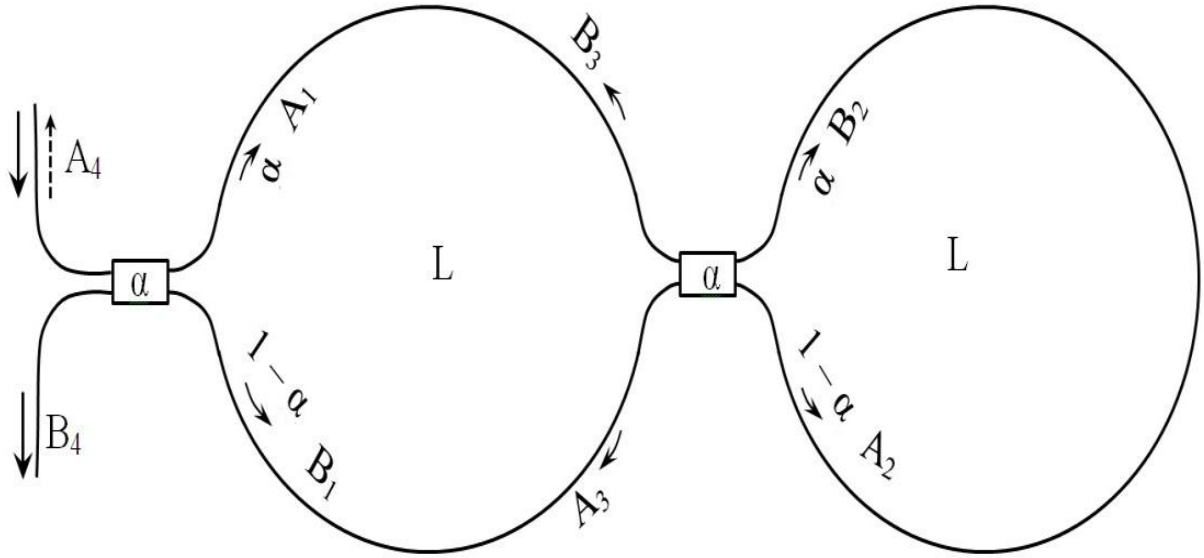


2-расм. Нуртолали ҳалқа ўтказиш коэффициентини (β) тўлқин узунлигига боғлиқлиги.

Нуртолали контурдан ўтгандан сўнг, иккала тўлқинлар бир хил оптик йўлни босиб ўтганда, улар тармоқлагичда яна интерференциялашади ва ҳалқа чиқиш портларида қайтган тўлқин, яъни нурланиш киритилган учидан чиқувчи ҳамда ўтган–қарама-қарши учидан чиқувчи иккита тўлқин ҳосил бўлади. Ушбу тўлқинлар мос равишда $A_{кайт} = 2i\sqrt{[\alpha(1-\alpha)]} A_0$ ва $A_{утган} = (2\alpha - 1) A_0$ амплитудалар билан характерланади. Киритилаётган нурланишнинг катта қувватларида, нуртолали контурда қарама-қарши тўлқинлар интенсивлиги етарлича юқори бўлганда, уларнинг интерференциясига муҳит синдириш кўрсаткичининг ночизиқли ўзгариши ҳисобига юзага келган қўшимча фазалар ҳосил бўлиши таъсир кўрсатади. Бундай шароитларда қайтган ва ўтган тўлқинларнинг амплитудалари киритилаётган нурланиш қувватига боғлиқ бўлади. Бу каби ҳолатнинг таҳлили шуни кўрсатдики, ўта қисқа(~100 пс) ёруғлик импульслари ҳолида ва етарлича (1-2 м) нуртолали контур узунлигида ночизиқли фазалар ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда қуйидагича ўзгаради: $\beta \equiv |A_{пр}|^2 / |A|^2 = 1 - 2\alpha(1-\alpha)\{1 + \cos[(1-2\alpha)\gamma |A_0|^2 L]\}$, бу ерда $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{эфф}$ - нуртоланинг ночизиқлилик коэффициенти ($n_2 = 3{,}2 \times 10^{-16} см^2 / Вт$ - кварц синдириш кўрсаткичининг ночизиқлилик коэффициенти, λ – ёруғлик тўлқин узунлиги, $A_{эфф}$ – нуртоладаги ёруғлик майдонининг кўндаланг кесими юзаси).

Шундай қилиб, нуртолали ҳалқанинг ўтказиш (ҳамда қайтариш) коэффициенти тўлқин узунлиги (тармоқланишнинг спектрал боғлиқлиги учун) билан бир қаторда нурланиш қувватига ҳам боғлиқ бўлади (2-расм).

Ёруғлик оқимларининг нуртолали ҳалқа иккита чиқишлари ўртасида қайта тақсимланиши мумкинлиги ундан ўтган нурланишнинг спектрал характеристикалари ва амплитудасини ўзгартириш имконини беради. Лекин унинг тармоқлагичи тақсимлаш коэффициентини яққол намоён бўладиган спектрал боғлиқлиги туфайли бу қурилмадан нурланишни кенг спектрал соҳада бўлиш керак бўлган ҳолатларда қўллаш мумкин эмас. Иккиланган нуртолали ҳалқа эса худди шундай хусусиятларга эга (3-расм).

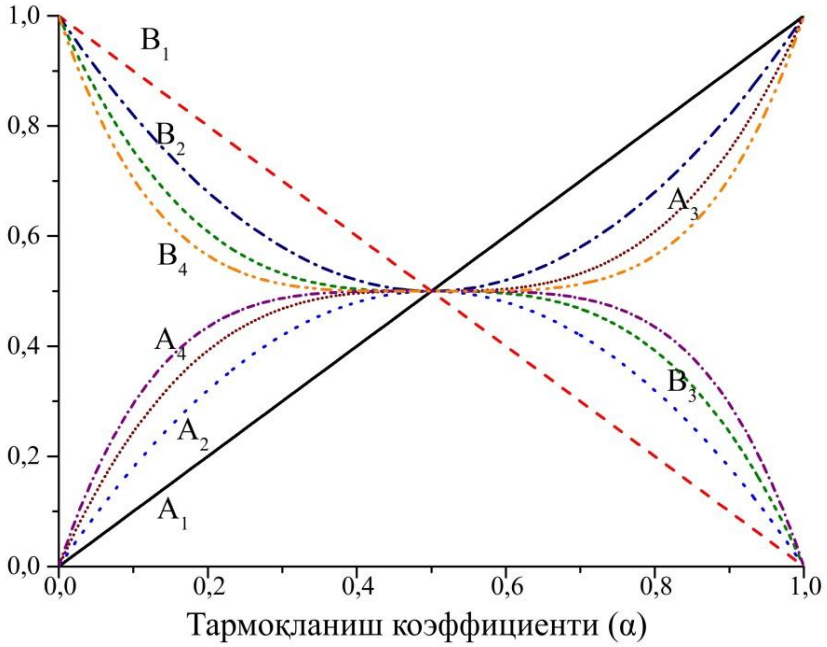


3-расм. Бир ҳил тармоқлагичларга эга иккиланган нуртолали ҳалқа. Стрелкалар билан биринчи ва иккинчи нуртолали контурда ёруғлик тўлқинлари тарқалишининг йўналишлари кўрсатилган.

Бундай конструкцияларда қарама-қарши йўналишда тарқалаётган тўлқинлар биринчи контурдан ўтганидан сўнг ўзаро когерентликни йўқотади ва бир-бири билан интерференциялашмайди, чунки технологик жиҳатдан нуртола қисмлари реал узунликлар фарқи (бир қанча мм) ночизиқли жараёнларда нуртолали генераторда ҳосил қилинган киритилаётган нурланиш когерент узунлигидан катта бўлади. Шунинг учун кейинчалик ёруғлик тўлқинлари гуруҳи умумий интенсивлиги алоҳида тўлқинларнинг скаляр қўшилиши орқали аниқланади. Бундай таҳлил шуни кўрсатдики, ёруғлик тўқинининг кетма-кет иккита тармоқлагичда тўғри ва тескари йўналишларда ўтишида икки қарма-қарши йўналишдаги ёруғлик тўлқинлари гуруҳи умумий интенсивлиги тармоқлаш коэффициентининг кенг қийматларида (ва мос тўлқин узунликларида) аста-секин тенглашиб боради ва киритилган нурланиш иккиланган нуртолали ҳалқада деярли 50/50 нисбатда бўлинади (4-расм).

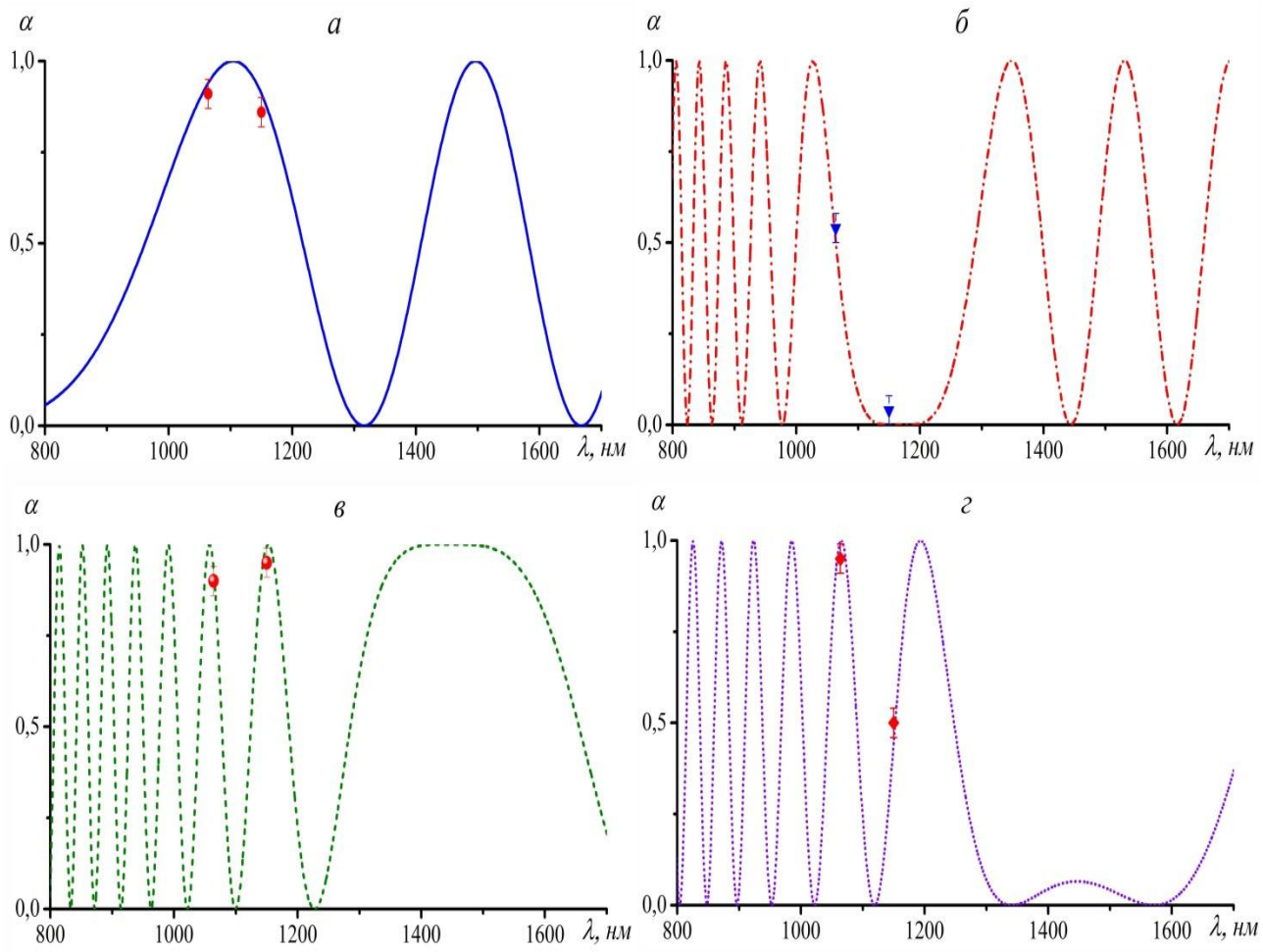
Турли тўлқин тарқалиш параметрларга эга нуртолали ҳалқа намуналарида спектрнинг яқин ИҚ соҳасида ўтказиш спектрлари назарий ҳисобланди ва тажриба ўлчанди. Назарий ҳисоблашлар тармоқлагичнинг ажратиш коэффициенти α ни нуртола ўзак радиуси r ва нуртола яқинлашаётган икки

қисмлари орасидаги нисбий масофага даврий боғлиқлигини $l_н = l / r$: $\alpha = \cos^2\left(kL_{map}\right)$ $k = \dfrac{\lambda V}{4n_0 r^2}$ $\cdot \exp\left[-\left(c_0 + c_1 l_н + c_2 l_н^{\,2}\right)\right]$- тўлқин боғланганлиги коэффициенти, бу ерда $c_0 = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2$, $c_1 = -0,7769 + +1,2252V - 0,0152V^2$ ва $c_2 = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2$) ҳисобга олган ҳолда амалга оширилди. Турли r и L_{map} қийматларига ҳалқаларнинг юқоридаги формулалардан фойдаланган ҳолда ҳисобланган ўтказиш спектрлари ва унинг тажрибада ўлчанган алоҳида қийматлари 5-расмда кўрсатилган. Назарий ҳисобланган ва тажрибада ўлчанган ўтказиш қийматларни етарлича аниқ мос келиши фойдаланилган ёндашувнинг тўғри эканлигини тасдиқлайди ва берилган тўлқин тарқалиш характеристикаларига эга нуртолали ҳалқада ёруғлик континууми спектрал фильтрацияси имкониятларини кўрсатиб беради.



4-расм. Иккиланган нуртолали ҳалқада қарама-қарши тарқалаётган тўлқинлар (тўлқин белгиланиши 3-расмга мос равишда) нисбий интенсивлигини тармоқлагич ажратиш коэффициенти α га боғлиқлиги

Нуртолали ҳалқага бир вақтда кетма-кет юқори интенсивликли модуляцияловчи ва кам интенсивликли модуляцияланувчи импульслар киритилганда синдириш кўрсаткичи коэффициентини ночизиқли ўзгариши ҳисобига бир каналдан иккинчисига импульсларнинг ўтказилишига эришилди (қайтаётган тўлқиндан ўтаётган тўлқинга). Махсус оптик импульслар-солитонларни нуртолали ҳалқада самарали ўтказилиш ва мультиплексорларни таъминловчи физик шароитлар таҳлил қилинди. Нуртола-генератор ва нуртолали ҳалқадан фойдаланиб фемтосекунд солитонлар ҳосил қилиш ва ўтказиш схемаси таклиф қилинди.

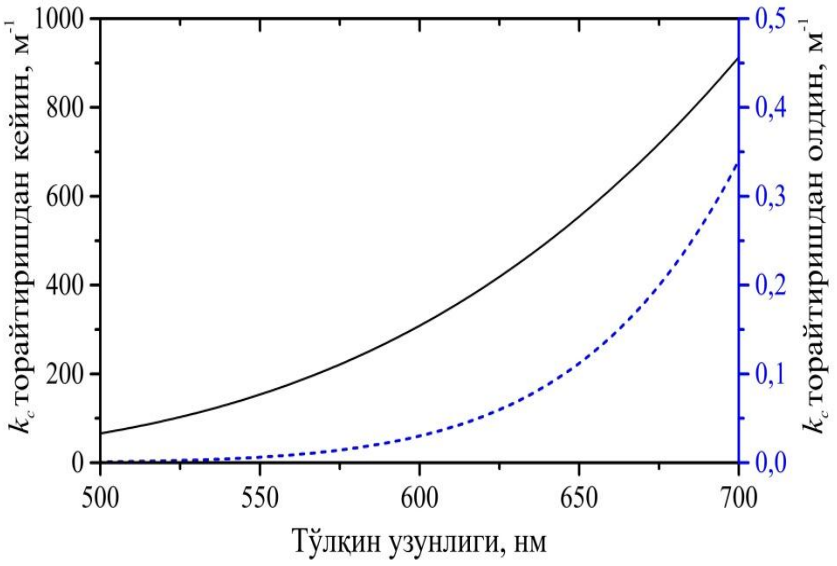


5-расм. Турли тўлқин тарқатиш характеристикалари қийматларида ҳисобланган нуртолали ҳалқанинг ўтказиш коэффициенти спектри: (а) $L_{тар} = 0,5$ **см,** $r = 2,5$ **мкм,** $l_н = 4$**; (б);** $L_{тар} = 1$ **см,** $r = 3$ **мкм,** $l_н = 4$**; (в)** $L_{тар} = 1,2$ **см,** $r = 3$ **мкм,** $l_н = 3$**; ва (г)** $L_{тар} = 1$ **см,** $r = 3$ **мкм,** $l_н = 2,5$**. Спектрда нуқталар билан ўтказишнинг 1,064 мкм ва 1,15 мкм тўлқин узунликларидаги тажрибавий қийматлари кўрсатилган.**

«Оптик нурланиш параметрларини икки ўзакли нуртолада ўзгариши» номли тўртинчи бобда икки ўзакли нуртоладан унинг учида эритиш ва чўзиш йўли билан шакллантирилган нуртолали тармоқлагичда спектрнинг кўринарли ва яқин ИҚ соҳаларида ёруғлик континууми спектрал фильтрацияси характеристикалари тадқиқ қилинган. Бу каби нуртола икки ёруғлик тарқалувчи ўзаклари тарқалаётган тўлқинларнинг ўзаро туннел алоқаси модели асосида нуртола тўлқин тарқатиш параметри V нинг 2.405 яқин ва ўзаклар орасидаги нисбий масофанинг амалий муҳим қийматларида нуртолали алоқа коэффициэнтининг қуйидагича соддалаштирилган аналитик кўриниши олинди:

$k_c = \dfrac{\pi V}{2kn_1r^2}\exp\left[-\left(c_0 + c_1\bar{d} + c_2\bar{d}^2\right)\right]$, бу ерда $c_0 = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2$,

$c_1 = -0,7769 + 1,225V - 0,0152V^2$ ва $c_2 = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2$.

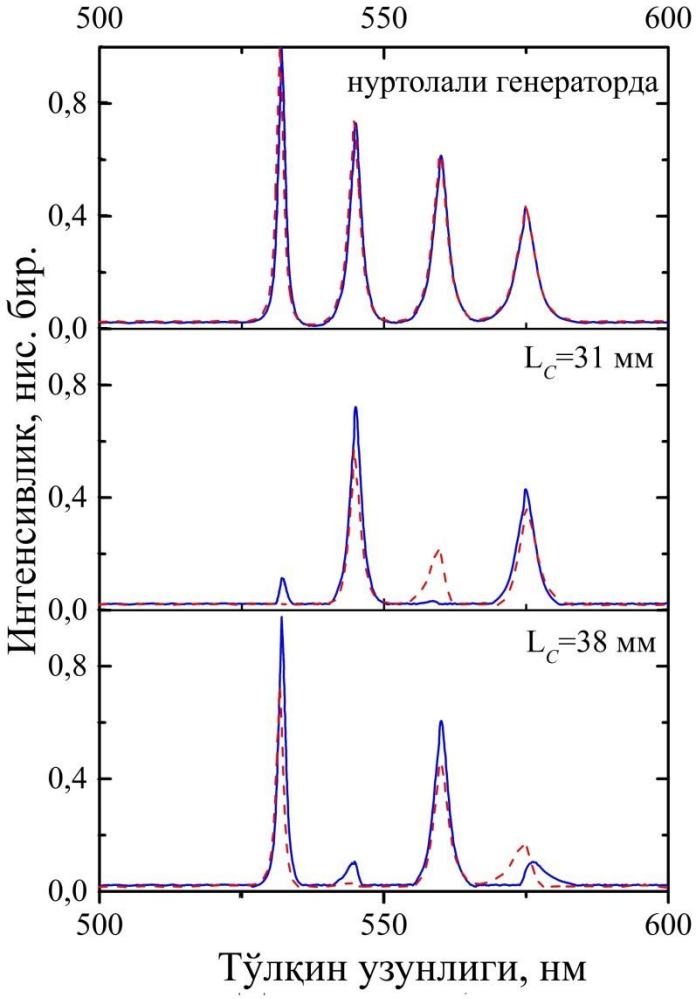


6-расм. Спектрнинг кўринарли соҳаси учун ишлаб чиқилган икки ўзакли нуртолада нуртолали алоқа коэффициентини унинг диаметри икки марта торайишидан олдин (штрих чизиқ) ва кейин (узлуксиз чизиқ) спектрал боғлиқлиги

Етарлича узунликка (~2 м) эга икки ўзакли нуртола бир ўзагида ҳосил қилинган ёруғлик континууми унинг учида шакллантирилган тармоқлагичда k_c қийматларига боғлиқ ҳолда икки ўзакда тақсимланади. k_c нинг ўзаклар орасидаги масофага кучли эксоненциал боғлиқлиги нурланишни ўзаклар ўртасида ўтказилиши тезлигини ушбу тўлқин ўтказиш коэффициентларига критик боғлиқлигини кўрсатади. 6-расмда спектрнинг кўринарли соҳаси учун ишлаб чиқилган нуртоланинг эркин узунликларида ва унинг диаметрини икки марта торайтирилгандан сўнг тармоқланиш коэффициентини спектрал боғлиқлиги кўрсатилган. Расмдан кўриниб турибдики, тармоқланиш коэффициентининг кескин ортиши тўлқин узунлигининг ортиши ҳамда нуртола ўзаги диаметрининг кичрайишида кузатилиб, диаметрнинг икки марта кичрайиши икки ўзак ўртасидаги нуртолали алоқа интенсивлигининг уч даражадан кўпроқ ошишига сабаб бўлади. k_c(λ худди шундай боғлиқлиги спектрнинг ИҚ соҳаси учун ишлаб чиқилган нуртолада ҳам аниқланди.

Тармоқлигичнинг торайтирилган қисмида аниқланган нуртолали алоқа боғлиқлиги спектрнинг кўринарли ва яқин ИҚ соҳаларида ёруғлик континуумининг берилган спектрал характеристикаларга эга спектрал фильтрациясини амалга ошириш имконини берди.

7-расмда нуртола-генераторда λ=0,532 мкм нурланиш билан қўзғатилганда ҳосил қилинган нурланишнинг ҳисобланган ва тажрибада ўлчанган ҳамда уни 31 (б) ва 38 мм (в) тармоқлагичлардан ўтгандан кейинги спектрлари кўрсатилган. Шундай қилиб, тармоқлагич нур ўтказиш параметрларини (мазкур ҳолда нуртолали алоқа соҳаси узунлиги) ўзгартириб берилган спектрли спектрал фильтрацияни амалга ошириш мумкин. Ҳисобланган ва тажрибада олинган спектрларни сифат жиҳатдан мос келиши k_c(λ) формула учун киритилган шартларни тўғри эканлигини тасдиқлайди.



7-расм. Икки ўзакли нуртолада 0,532 нм нурланиш билан қўзғатилганда 31 ва 38 ммли тармоқлагичлардан ўтишдан олдин («а») ва (мос равишда «б» ва «б») олинган кенг полосали ёруғлик спектрлари. Қизил штрих чизиқ – ҳисобланган спектрлар, кўк узлуксиз чизиқ – тажриба маълумотлари.

Нурланишни икки ўзакли нуртолада спектрал фильтрацияси спектрнинг яқин ИҚ соҳаси учун ишлаб чиқилган нуртолада ҳам амалга оширилди. Шу билан бир қаторда $k_c(\lambda)$ нинг анча юқори қийматлари сабабли бундай фильтрация спектрал танлаши анча юқори бўлди, яъни спектр модуляцияси тўқин узунлигининг кичик даврларига эга бўлди. Ушбу ҳолат ажратилган спектрал полосаларни WDM алоқа тизимларидаги каналлар зичлашишига яқин жойлаш-тириш имкониятларини кўрсатади. Амалга оширил-ган ҳисоблашларга кўра тармоқлагич узунлиги 31 мм бўлганда кўринарли соҳада спектр модуляцияси даври-ни 10 нмгача кичрайтириш мумкин, ИҚ соҳа нуртола-сида эса 20 мм да бу кўрсаткич 0,8 нм гачани ташкил этди. Кўрса-тилган тармоқлагич узун-ликларини амалиётда бемалол олиш мумкинлиги ёруғлик континууми нурланишини спектрал фильтрацияси ва ажратиб олинган нурланишни модуляцияланган спектрини таклиф қилинган схемаси спектрнинг яқин ИҚ соҳасида юзлаб каналларга эга WDM алоқа линияларни зичлаштириш имконини беради.

ХУЛОСА

1. Нуртолали ҳалқа кўринишидаги нуртолали–оптик Саняк интерферометрида икки қарама-қарши тарқалаётган тўлқинлар фазаларнинг ночизиқли ўзгариши спектрнинг яқин ИҚ (700-1700 нм) соҳасида ёруғлик континууми ўтиши ва ўтказиш спектрини сифат нуқтаи назарида ўзгаришига олиб келиши мумкин: ҳалқа тўлқин тарқатиш характеристикалари ва ёруғлик қувватини 10 кВтгача ошириш йўли билан берилган хусусиятли бу каби қурилма ўтказишини спектрал танланган ҳолда ўзгартириш мумкин.

2. Икки нуртолали ҳалқаларни кетма-кет бирлаштириш орқали ҳосил қилинган иккиланган нуртолали ҳалқа кираётган ёруғлик континуумининг ўтган ва қайтган қисмларини уларнинг спектрал таркибидан мустақил равишда, оптик тарқалиш йўлларини турличалиги туфайли ўзаро когерентликни йўқотилиши сабабли ёруғлик тўлқинлари амплитудаларини скаляр қўшилиши ҳисобига тенг (50/50) иккига ажратади.

3. 1-2 м узунликка ва тармоқлагичининг бошқарилувчи тўлқин тарқатиш параметрларига эга нуртолали ҳалқа ёруғлик континуумида ёруғлик полосалари шакллантириш учун самарали спектрал фильтр сифатида хизмат қилиши мумкин. Тармоқлагич узунлиги ва тармоқлагични шакллантирувчи боғланган нуртолалар орасидаги масофани танлаш йўли билан нурланишни даврий модуляцияси ва тор (10 нм гача) полосаларни ажратиб олиш мумкинлиги уларни бошқарилувчи тўлқин узунлик ва линия кенглигига эга нурланиш манбалари сифатида қўллашнинг янги имкониятларини очиб беради.

4. Икки ўзакли нуртоладан унинг диаметрини торайтириш ва ёруғлик тарқатувчи ўзакларини яқинлаштириш йўли билан ~1 см масофада тайёрланган йўналтирилган тармоқлагичда ёруғлик континууми спектарл фильтрацияси йўли билан бошқарилувчи спектрли нурланиш олишни амалга ошириш мумкин.

5. Икки ўзакли нуртолада ўзаклар ўртасидаги нуртолали алоқа коэффициентини ўзак диаметри ва улар орасидаги масофага критик боғлиқлиги бу параметрларни кичик ўзгартириш орқали ёруғлик тўлқинларини икки ўзакда турли тарқалиш режимлари: квазимустақилдан ($k=0,35$ м$^{-1}$) 1см масофада ёруғлик энергиясини бир ўзакдан иккинчи ўзакка тўлиқ ўтказилиши имкониятига эга кучли боғланган ($k\approx1000$ м$^{-1}$) амалга ошириш имконини беради.

6. Нуртола-генератор ва нуртола фильтрдан ташкил топган икки ўзакли нуртола асосидаги тўлиқ нуртолали қурилма ИҚ нурланиши (1,064 мкм) билан қўзғатилганда спектрнинг 0,7-1,7 мкм соҳасида бошқарилувчи спектрга эга ўта кенг полосали нурланиш олинди. Бу каби қурилмада керакли тармоқлагич узунлигини танлаш йўли орқали оптик нуртола минимал йўқотишлар (1,55 мкм) ва минимал дисперсия (1,3 мкм) соҳасида 1 нм гача даврга эга спектр бўйича модуляцияланган нурланиш олиш мумкин.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ТАЖИБАЕВ ИЛХОМЖОН ИБРОХИМЖОНОВИЧ

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

01.04.05 – Оптика

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

Ташкент–2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.3.PhD/FM129.

Диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета по адресу www.iplt.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyonet.uz.

Научный руководитель:	**Эркин Агзамович Захидов** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Кадиров Мумин Кадирович** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
	Очилов Одил доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	**Националный Университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «____» мая 2019г. в 14^{00} часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Тел./Факс: (+99871) 262–32–54, e-mail:info@iplt.uz.

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

Автореферат диссертации разослан «____» мая 2019 года.

(Реестр протокола рассылки _____ от «_____» мая 2019 года).

Х.Б.Ашуров
председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Д.Т.Усманов
учёный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Б.Е.Умирзаков
председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы. На сегодняшний день в мире современные оптические волокна на основе плавленого кварца, характеризующиеся предельно низкими оптическими потерями и минимальной дисперсией в ближней инфракрасной области спектра (1,0–1,8 мкм), позволили разработать на их основе новые, оптические системы передачи информации со скоростью более 1 Тбит/с. Это открывает уникальные возможности для качественного повышения быстродействия и производительности информационно-коммуникационных и вычислительных систем. Вместе с тем, специфическая геометрия оптического волокна, в котором свет на протяжении всей его длины распространения, вплоть до 1 км и более, сосредоточен в области сердцевины диаметром всего ~5 мкм, создает благоприятные условия для нелинейного взаимодействия и преобразования светового излучения в такой среде.

В настоящее время, учитывая указанное выше обстоятельство, во многих научных центрах мира интенсивно изучаются оптические и нелинейно-оптические свойства таких волокон. Были разработаны различные типы волокон и волоконных интерферометров, позволяющих контролировать волноводный режим распространения световых волн с различными длинами волн, а также управлять интенсивностью нелинейного взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с такой волноводной средой. Таким образом, были разработаны различные волоконные функциональные устройства (ответвители, спектральные фильтры и пр.) с высокой эффективностью и низкими потерями, а также новые физические принципы создания источников излучения для систем оптической связи и обработки информации – волоконные генераторы.

В Республике Узбекистан также активно ведутся работы по исследованию взаимодействия лазерного излучения с оптическим волокном и разработке на этой основе высокоэффективных преобразователей излучения для применения в различных оптических системах и в других спектроскопических целях. В частности, предметом ряда исследований стала разработка волоконных интерферометров, имеющих высокую чувствительность к воздействию внешних физических полей и позволяющих сформировать световые волны с заданными спектральными свойствами. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан поставлены задачи по поддержке научно-исследовательской и инновационной деятельности, а также эффективных механизмов реализации научных и инновационных разработок. Одной из важнейших научно-технических задач в этом плане являются развитие элементной базы информационно-коммуникационных систем и технологий и создание доступных по ценовым показателям и конкурентоспособных волоконных структур для реализации таких систем с предельными показателями производительности и скорости.

Данная диссертационная работа в определённой степени соответствует задачам, предусмотренным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию

Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.» и в Постановлении № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной сфере деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан – III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Уникальные физические и волноводные свойства оптических волокон стимулировали работы по всестороннему изучению возможностей их применения не только в качестве среды для передачи света, но и для преобразования параметров лазерного излучения. В нескольких международных научных центрах были исследованы волноводные и нелинейно-оптические свойства различных типов волокон и волоконных интерферометров для определения физических свойств нелинейного преобразования в них лазерного излучения и создания на этой основе нового типа источника излучения для систем оптической связи и обработки информации. В этом направлении исследования проводили зарубежные учёные Р. Столен, Ч. Лин, К. Доран, Д. Вуд российские учёные Е.М. Дианов, А.Я. Карасик, П.В. Мамишев, О.Г. Охотников, а также учёные нашей республики М.А. Касымджанов, С.А. Бахрамов, Э.А. Захидов и др. и получили очень важные результаты.

К настоящему времени выявлены многие базовые физические свойства волокон, определяющие характеристики процессов распространения и взаимодействия лазерного излучения с волокном, а также спектрально-временные параметры излучения, генерируемого в нелинейно-оптических процессах в волокнах.

Однако до начала работ по настоящей диссертации отсутствовала информация о методах получения с помощью оптических волокон излучения с заданными спектрально-кинетическими характеристиками, а также спектральной фильтрации такого излучения с помощью волоконных интерферометров. Разрозненные работы по изучению свойств генерации излучения в волокнах за счет различных нелинейных эффектов и имеющиеся конструкции волоконных интерферометров со слабо контролируемыми волноводными характеристиками не позволяли ставить задачу по созданию стабильных, высокоточных цельно-волоконных устройств на их основе.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках исследований следующих проектов Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз: № ОТ-Ф2-05 «Процессы переноса светового возбуждения и зарядов в системах искусственного фотосинтеза» (2017–2020), № Ф2-ФА-Ф117 «Изучение физических механизмов высокоэффективного преобразования

солнечной энергии в первичных процессах фотосинтеза» (2012–2016) и № ФА-А4-Ф047 «Разработка флуоресцентных методов и приборных средств мониторинга эффективности фотосинтеза в сельхозкультурах» (2015–2017).

Целью исследования является определение физических условий высокоэффективной генерации и спектральной фильтрации светового континуума в цельно-волоконных конструкциях (волокно–генератор+волокно–спектральный фильтр) для получения светового излучения с заданными спектральными свойствами.

Задачи исследования:

разработать экспериментальную установку на основе неодимового лазера на гранате, Nd^{3+}:YAG, с модуляцией добротности и синхронизацией мод (100 пс, 1,064 мкм/0,532 мкм, 200 кВт) и волокна-генератора, генерирующего световой континуум для исследования различных режимов светового фильтрования в волоконных интерферометрах;

разработать методы формирования ответвителя из двухжильного волокна и моделирования процессов спектральной фильтрации светового континуума в нем в видимой и ближней ИК области спектра;

исследовать линейный и нелинейный режимы прохождения световых импульсов через волоконную петлю и двойную петлю, определить оптимальные режимы эффективного переключения сверхкоротких импульсов и спектральной фильтрации светового континуума в таких волоконных интерферометрах;

осуществить спектральную фильтрацию светового континуума в ответвителе из двухжильного волокна с выделением излучения заданного спектра путем подбора параметров волноводной связи между двумя его световедущими жилами;

сформировать модулированное по спектру излучение с шириной полос вплоть до 1 нм для систем мультиплексирования по длинам волн с помощью волоконного ответвителя в ближней ИК области спектра, 1,3–1,7 мкм.

Объектом исследования служили одномодовые оптические волокна и волоконные интерферометры с направленным ответвителем.

Предметом исследования являлись нелинейно-оптические процессы преобразования лазерного излучения в волокнах, переключение световых импульсов и спектральная фильтрация светового континуума в волоконных интерферометрах.

Методы исследования: методы нелинейного взаимодействия лазерного излучения с веществом, методы формирования волоконных интерферометров путем сближения световедущих жил, спектрально-кинетические методы исследования генерации светового континуума и его спектральной фильтрации в волоконных интерферометрах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены линейный и нелинейный режимы прохождения сверхкоротких импульсов светового континуума через волоконную петлю, установлены зависимости коэффициентов прохождения и отражения петли от длины волны и мощности излучения;

выявлена возможность высокоэффективного переключения сверхкоротких импульсов излучения в волоконной петле (между каналами прохождения и отражения) путем подбора коэффициента ответвления и мощности проходящего излучения (в петле длиной 2 м со слабо-асимметричным ответвителем при мощности 950 Вт достигнута максимальная степень переключения – 10);

впервые определено, что световой континуум, проходящий через двойную волоконную петлю, независимо от волноводных характеристик двух его ответвителей и мощности излучения разделяется симметрично (0,5/0,5) между каналами прохождения и отражения, и показана его практическая значимость;

впервые разработан волоконный ответвитель из двухжильного волокна, формируемый путем сближения двух световедущих жил при сплавлении и растяжке небольшого участка такого волокна;

показана возможность спектральной фильтрации светового континуума в волоконном ответвителе из двухжильного волокна с образованием узких полос излучения или формирования модулированного по спектру излучения шириной вплоть до 1 нм.

Практические результаты исследования. Разработаны методы и экспериментальные устройства для высокоэффективного преобразования лазерного излучения в оптических волокнах. Получена генерация светового континуума в видимой (0,4–0,7 мкм) и ближней ИК (0,7–1, 7 мкм) областях спектра с пикосекундной длительностью импульсов и их спектрально-селективная фильтрация с помощью волоконных интерферометров. При спектральной модуляции светового континуума в перспективной для сверхвысокоскоростной оптической связи в ближней (1,3–1,7 мкм) ИК области показана возможность получения излучения со сверхузкой шириной полосы вплоть до 1 нм, что открывает качественно новые перспективы для развития многоканальных систем волоконно-оптической связи с уплотнением по длинам волн (WDM).

Достоверность результатов исследований обосновывается применением современных высокоточных приборов и экспериментальных методов оптической и лазерной спектроскопии, высокостабильных источников возбуждающего и тестирующего излучения, а также методов многократного измерения с накоплением типа бокскар-интегрирования. Тщательный анализ экспериментальных данных и их сравнение с результатами численного моделирования процесса спектральной фильтрации светового континуума в волоконных интерферометрах позволили выявить оптимальные физические условия для выделения излучения с заданными спектральными характеристиками. Выводы, полученные из экспериментальных результатов и их анализа, основываются на базовых подходах и положениях теории взаимодействия лазерного излучения с веществом и согласуются с ключевыми результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке концепции цельно-волоконного источника излучения с заданными спектрально-кинетическими характеристиками на основе нелинейного

преобразования лазерного излучения в волокне-генераторе и его спектральной фильтрации в волоконном интерферометре.

Практическая значимость результатов исследований связана с тем, что предложенное устройство может применяться в качестве источника излучения в системах высокоскоростной оптической связи и обработки информации с уплотнением каналов передачи по длинам волн, WDM. Цельно-волоконная конфигурация такого устройства может обеспечить высокую стабильность его рабочих характеристик в различных условиях эксплуатации.

Внедрение результатов исследования. По результатам определения физических условий прохождения и спектральной фильтрации светового излучения в волоконной петле и ответвителе из двухжильного волокна:

научно-технические результаты по генерации светового континуума и его спектральной фильтрации в волоконной петле и ответвителе из двухжильного волокна использовались при исследовании спектрально-кинетических характеристик различных растворов фуллеренов в фундаментальном проекте Ф2-ФА-Ф146 (Справка 2/1255-929 Академии наук Республики Узбекистан от 26 марта 2019 года). Использование этих результатов позволило определить с высокой точностью спектрально-кинетические характеристики поглощения растворов фуллерена и образованных кластеров;

разработанный волоконный генератор широкополосных (700–1700) световых импульсов нано- и пикосекундной длительностей использован в прикладном проекте ФА-А11-ТО31 при прецизионных измерениях спектров ИК поглощения и других оптических свойств биологически активных молекул типа экдистероидов (справка 2/1255-930 Академии наук Республики Узбекистан от 26 марта 2019 года). Использования разработанного генератора световых импульсов позволило с высокой точностью измерить ИК-спектры поглощения и другие оптические характеристики биологически активных молекул типа экдистероидов.

генератор сверхкоротких импульсов (100 пс) в видимой области спектра использован в исследованиях флуоресцентных спектров биологически активных молекул типа экдистероидов (справка 2/1255-930 Академии наук Республики Узбекистан от 26 марта 2019 года). Применение источника когерентного излучения позволило определить их структурные параметры таких важнейших биологически-активных веществ с помощью спектров флуоресценции в видимой области спектра.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 международных и республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. Результаты диссертации опубликованы в 18 научных трудах, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включая 28 рисунков и 2 таблицы. Текст диссертации изложен на 116 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, определены объект, предмет и основные методы исследования, а также связь темы исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан; сформулирована научная новизна исследований, обоснованы достоверность результатов диссертационной работы и их научно-практическая значимость, представлены данные о внедрении полученных результатов, апробации работы, объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Волоконный интерферометр как преобразователь параметров лазерного излучения**» проанализировано состояние исследований оптических волокон как волноводов с предельно низкими потерями и дисперсией, позволяющих осуществить сверхбыструю передачу данных на дальние расстояния по оптическим системам связи. Рассмотрены работы, в которых реализовано нелинейное взаимодействие лазерного излучения в волокне, и на его основе получена генерация излучения с различными длинами волн, в том числе световой континуум в различных областях спектра. Показано, что волоконные интерферометры, разработанные на принципе взаимодействия двух связанных волн, могут служить в качестве различных функциональных элементов систем оптической связи и передачи информации.

Во второй главе «**Экспериментальные методы исследования процессов преобразования параметров лазерного излучения в волоконных интерферометрах**» описаны экспериментальные установки и методы, разработанные для изучения процессов генерации светового континуума в маломодовых и одномодовых волокнах и его спектральной фильтрации в волоконных интерферометрах, портативная установка для изготовления направленного ответвителя из двухжильного оптического волокна с заданными волноводными и спектральными характеристиками, а также для формирования двойной волоконной петли.

Описаны энергетические и временные характеристики использованного лазерного источника излучения (Nd^{3+}:YAG, ЛТИ-501) в различных режимах, обеспечивающих стабильную генерацию излучения на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм. При активной модуляции добротности и синхронизации мод в таком лазере получены импульсы пиковой мощностью до 200 кВт и длительностью 100 пс. Определены условия дальнейшего повышения мощности генерации лазера и сужения спектральной ширины в соответствующих экспериментах. Генерация светового континуума в видимой (0,4–0,7 мкм) и ближней ИК (0,7–1,7 мкм) областях спектра достигнута при накачке волокон излучением с длинами волн соответственно 0,532 и 1,064 мкм (рис. 1). Представлены волноводные характеристики волокон, обеспечивающие высокую эффективность генерации такого континуума. Для контроля изменений спектров пропускания волоконных интерферометров в процессе их

изготовления также применялся RGB-светодиод, излучающий на длинах волн 0,465, 0,525 и 0,640 мкм.

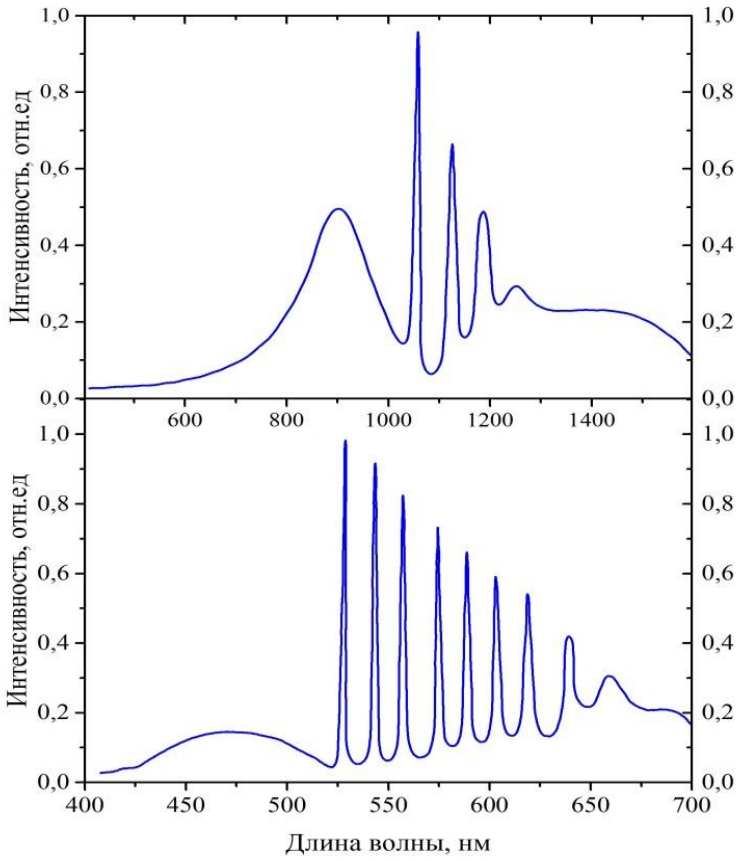


Рис. 1. Спектры светового континуума, генерированного в оптическом волокне при накачке пикосекундными импульсами лазерного излучения на длинах волн 1,064 мкм (а) и 0, 532 мкм (б)

Подробно описана установка электродуговой сварки для изготовления волоконного интерферометра из двухжильного волокна (ответвителя), работающая на принципе одновременного сплавления и вытяжки небольшого его участка. Высокая механическая точность подвижных узлов установки, возможность контроля коэффициента пропускания такого интерферометра непосредственно при его изготовлении, а также экспериментально установленная зависимость избыточных оптических потерь от скорости вытяжки волокна при различных температурах сплавления позволили изготовить волоконные интерферометры с заданными спектральными характеристиками.

В третьей главе «**Преобразование параметров оптического излучения в волоконной петле**» проанализировано и экспериментально исследовано прохождение световой волны через волоконную петлю в линейном и нелинейном режимах. При введении в петлю через одну из его концов излучения амплитудой A_0 и интенсивностью I_0 ($A_0 = \sqrt{I_0}$) в ответвителе с коэффициентом деления α разделяется на две волны с амплитудами $A_{чс} = \sqrt{I_{чс}} = \sqrt{\alpha I_0} = \sqrt{\alpha} A_0$ и $A_{пчс} = \sqrt{-I_{пчс}} = \sqrt{-(1-\alpha) I_0} = i\sqrt{(1-\alpha)} A_0$, распространяющиеся соответственно по и против часовой стрелки,. После обхода волоконного контура, когда обе волны проходят идентичные оптические пути, они еще раз интерферируют в ответвителе и на выходе петли образуются две волны – отраженная волна, выходящая через конец, куда было введено излучение, и прошедшая – через противоположный конец.

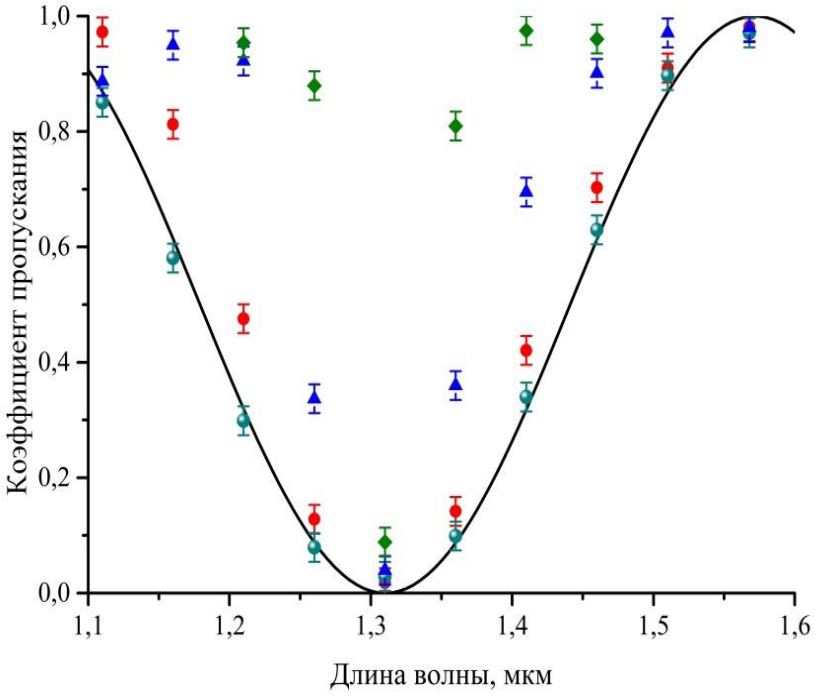


Рис. 2. Зависимость пропускания волоконной петли (β) от длины волны излучения

Эти волны характеризуются амплитудами соответственно $A_{отр} = 2i\sqrt{[\alpha(1-\alpha)]}A_0$ и $A_{пр} = (2\alpha - 1)A_0$. При больших мощностях вводимого излучения, когда интенсивности двух встречных волн в волоконном контуре достаточно высоки, на их интерференцию будут влиять дополнительные набеги их фаз за счет нелинейного измерения показателя преломления среды. В этих условиях амплитуды отраженной и прошедшей волн будут зависеть от мощности введенного излучения. Анализ такого случая показал, что в случае сверхкоротких (~100 пс) световых импульсов и достаточно длинного (L = 1–2 м) волоконного контура пропускания петли с учетом нелинейного набега фаз будет изменяться как $\beta \equiv |A_{пр}|^2 / |A|^2 = 1 - 2\alpha(1-\alpha)\{1 + \cos[(1-2\alpha)\gamma |A_0|^2 L]\}$, где $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{эфф}$ – коэффициент нелинейности волокна ($n_2 = 3{,}2\times10^{-16} см^2/Вт$ – коэффициент нелинейного показателя преломления плавленого кварца, λ – длина волны света, $A_{эфф}$ – площадь поперечного сечения светового поля в волокне). Таким образом, пропускание (а также отражение) волоконной петли зависит от длины волны (из-за спектральной зависимости ответвления), а также от мощности излучения (рис. 2).

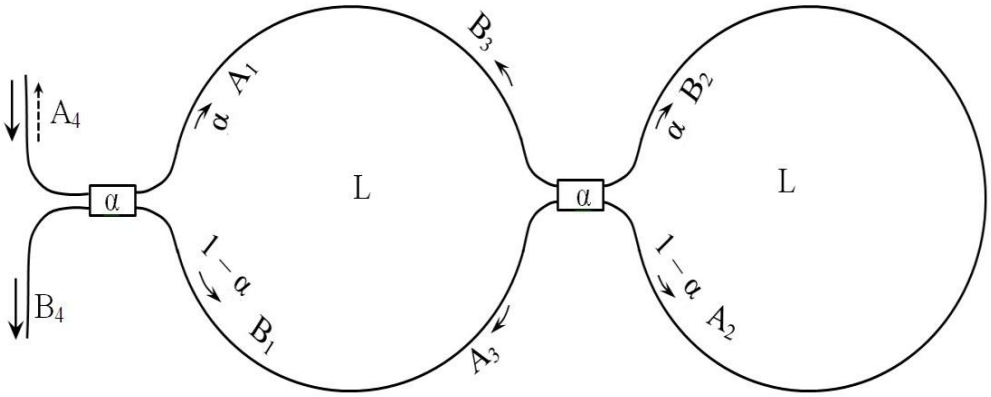


Рис. 3. Двойная волоконная петля с идентичными ответвителями. Стрелками показаны направления распространения световых волн в первичном и вторичном волоконном контуре

Такая возможность, перераспределения световых потоков между двумя выходами волоконной петли позволяет изменить спектральные характеристики и амплитуду прошедшего через нее излучения. Но из-за сильно выраженной спектральной зависимости коэффициента деления его ответвителя такое устройство нельзя применять в случаях, когда необходимо разделять излучение на две равные части в широкой спектральной области. Именно таким свойством обладает двойная петля (рис. 3).

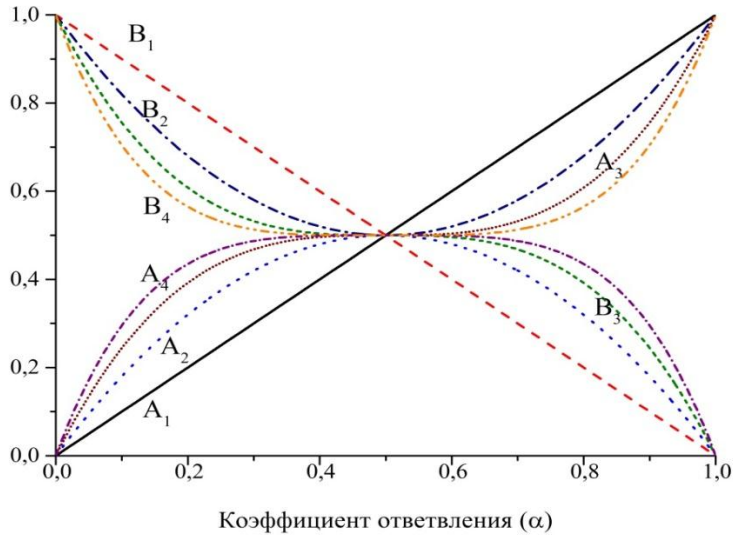


Рис. 4. Зависимости относительных интенсивностей противоположно-распространяющихся волн в двойной волоконной петле (обозначения волн согласно рис. 3) от коэффициента деления ответвителя α

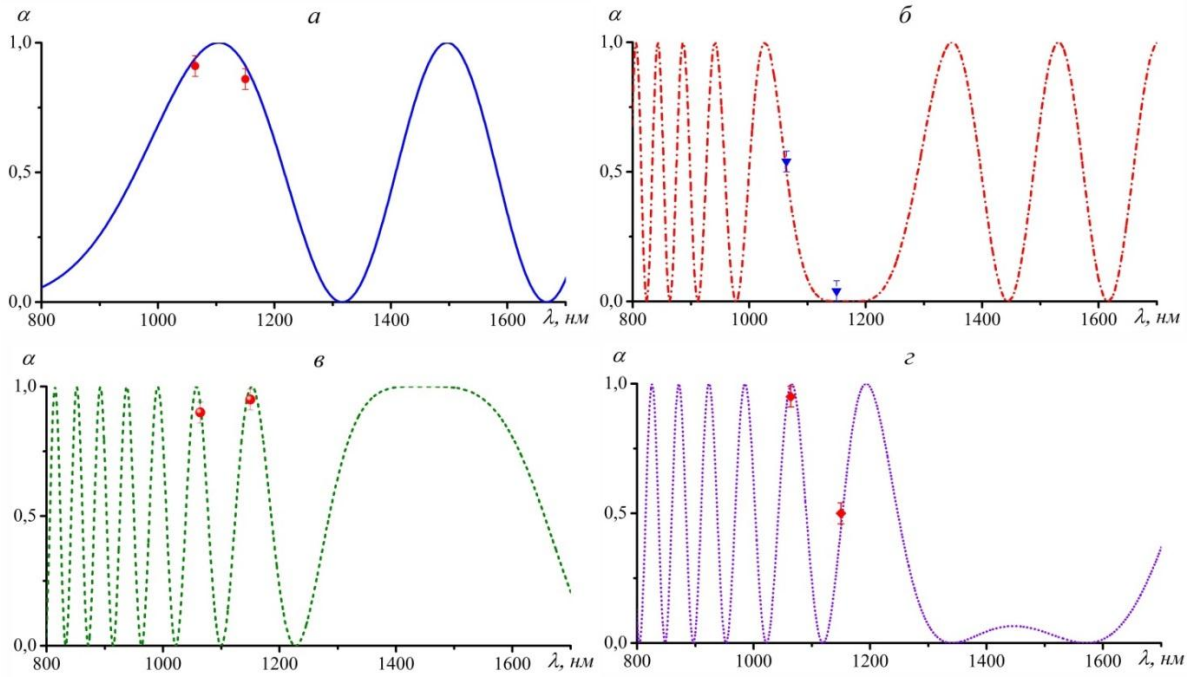
В такой конструкции волны, распространяющиеся в противоположных направлениях, уже после прохождения первичного контура потеряют взаимную когерентность и далее не интерферируют между собой, так как технологически реально возможные значения разности длин отрезков волокон (несколько мм) превышают когерентную длину вводимого излучения, генерированного в нелинейных процессах в волокне-генераторе. Поэтому в последующем суммарная интенсивность группы световых волн в каждом из встречных направлений определяется скалярным сложением отдельных составных волн. Такой анализ показал, что при последовательном прохождении световых волн через два ответвителя в прямом и обратном направлениях суммарные интенсивности группы световых волн в двух противоположных направлениях постепенно выравниваются для широкого значения коэффициента ответвления (и для соответствующих длин волн), вводимое излучение делится двойной петлёй в соотношении 50/50 (рис. 4).

В образцах волоконной петли с различными вол-новодными характеристи-ками рассчитаны и экспе-риментально измерены спектры пропускания в ближней ИК области спектра. Расчеты произ-ведены с учетом перио-дической зависимости коэффициента деления ответвителя, α от радиуса сердцевины волокна r и нормирован-ного расстояния между двумя сближающимися участками волокна в ответвителе, $l_н = l / r$: $\alpha = \cos^2(kL_{от})$ ($k = \frac{\lambda V}{4n_0 r^2}\exp\left[-\left(c_0 + c_1 l_н + c_2 l_н^{\,2}\right)\right]$– волноводный параметр волокна, а $c_0 = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2$, $c_1 = -0,7769 + 1,2252V - 0,0152V^2$ и $c_2 = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2$). Спектры пропускания петли с различными

значениями r и $L_{от}$, рассчитанные представленными выше формулами, и его отдельные значения, измеренные в эксперименте, показаны на рис. 5.

Достаточно точное совпадение расчетных и измеренных величин пропускания подтверждает правомочность принятых подходов и показывает возможность спектральной фильтрации светового континуума в волоконной петле с заданными волноводными характерис-тиками.

При одновременном введении в волоконную петлю последовательности высокоинтенсивных модулирующих и слабоинтенсивных модулируемых импульсов достигнуто переключение импульсов из канала в канал (из волны отражения в волну пропускания) за счет нелинейного изменения показателя преломления. Проанализированы физические условия, обеспечивающие эффективное переключение и мультиплексирование специальных оптических импульсов – солитонов в волоконной петле. Предложена схема генерации и переключения фемтосекундных солитонов с использованием волокна-генератора и волоконной петли из одномодового волокна.



а – $L_{от} = 0{,}5$ **см,** $r = 2{,}5$ **мкм,** $l_н = 4$**; б** – $L_{от} = 1$ **см,** $r = 3$**мкм,** $l_н = 4$**; в** – $L_{от} = 1{,}2$ **см,** $r = 3$ **мкм,** $l_н = 3$**; г** – $L_{от} = 1$ **см,** $r = 3$**мкм,** $l_н = 2{,}5$**.**

Рис. 5. Спектры коэффициента пропускания петли, рассчитанные при различных значениях волноводных характеристик. В спектрах точками показаны экспериментально измеренные значения пропускания на длинах волн 1,064 мкм и 1,15 мкм

В четвертой главе «**Преобразование параметров оптического излучения в двухжильном волокне**» исследованы характеристики спектральной фильтрации светового континуума в видимой и ближней ИК области спектра в волоконном ответвителе из двухжильного волокна, сформированного его сплавлением и растяжкой. На основе модели туннельной связи между волнами, распространяющимися в двух световедущих жилах

такого волокна, получено аналитическое выражение для коэффициента связи k_c, которое при практически важных значениях нормированного расстояния между жилами $\bar{d} = l_c / r$ и волноводного параметра волокна V вблизи 2.405 можно упрощенно представить как $k_c = \frac{\pi V}{2kn_1r^2}\exp\left[-\left(c_0 + c_1\bar{d} + c_2\bar{d}^2\right)\right]$, где $c_0 = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2$, $c_1 = -0,7769 + 1,225V - 0,0152V^2$ и $c_2 = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2$.

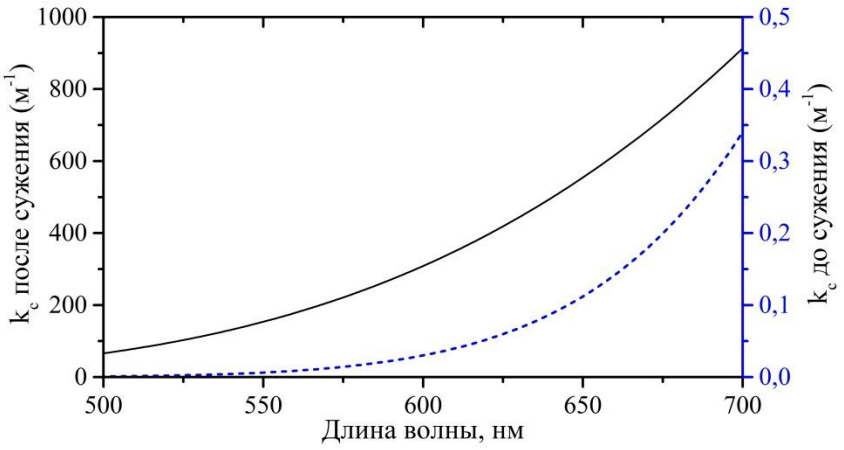


Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента волноводной связи, k_c, в двухжильном волокне, разработанном для видимой области спектра, до (штриховая линия) и после (сплошная линия) сужения его диаметра в два раза

Световой континуум, генерированный в одной из жил длинного (~10 м) двухжильного волокна, в ответвителе, образованном в его конце, распределяется между двумя жилами в зависимости от величины k_c. Сильная, экспоненциальная зависимость связи k_c от расстояния между жилами показывает насколько скорость перекачки излучения между жилами критически зависит от этого волноводного параметра. На рис. 6 представлены спектральные зависимости коэффициента ответвления в свободном отрезке волокна, разработанного для видимой области спектра, до и после сужения его диаметра в два раза. Как ясно видно из рис. 6, резкое увеличение коэффициента ответвления имеет место как при увеличении длины волны, так и при уменьшении диаметра сердцевины волокна: двухкратное уменьшение диаметра увеличивает интенсивность волноводной связи между жилами более чем на три порядка. Подобная зависимость $k_c(\lambda)$ была установлена и для волокон, разработанных для ближней ИК области спектра.

Установленные зависимости волноводной связи ответвителя в суженном участке двухжильного волокна позволили осуществить спектральную фильтрацию светового континуума в видимой и ближней ИК областях спектра с заданными спектральными характеристиками.

На рис. 7 показаны рассчитанные и экспериментально измеренные спектры генерированного излучения в волокне-генераторе при накачке с λ=0,532 мкм (а), а также излучения, прошедшего через ответвитель в длинной области ответвления – 31 (б) и 38 мм (в). Таким образом, изменяя волноводные параметры ответвителя (в данном случае длину области с волноводной связью),

можно осуществить спектральную фильтрацию с заданным спектром. Качественное совпадение рассчитанных и экспериментально полученных спектров подтверждает правомочность условий, допущенных при выводе формулы для $k_c(\lambda)$.

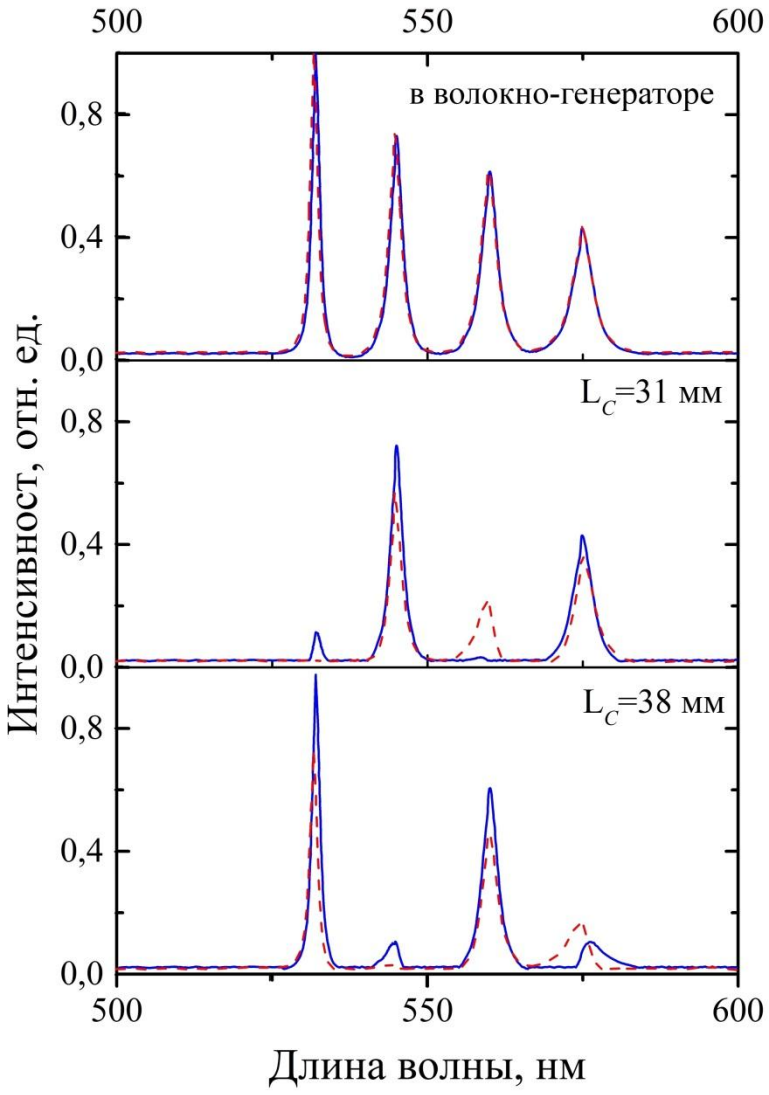


Рис. 7. Спектры широкополосного света, полученного в двухжильном волокне при накачке с λ_н=0,532 мкм, до (а) и после прохождения ответвителя с длиной ответвления 31 и 38 мм (соответственно б и в). Красная штриховая линия – рассчитанные спектры, голубая сплошная кривая – экспериментальные данные

Спектральная фильтрация излучения в ответвителе из двухжильного волокна была осуществлена и в волокне, разработанном для ближней ИК области спектра. При этом из-за более высоких значений $k_c(\lambda)$ спектральная селективность такой фильтрации была более высокой, т.е. модуляция спектра имела меньшие периоды по длине волны. Это обстоятельство свидетельствует о возможности более близкого расположения каналов уплотнения в системах связи WDM. Согласно произведенным расчетам, если при длине ответвителя 32 мм в волокне видимой области период модуляции спектра можно уменьшить до 10 нм, то в волокне ИК области спектра при длине 20 мм она составляет уже 0,8 нм. Так как указанные длины ответвителя вполне реальны на практике, предложенная схема фильтрации светового излучения континуума и модуляции спектра выделенного излучения позволяет уплотнять линии связи WDM с сотнями каналов в ближней ИК области спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме «Интерференционные волоконно-оптические системы преобразования параметров лазерного излучения в видимой и ближней ИК области спектра», сделаны следующие выводы.

1. В волоконно-оптическом интерферометре Саньяка в виде волоконной петли нелинейные изменения фаз двух противоположно-распространяющихся волн могут вызвать качественные изменения спектров пропускания и прохождения светового континуума в ближней ИК области спектра (700–1700 нм): путем подбора волноводных характеристик петли и мощности света до 10 кВт можно достичь спектрально селективных изменений пропускания такого устройства с заданными свойствами.

2. Двойная волоконная петля, образованная путем последовательного соединения двух одинарных петель равномерно (50/50) делит входящий световой континуум на отраженную и прошедшую части независимо от его спектрального состава за счет скалярного сложения амплитуд световых волн из-за потери взаимной когерентности этих волн при различных оптических путях их распространения.

3. Волоконная петля длиной 1–2 м, контролируемая волноводными параметрами его ответвителя, может служить эффективным спектральным фильтром для формирования световых полос из светового континуума. Путем подбора длины ответвления и расстояния между сердцевинами связанных волокон при формировании ответвителя можно достичь периодической модуляции излучения и выделения узких (вплоть до 10 нм) полос, что открывает новые возможности для их применения как источников излучения с управляемыми длиной волны и шириной линии.

4. В направленном ответвителе, изготовленном из двухжильного волокна путем сужения его диаметра и сближения световедущих жил на расстоянии ~1 см, можно осуществлять спектральную фильтрацию светового континуума с управляемым спектром выделяемого излучения.

5. Критическая зависимость коэффициента волноводной связи между жилами в двухжильном волокне (k) от диаметра жил и расстояния между ними позволяет незначительно изменяя эти параметры реализовать различные режимы распространения световых волн в двух жилах – от квазинезависимого ($k=0{,}35$ м$^{-1}$) до сильносвязанного ($k\approx1000$ м$^{-1}$) с возможностью полной перекачки световой энергии из жилы в жилу на длинах около 1 см.

6. В цельно-волоконном устройстве на основе двухжильного волокна, состоящего из волокна-генератора и волокна-фильтра, при накачке ИК излучением (1,064 мкм) получено сверхширокополосное излучение с управляемым спектром в области 0,7–1,7 мкм. В таком устройстве путем соответствующего подбора длины ответвления можно генерировать модулированное по спектру излучение с периодом вплоть до 1 нм в области минимальных потерь (1,55 мкм) и минимальной дисперсии (1,3 мкм) оптического волокна.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

TAJIBAEV ILKHOMJON IBROKHIMJONOVICH

INTERFERENCE FIBER - OPTICAL SYSTEMS FOR THE TRANSFORMATIONS OF PARAMETERS OF THE LASER RADIATION IN THE VISIBLE AND NEAR IR SPECTRAL REGIONS

01.04.05 – Optics

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

TASHKENT – 2019

The subject of PhD dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of Republic of Uzbekistan under number B2017.3.PhD/FM129.

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

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (www.iplt.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

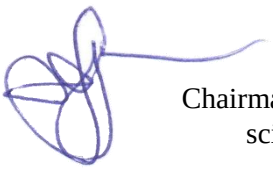
Scientific supervisor:	**Zakhidov Erkin Agzamovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor
Official opponents:	**Kadyrov Mumin Kadyrovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher
	Ochilov Odil Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher
Leading organization:	**The National University of Uzbekistan**

The defense will take place on «____» may 2019 at 14^{00} at the meeting of the Scientific Council number DSc.30.05.2018.FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № ___) (Address: 100125, 33 Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on «____» may 2019.

(Mailing report № _______on «___» may 2019).



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

D.T.Usmanov
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 of physical and mathematical science, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Relevance and necessity of the thesis: The advances in low-loss (<0.2 dB/km) and low-dispersion (<10 ps/km nm) optical fiber technology offer great opportunities for the creation of optical information networks, in which the fibers act as a medium for transmitting light information over extremely long distances (100 km) with a large information capacity. At the same time, even in the smallest few micron sized core of a fiber, the concentration of light increases the efficiency of its nonlinear interaction.

At present, in the view of the above circumstances, optical and nonlinear optical properties of such fibers are intensively studied in many scientific centers of the world.

Aim of the research work: The aim of this dissertation is to determine the physical conditions of high-efficiency generation, and spectral filtration of the light continuum in solid-fiber structures (fiber-generator + fiber–spectral filter) to obtain light radiation with specific spectral properties.

Objects of the research work: The objects of the thesis research were to achieve single-mode optical fibers and fiber interferometers with directional coupler.

The scientific novelty of the research is as follows:

The linear and nonlinear regimes of ultrashort pulses of the light continuum passing through a fiber loop are determined, and the dependency of the coefficients of transmission, reflection of the loop on the wavelength, and radiation power are determined;

By selecting the branch coefficient and the power of the transmitted radiation, the possibility of highly efficient switching of ultrashort pulses of radiation in a fiber loop (between the transmission and reflection channels) is revealed: 2 m long in a loop containing a weakly asymmetric branch with a power of 950 W and the maximum degree of switching at – 10;

For the first time, it is determined that the light continuum passing through a double fiber loop is divided symmetrically (0.5/0.5) between the transmission and reflection channels, regardless of the waveguide characteristics of its two branches and the radiation power, and its practical significance is shown;

A novel fiber coupler of two-core fiber is designed and experimentally developed, and it is basically formed by the convergence of two light-conducting veins in the fusion and stretching of a small (several cm) portion of the fiber;

The possibility of spectral filtering of the light continuum in a fiber coupler is shown by a two-core fiber with the formation of narrow bands of radiation or the formation of spectrum-modulated radiation with a width of up to 1 nm.

Implementation of the research results: From the research and results of processes including passing and spectral filtering of light radiation in a fiber loop and the branch from a two-core fiber, it could be stated that:

scientific and technical results on the generation of the light continuum, and its spectral filtration in a fiber loop and a branch of a two-core fiber were used in the study of spectral and kinetic characteristics of various fullerene solutions in the fundamental project F2-FA-F146 (reference 2/1255-929 of the Academy of Sciences

of the Republic of Uzbekistan dated March 26, 2019). The use of these results made it possible to determine the spectral-kinetic characteristics of the absorption of fullerene solutions and formed clusters with high accuracy;

the newly developed fiber generator of broadband (700-1700) light pulses of nano - and picosecond duration is used in the application of project FA-A11-TO31 for precise measurements of IR absorption spectra and other optical properties of biologically active molecules such as, ecdysteroids. In the visible region, the generator of ultrashort pulses (100 ps) is used in the study of fluorescent spectra of biologically active molecules such as, ecdysteroids (reference 2/1255-930 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan from 26 March 2019). The application of these results made it possible to accurately measure the IR absorption spectra and other optical characteristics of biologically active molecules such as, ecdysteroids, to ultimately determine their structural parameters using fluorescence spectra, excited by the radiation of the ultrashort pulse generator (100 ps) in the visible spectrum.

Structure and volume of dissertation: The thesis consists of an introduction, conclusion and bibliography including 28 figures and 2 tables. The text of the thesis is presented on 116 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (часть I; part I)

1. Захидов Э.А., Коххаров А.М., Миртаджиев Ф.М., Нематов Ш.К., Таджибаев И.И., Трунилина О.В., Ярбеков А.Э. Переключение сверхкороткого широкополосного излучения в волоконно-оптической петле // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2012. – Том.14, – №5-6, с.326-334 (01.00.00, №5).

2. Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Mirtagjiev F.V., Nematov Sh.Q., Tadjibaev I.I., Trunilina O.V. Transmission of a broadband light through a fiber optic loop: effect of nonlinear refractive index //Turkish Journal of Physics. –Turkey, 2014. – Vol. 38, – №. 1, – p.64-72 (01.00.00, №129; IF = 0.6).

3. Захидов Э.А., Таджибаев И.И.. Нелинейное переключение и оптическое ограничение сверхкороткого излучения в волоконной петле. // Вестник Национального Университета Узбекистана. – Ташкент, 2015 г. – №2/1, с.151-153 (01.00.00, №8).

4. Захидов Э.А., Коххаров А.М., Миртаджиев Ф.М., Нематов Ш.К., Таджибаев И.И., Убайдуллаев С.А. Преобразователь широкополосного света на основе двухжильного волокна // Узбекский физический журнал.– Ташкент, 2016. – Т.18, – №1, с.20-28 (01.00.00, №5).

5. Zakhidov E.A., Nematov Sh.K., Tajibaev I.I. All-fiber source of broadband light with modulated spectrum based on twin - core fiber // Journal of Lightwave Technology. USA, 2016. – Vol. 34, – No. 13, p.3126-3130 (№4, Journal Citation Reports; IF = 3.652).

6. Захидов Э.А., Коххаров А.М., Кувондиков В.О., Нематов Ш.К., Таджибаев И.И. Низкочастотный фотоакустический спектрометр с RGB-светодиодом для определения профиля фотосинтетической активности в листьях растений. // Акустический журнал. – Россия, 2018. –Т. 64, – № 6, с.768-774 (№4, Journal Citation Reports; IF = 0.782)

II бўлим (часть II; part II)

7. Нематов Ш.К., Миртаджиев Ф.М., Таджибаев И.И., Захидова М.А., Захидов Э.А. Мультиплексор последовательности оптических солитонов на основе нелинейной волоконной петле // Республиканская конференция «РИАК-VII». – 2014. Май. – Ташкент. – с.133-136.

8. И.И. Таджибаев, Э.П. Норматов, Б.А. Нормуминов, Г. Чориева, Ш. Раимкулов. Генерация суперконтинуума и спектральное уширение фемтосекундных импульсов в конусообразной волоконной структуре с перетяжкой / Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых. – 2014. Декабрь. – Ташкент. – с.51-52.

9. Таджибаев И.И. Фахриддинов О. Нелинейное переключение и оптическое ограничение сверхкороткого излучения в волоконной петле / Республиканская конференция «ИАК-VIII». – 2015. Апрель.– Ташкент. – II-том, – с.41-44.

10. I.I. Tajibaev. Supercontinuum generation and spectral broadening of femtosecond pulses in tapered fiber structure / International TWAS Conference «Nanosciense&Nanomaterials». – 2015. February. – Bangalore, India. –p.41-42

11. Таджибаев И.И. Фахриддинов О. Туннельная волноводная связь между световыми волнами в двухжильном волокне / Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых. – 2015. Декабрь. – Ташкент. – с.132-134.

12. Таджибаев И.И. Фахриддинов О. Формирование и спектральное разделение широкополосного излучение на двухжильном волокне // Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых. – 2015. Декабрь. – Ташкент. – с.135-137.

13. Захидов Э.А., Таджибаев И.И., Нематов Ш.К., Фахриддинов О.О. Нестационарная температурная модуляция излучения в многоканальных световодах / Республиканская конференция «Оптические методы в современной физике». – 2016. Май. – Ташкент. – с.20-24.

14. Захидов Э.А., Нематов Ш.К., Таджибаев И.И. Многофункциональный цельно-волоконный комбинированный фильтр на основе двухжильного волокна / Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». – 2016. Сентябрь. – Самарканд. – с.147.

15. Э.А. Захидов, М.А. Захидова, И.И. Тажибаев, Ш.К. Нематов, Матчанова А.А.. Фильтрование каналов WDM с помощью комбинированного гребенчатого фильтра Маха – Цендера на основе двухжильного волокна/ Республиканская конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». – 2017. Февраль. – Ташкент. – с.162-163.

16. Э.А.Захидов, Ш.К.Нематов, И.И.Тажибаев, Х.Т.Сагдиев, Э.Э.Эшанов Анализ волноводной связи между световыми волнами в ответвителе / Седьмая Международная конференция по Физической Электронике IPEC-7. – 2018. Май. – Ташкент. –с.118.

17. Тажибаев И.И., Захидов Э.А., Нематов Ш.К., Сагдиев Х.Т., Эшанов Э.Э. Физические механизмы генерации светового континуума в видимой и ближней ИК-области спектра / Республиканская научно-практическая конференция «Современные проблемы возобновляемой энергетики». – 2018. Май. – Карши. – с.265-268

18. E.A. Zakhidov, Sh.K. Nematov, I.I. Tajibaev. Spectral filtration of light continuum and formation of modulated radiation in twin-core optical fiber / International Conference «Nonlinear Phenomena in Bose Condensates and Optical Systems». – 2018. August. – Tashkent. – p.28-29.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди (29.04.2019 йил).

Босишга рухсат этилди07.08.2019 йил.
Бичими 60x84 $^{1}/_{16}$, «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 2,6. Адади: 100. Буюртма: № 60.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.