

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

«Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6В06201 –Телекоммуникация мамандығы

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы



ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау»

6B06201 –Телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

Б.Н.Құдайберген

Пікір беруші
Ғ.Дәукеев атындағы
АЭЖБ Университеті
т.ғ.д., профессоры

Якубова М.З.

« 2 » маусым 2023 ж.

Ғылыми жетекші
PhD докторы
қауымдастырылған
профессоры
Н.К.Смайлов

« 31 » 05 2023 ж.



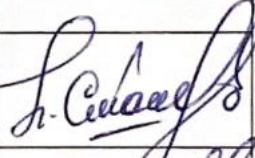
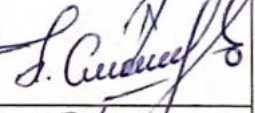

Дипломдық жұмысты дайындау

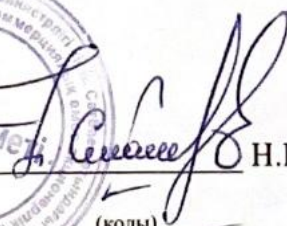
КЕСТЕСІ

| Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі | Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі | Ескерту |
|--|---|-----------|
| Брэгг торын талшықта қолдана отырып, композиттік окшаулағыштардың глазурине түсетін жүктемені анықтаудың техникалық-экономикалық негіздемесі | 07.02.2023 | Орындалды |
| Конус пен мембраналық қаптамаға негізделген талшықты Брэгг торы бар жаңа ішінара разряд сенсорын зерттеу | 24.03.2023 | Орындалды |
| <u>Бос кеңістік негізіндегі оптикалық талшықты лазерлерде, талшықты-оптикалық датчиктерде, лазерлер мен лазерлік диодтардың толқын ұзындығын тұрақтандыру және өзгерту.</u> <u>Құрылым периодының ұзындығы 530 нм болғанда толқын ұзындығында шағылысу қаншаға тең екенін анықтау</u> | 26.04.2023 | Орындалды |
| Бос кеңістіктегі оптикалық байланыстағы Брэгг торын matlab бағдарламалық жүйесінде модельдеу | 15.05.2023 | Орындалды |


Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған

Қолтаңбалары

| Бөлімдер атауы | Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы) | Қол қойылған күні | Қолы |
|-----------------------------------|--|-------------------|---|
| Диплом жұмысының тақырыбын талдау | ЭТЖҒТ каф. PhD докторы, асоц.профессор Н.К.Смайлов | 01.03.2023 |  |
| Теориялық ақпарат | ЭТЖҒТ каф. PhD докторы, асоц.профессор Н.К.Смайлов | 30.03.2023 |  |
| Норма бақылау | ЭТЖҒТ каф. ассистенті, т.ғ.м. П.Б. Ақылжан | 01.06.2023. |  |

Ғылыми жетекшісі PhD докторы  Н.К.Смайлов

(колы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  Б.Н.Құдайберген

(колы)

Күні «22» 12 2022 ж

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс Брэгг торы негізіндегі сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтаудың жаңа тәсілін зерттеуге және дамытуға арналған.

Жұмыста талшықты-оптикалық қайталағыштарды анықтау және басқарудың қолданыстағы әдістері талданады, сонымен қатар Брэгг торының қайталағыш сипаттамаларына әсері зерттеледі. Брэгг торын пайдалана отырып, сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтаудың жаңа тәсілін құруға басты назар аударылады, бұл оның сипаттамаларын жақсартуға және деректерді беру сенімділігін арттыруға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, қолданыстағы байланыс және деректерді беру жүйелерінде Брэгг торы негізіндегі сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтаудың әзірленген әдісін енгізу бойынша практикалық ұсыныстарды ұсынды.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена исследованию и разработке нового метода определения цифрового оптоволоконного повторителя на основе брэгговской решетки.

В работе проанализированы существующие методы обнаружения и контроля оптоволоконных повторителей, а также изучено влияние брэгговской решетки на характеристики повторителя. Основное внимание уделяется созданию нового способа определения цифрового оптоволоконного репитера с использованием брэгговской решетки, что позволило улучшить его характеристики и повысить надежность передачи данных.

ANNOTATION

The thesis is devoted to the research and development of a new method of determining a digital fiber-optic repeater based on a Bragg grating.

In the paper, the existing methods of detection and control of fiber-optic repeaters are analyzed, and the influence of the Bragg grating on the repeater characteristics is also studied. The main focus is on creating a new way of determining the digital fiber-optic repeater using the Bragg grating, which made it possible to improve its characteristics and increase the reliability of data transmission.

Мазмұны

| | |
|---|----|
| Кіріспе | |
| 1 Теориялық бөлімі | 8 |
| 1.1 Талшықты Брэгг торының негізгі сипаттамасы құрылымы | 8 |
| 1.2 Көп арналы жоғары жылдамдықты Брэгг талшықты тордан жауап алу жүйесі | 12 |
| 1.3 HTS катушкаларында қаттылықты анықтау үшін ТБТ жабындарын таңдау | 12 |
| 1.4 40-тан астам қабатталған және үстеме құрылымды талшықты Брэгг торларын жасау | 15 |
| 1.5 Екі жақты оптикалық күшейткіштің модулі | 20 |
| 2 Брэгг торы негізіндегі оптикалық сенсорлар мен дачиктер | 27 |
| 2.1 Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар. | 27 |
| 2.2 Брэгг торы негізіндегі оптикалық дачиктер | 29 |
| 2.3 Брэгг торы негізіндегі теміржол дачиктері | 29 |
| 3 Брэгг торы күшейткіш жұмыс моделін талдау және симмуляциялау | 32 |
| 3.1 Брэгг-Вульф шарты | 32 |
| 3.2 Брэгг торын күшейткіш ретінде эрбий әйнегін пайдаланып математикалық моделін құру | 33 |
| 3.3 Математикалық моделді Matlab бағдарламасында симмуляция жасау | 35 |
| 3.4 Брэгг торын оптикалық талшықтан қалай өтетінін тексеріп көру | 36 |
| 3.5 Matlab бағдарламасында және Python программалау тілінде симмуляция жасау | 37 |
| 4 Брэгг торының спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы, фотоиндукциялау, фазалық маска және шығындары | 39 |
| 4.1 Брэгг торының спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы | 39 |
| 4.2 Брэгг торларын фотоиндукциялау процесі | 42 |
| 4.3 Оптикалық кабельдерде Брэгг торын қолданумен байланысты шектеулер мен мәселелер сонымен қатар өндіріс шығындары, шешу жолдары | 45 |
| Қорытынды | 48 |
| Пайдаланылған әдебиеттер | 49 |

КІРІСПЕ

Талшықты-оптикалық технология салаларды коммуникациядан денсаулық сақтау саласына айналдырып, заманауи қоғамның ажырамас бөлігіне айналды. Бұл жұмыс талшықты-оптикалық технологияның маңызды аспектілеріне, соның ішінде толқын ұзындығын тұрақтандыруға және талшықты-оптикалық лазерлердің модуляциясына, сондай-ақ оптикалық жүйелердің әртүрлі түрлерінде Брэгг торларын қолдануға бағытталған.

Зерттеу жұмыс істеу принциптерін және талшықты-оптикалық лазерлердің толқын ұзындығын тұрақтандыру әдістерін зерттеуден басталады. Бұл процестерге бос кеңістіктің әсері де қарастырылады. Одан әрі талшықты-оптикалық сенсорларды, лазерлерді және лазерлік диодтарды модуляциялау әдістері қарастырылады.

Жұмыстың екінші бөлімінде таратылған Брэгг рефлекторы бар цифрлық супермодты лазерлерді қолдану егжей-тегжейлі қарастырылады және мұндай жүйелерде толқын ұзындығы модуляциясына қалай қол жеткізуге болатыны зерттеледі.

Жұмыстың үшінші бөлімінде берілген құрылым периодының ұзындығы үшін шағылу мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты анықтау үшін теориялық зерттеу ұсынылатын болады.

Төртінші бөлімде көрсету үшін OptiSystem бағдарламалық жасақтамасы арқылы бос кеңістіктегі Брэгг торының симуляциясы орындалады.

Жұмыстың қорытынды бөлімінде оптикалық сенсорларда Брэгг торларын қолдану қарастырылады және осы құрылғылардың әртүрлі салалардағы ықтимал қолданулары мен перспективалары туралы пікірталас жүргізіледі.

Бұл жұмыстың мақсаты талшықты-оптикалық технологияның маңызды аспектілерін терең талдау және зерттеу және әртүрлі оптикалық жүйелерде Брэгг торларын қолдану болып табылады. Бұл теориялық принциптерді зерттеумен қатар нақты жүйелерді практикалық модельдеу мен талдауды қамтиды.

1 Теориялық бөлімі

1.1 Талшықты Брэгг торының негізгі сипаттамасы құрылымы

Брэгг торы- 1913 жылы ерлі-зайыптылар Уильям мен Лоуренс Брэгг ашқан Кристаллография және қатты дене физикасы саласындағы маңызды ұғымдардың бірі. Ол кристалдық тордағы атомдардың орналасуын сипаттайды және атомдар арасындағы қашықтықты анықтауға мүмкіндік береді. Бұл эсседе біз Брэгг торының негізгі аспектілерін, сондай-ақ оны ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолдануды қарастырамыз.

Брэгг Торының Негіздері: Брэгг торы-кристалдағы атомдардың, иондардың немесе молекулалардың тұрақты кеңістіктік орналасуы. Бұл векторлар мен тор параметрлері арқылы сипатталатын үш өлшемді периодтық құрылым. Рентген сәулесінің толқын ұзындығын шашырау бұрышымен және атом жазықтықтары арасындағы қашықтықпен байланыстыратын Брэгг теңдеуі кристалдардың құрылымын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді.

Брэгг Торын қолдану:

Брэгг торын қолданудың негізгі орталықтарының бірі физика және оптика саласы болып табылады. Брэгг торы – жарық дифракциялық қасиеті бар периодты құрылым. Ол қалыпты торда орналасқан атомдардан, ионосфералардан немесе басқа бөлшектерден тұрады.

Брэгг торын оптикада қолдану оптикалық сүзгілерді, дифракциялық тарақтарды және интерферометрлерді құрумен байланысты. Брэгг торлары фотоникада, талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінде және лазерлік технологияда қолданылады. Олар жарықтың белгілі бір толқын ұзындығының өтуін басқаруға мүмкіндік береді және қажетті сипаттамалары бар оптикалық торларды жасау мүмкіндігін береді.

Брэгг торлары сонымен қатар рентген сәулелерінің дифракциясында және нейтрондардың дифракциясында қолданылады. Бұл аймақтарда олар кристалдар мен молекулалардың құрылымдық талдауын өлшеу және материалдарды сипаттау үшін қолданылады.

Сонымен қатар, Брэгг торлары акустикалық сүзгілер мен кідірістерді жасау үшін акустикада, фазалық антенна массивтерін жасау үшін микротолқынды технологияда, сондай-ақ кристаллографияда және материалдардың құрылымын зерттеу үшін материалтануда қолданылады.

Осылайша, Брэгг торы ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолданудың кең ауқымына ие, мұнда жарықтың, рентгендік немесе нейтрондық толқындардың, акустикалық толқындардың және толқындардың басқа түрлерінің дифракциясы мен интерференциясын бақылау қажет.

Рентгендік құрылымды талдау: Брэгг торы рентгендік дифракция арқылы кристалдардың құрылымын анықтауда шешуші рөл атқарады. Кристалдардың рентгендік талдауы олардың химиялық құрамын, құрылымын және өлшемдерін анықтауға мүмкіндік береді, бұл химия, биология және физика саласындағы маңызды құрал.

Материалтану: Брэгг торы механикалық беріктік, электр өткізгіштік және жылу өткізгіштік сияқты материалдардың қасиеттерін зерттеу үшін қолданылады. Кристалдардың құрылымын білу Бізге қажетті қасиеттері бар жаңа материалдарды жасауға мүмкіндік береді.

Фотонды кристалдар: Брэгг торы жарықтың таралуын бақылайтын мерзімді құрылымдар болып табылатын фотонды кристалдар аймағында да қолданылады. Бұл жақсартылған сипаттамалары мен функционалдығы бар лазерлер, Жарық өткізгіштер және сенсорлар сияқты жаңа оптикалық құрылғыларды жасауға мүмкіндік береді.

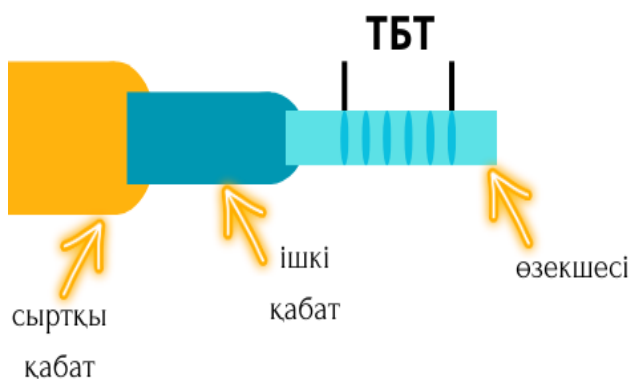
Нанотехнология: Брэгг торы кванттық нүктелер мен наноөткізгіштер сияқты наноқұрылымды материалдарды әзірлеу мен зерттеуде маңызды рөл атқарады. Бұл материалдардың кристалдық құрылымын дәл түсіну олардың қасиеттерін басқаруға және бірегей мүмкіндіктері бар жаңа наноқұрылғыларды жасауға мүмкіндік береді.

Брэгг торы кристаллография және қатты күйдегі физика саласындағы негізгі ұғым болып табылады, бұл кристалдардың құрылымын және атомдық орналасу сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді. Брэгг торын қолдану рентгендік құрылымды талдаудан фотонды кристалдарды құруға және нанотехнологияларды дамытуға дейін өзгереді, бұл тұжырымдаманы ғылым мен техниканың әртүрлі салаларындағы ғылыми прогресс үшін өте пайдалы және маңызды етеді.

Брэгг торының оны оптикалық кабельдерде қолдануы:

1913 жылы Уильям мен Лоуренс Брэгг ашқан Брэгг торы кристаллография мен қатты күйдегі физикадағы негізгі ұғым болып табылады, ол кристалдық тордағы атомдардың орналасуын сипаттайды және атомдар арасындағы қашықтықты анықтауға мүмкіндік береді. Бұл Дипломдық жұмыста Брэгг торының оптикалық кабельдерде қолданылуын қарастырамыз, сонымен қатар осы қолданбаға қатысты кейбір шектеулер мен мәселелерді, сондай-ақ ықтимал шешімдер мен баламаларды талқылаймыз.

Брэгг торы оптикалық кабельдердің дамуы мен жұмысында маңызды рөл атқарады, бұл ұзақ қашықтыққа деректерді беру өнімділігі мен тиімділігін жақсартады.



1.1-сурет – Оптикалық кабельдегі Брэгг торы

Оптикалық талшықтар шыныдан немесе пластиктен тұрады және жарықты минималды шығындармен өткізеді.

Брэгг торын фотонды кристалдар түрінде оптикалық талшықтармен біріктіруге болады, олар жарықтың таралуын бақылайды және тек белгілі бір толқын ұзындығына мүмкіндік береді.

Брэгг торын оптикалық талшықтарда пайдалану деректерді ұзақ қашықтыққа беру өнімділігі мен тиімділігін жақсартуға мүмкіндік береді.

Оптикалық сүзгілер мен демультимплексорлардағы Брэгг торы Брэгг торы бар оптикалық сүзгілер белгілі бір толқын ұзындығын өткізу және сигнал сапасын жақсарту үшін қолданылады.

Брэгг торының демультимплексорлары оптикалық кабельдегі бірнеше толқын ұзындығын бөлуге мүмкіндік береді, бұл өткізу қабілеттілігі мен берілетін деректер санын арттырады.

Оптикалық кабельдерде Брэгг торын қолдануға байланысты шектеулер мен мәселелер және техникалық қиындықтар және өндіріс құны

Брэгг торымен оптикалық талшықтарды жасау күрделі және уақытты қажет ететін процесс, бұл өндіріс құны мен соңғы өнімнің құнына әсер етуі мүмкін.

Оптикалық талшықтарда Брэгг торын жасаудың дәлдігі мен қайталануы қателіктерге ұшырауы мүмкін, бұл оптикалық кабельдердің өнімділігі мен сенімділігіне әсер етеді.

Қоршаған ортамен өзара әрекеттесу және температура әсерлері:

Брэгг торы температура, ылғалдылық және қысым сияқты қоршаған ортаның өзгеруіне теріс әсерге ұшырауы мүмкін, бұл оның тұрақтылығы мен өнімділігіне кері әсер етуі мүмкін.

Температураның өзгеруі Брэгг торының деформациясын тудыруы мүмкін, бұл өз кезегінде толқын ұзындығына және осылайша оптикалық кабельдер арқылы сигнал беруге әсер етеді.

Өндіріс процесі мен материалдарды жақсарту:

Өндірістің жаңа технологиялары мен әдістерін әзірлеу оптикалық талшықтарда Брэгг торын құруды жеңілдетеді, шығындарды азайтады және дәлдік пен қайталануды арттырады.

Сыртқы әсерлерге төзімді жаңа материалдарды пайдалану Брэгг торының тұрақтылығын арттырады және оптикалық кабельдердің өнімділігін жақсартады.

Оптикалық кабельдерге арналған балама яғни альтернативтік технологиялар

Фазалық немесе жиілікті модуляциялау сияқты альтернативтік технологияларды әзірлеу және пайдалану Брэгг торын пайдаланбай-ақ өткізу қабілеттілігі мен деректерді берудің сенімділігін арттыра алады.

Мультимодты оптикалық талшықтарды пайдалану Брэгг торын пайдаланбай-ақ қосымша икемділік пен ұзақ қашықтыққа деректерді беру мүмкіндіктерін қамтамасыз ете алады.

Брэгг торы оптикалық кабельдерді жобалау мен жұмыс істеудегі маңызды элемент болғанымен, өндірістің техникалық күрделілігіне, құнына, қоршаған ортамен өзара әрекеттесуіне және температуралық әсерлеріне

байланысты шектеулері мен қиындықтарына ие. Дегенмен, өндіріс процесі мен материалдарды жақсарту және оптикалық кабельдер үшін балама технологияларды пайдалану сияқты ықтимал шешімдер мен баламалар бұл шектеулерді жоюға ықпал етуі мүмкін. Осы саладағы зерттеулер мен инновациялар ұзақ қашықтыққа деректерді беруді жақсартуды және қоғам мен индустрияға жаңа мүмкіндіктер ашуды қамтамасыз ететін тиімдірек және сенімді оптикалық кабельдерге әкелуі мүмкін.

Брэгг торлары-бұл талшықтағы сыну көрсеткішінің мерзімді өзгеруі. Олар әдетте белгілі бір толқын ұзындығын сүзу үшін қолданылады және оптикалық байланыс пен лазерлік техникада қолданудың кең спектріне ие.

Алайда, Брэгг торларын оптикалық кабельдерде сигнал күшейткіштері ретінде пайдалану біршама күрделі болуы мүмкін. Сигналды күшейтудің орнына, Брэгг торы әдетте белгілі бір толқын ұзындығын көрсетеді және басқаларын өткізеді. Бұл оларды сигналды күшейту үшін емес, толқын ұзындығын сүзу және мультиплекстеу үшін пайдалы етеді.

Сигналды күшейту үшін талшықты-оптикалық кабельдер әдетте эрбиум талшықты күшейткіштерін (Erbium-Doped Fiber Amplifiers, EDFA) пайдаланады. Эрбиум-бұл талшықты-оптикалық байланыста жиі қолданылатын белгілі бір толқын ұзындығының (шамамен 1550 нм) жарығын күшейте алатын сирек жер элементі.

Дегенмен, Егер сіз Брэгг торларын үлестірілген немесе квази-үлестірілген оптикалық күшейткіштерді құру контекстінде қарастырсаңыз, бұл мүмкін. Бұл жағдайда Брэгг торы резонанстық құрылымды құру үшін қолданылады, содан кейін ол EDFA сияқты сирек жер допингімен белсенді түрде күшейтіледі. Бұл әсіресе сигналды ұстап тұру үшін үлестірілген күшейткіштерді қажет ететін ұзын талшықты-оптикалық линкаларда пайдалы болуы мүмкін.

Брэгг торлары, мен айтқанымдай, әдетте толқын ұзындығын сүзу және мультиплекстеу үшін қолданылады. Бұл принцип тордың периодтық құрылымының әртүрлі бөліктерінен шағылысатын жарық толқындарының интерференциясына негізделген. Осыған байланысты белгілі бір толқын ұзындығы күштірек шағылысады, ал басқалары әлсіз немесе мүлдем өткізілмейді.

Брэгг торлары температура мен қысым датчиктерінде, оптикалық giro сенсорларында, тіпті оптикалық телекоммуникацияларда оптикалық кабельдегі сигналды бұрмалауы мүмкін хроматикалық дисперсияны өтеу үшін қолданылады.

Жоғарыда айтқанымдай, Брэгг торларын эрбиум сияқты сирек жер иондарымен бірге талшықты-оптикалық күшейткіштерде қолдануға болады. Бұл жағдайда тор жарықты күшейтетін эрбиуммен әрекеттесетін резонанстық құрылымды жасай алады. Мұны сигналдың белгілі бір толқын ұзындығын күшейту үшін қолдануға болады.

Алайда, оптикалық кабельдердегі сигналды күшейту мұқият жоспарлау мен оңтайландыруды қажет ететін күрделі процесс екенін есте ұстаған жөн.

Брэгг торлары бұл процесте маңызды рөл атқаруы мүмкін, бірақ олар қолдануға болатын көптеген құралдардың бірі ғана.

1.2 Өрісте бағдарламаланатын торды қолданатын көп арналы жоғары жылдамдықты Брэгг талшықты тордан жауап алу жүйесі

Бұл мақалада нақты уақыт режимінде өңдеу үшін далалық бағдарламаланатын клапан матрицасын (FPGA) пайдаланатын талшықты Брэгг торы (ТБТ) бар көп арналы жоғары жылдамдықты сауалнама жүйесі берілген.

Жақында жасалған зерттеулер бойынша Брэгг торларын көптеген салалар мен ғимараттарда қолдануға болатын мүмкіндігі бердію. Мысалы құбырлар, ғимараттар, ұшақтар және тағы басқаларында.

Соңғы жылдары Брэгг торларына үлкен тексерістер жүре бастады көбінесе жылдамдығына стресс тесттерді жасай бастады яғни болашағы үлкен енкенін көрсетеді. Бұның бәрі жаңадан шыққан лазердың арқасында. Ол жоғары жылдамдықты тазартылған лазерлер [19].

Жүйе 50,7 кГц сыпыру жиілігі, 35 нм сыпыру жолақтары және 0,91 МВт шығыс қуаты бар реттелетін температура Фурье режимін құлыптайтын лазерді пайдаланады. WBR өлшеудің жоғары жылдамдығына 9,9 мкс дейін қол жеткізіледі және нақты уақыт режимінде өңдеу аналогты-цифрлық түрлендіргіш пен FPGI-ге орнатылған жоғары жылдамдықты деректерді жинау жүйесін (DAQ) пайдалану арқылы мүмкін болады. DAQ төрт 14 биттік аналогтық арналармен және 250 МГц іріктеу жылдамдығымен кірістірілген өңдеуді орындайды. FPGA ішкі компоненттері жоғары жылдамдықты FBI анықтау үшін параллельді өңдеумен жүзеге асырылады, бұл үш арнада мультиплекстелген FBI бір уақытта өлшеуге мүмкіндік береді. Жүйе көп арналы құрылғы арқылы бірнеше ондаған кГц-тен жоғары жиілікте жоғары жылдамдықты діріл өлшемдерін орындай алады. Сондай-ақ, құжатта сенсорлық жүйелер, сенсорлық жүйелердің интеграциясы, көп сенсорлы жүйелер, талшықты Брэгг торы (ТБТ) датчиктері және өрісте бағдарламаланатын клапан матрицасы (FPGA) сияқты терминдер көрсетілген. Қорытындылай келе мультиплексірлеу ТС-FDML лазерінің осы тазалау жолақтарында 5 нм алты Брэгг торы бар. Және әрбір арнаны каскадтауға болады. Сигналдарды өңдеу FPGA бір уақытта 30 ТБТ-ге дейін өңдеу мүмкіндігіне ие [1].

1.3 HTS катушкаларында қаттылықты анықтау үшін ТБТ жабындарын таңдау

Бұл мақала криогендік жағдайларда температураны өлшеуге арналған үш түрлі талшық Брэгг торының (ТБТ) сенсорларын бағалауға, әсіресе қатуды анықтауға арналған. Өсуді анықтау жоғары температуралы асқын өткізгіш

(HTS) катушкаларында өте маңызды, өйткені ол асқын өткізгіштіктің кенет жоғалуынан болатын зақымдануды болдырмауға көмектеседі. Зерттеуде қарастырылған үш жабын - жалаңаш (кварц) ТБТ, акрилмен қапталған және полиимидпен қапталған ТБТ сенсорлары [1].

Зерттеушілер салқындату және жылыту циклдерін қоса алғанда, осы сенсорлардың температуралық реакциясын 77 К-ден 293 К-ге дейін талдау және нәтижелерді болжамды сенсор жауаптарымен салыстыру үшін бірқатар эксперименттер жүргізді. Сонымен қатар, олар эпоксидті шайырды сіндірудің термиялық жауап сипаттамаларына әсерін зерттеді.

Осы сенсорлардың өнімділігін бағалағаннан кейін, авторлар HTS катушкаларында қатаюды анықтауда пайдалану үшін ең қолайлы арзан сенсор дизайнын анықтауға тырысты. Бұл зерттеу асқын өткізгіштік қолданбалар үшін криогендік температураны өлшеу технологияларын үздіксіз дамытуға және оңтайландыруға ықпал етеді.

Қорытындылай келе акрилатпен қапталған талшық Брэгг торының және полиимидпен қапталған талшық Брэгг торының 77 К-ден 293 К-ге дейін, эксперимент нәтижелері температуралық реакциясы төмен температурада сызықты емес екенін және акрилатпен қапталған талшық Брэгг торының толқын ұзындығының 3,24 максималды ығысуымен өте ауыр сызықты емес екенін көрсетеді. Бұл көрсеткіш басқаларына қарағанда 2 еседен астам. Ал жалаңаш талшық Брэгг торының және полиимидпен қапталған талшық Брэгг торлары үшін толқын ұзындығының ығысуын және температураның ығысуын 77 К-293 К температура диапазонында 3-ші полиноммен орнатуға болады.

Акрилатпен қапталған талшық Брэгг торының және полиимидпен қапталған талшық Брэгг торының температураға сезімталдығы жалаңаш талшық Брэгг торына қарағанда әлдеқайда жоғары болғанымен, Жабын қабатының материалынан талшыққа потенциалды нашар кернеудің ауысуы талшыққа және гистерезиске тұрақсыз кернеудің берілуіне әкелуі мүмкін [1].

Талшықты оптикалық IEEE стандарты Датчиктер — Талшықты Брэгг торы Сұраушының стандарты -Терминология және анықтамалар

Бұл мақалада стандарттау айтылған кез келген технология 2 жақты болмас үшін стандарттау пайдаланылады мысалы WI-FI 802.11 дегендей стандарт ол мысалы біз басқа қалаға немесе мемлекетке барғанда сол жердегі технологияларды емін еркін қолдана алуымызда. Стандарттың негізгі мақсаты - әртүрлі қолданбалардағы дәйекті түсіну мен байланысты қамтамасыз ету, спецификациялардағы екіұштылықты жою үшін нақты анықтамалар мен терминологияны құру [20].

Сол себепті стандарт соңғы пайдаланушыларға нақты қолданбалар үшін әртүрлі жеткізушілердің жүйелерін оңай салыстыруға мүмкіндік беретін талшықты Брэгг торына негізделген сенсор жүйесін толық сипаттау үшін қажетті негізгі өнімділік параметрлерінің тізімін ұсынады. Ол температура, деформация және қысым сияқты сезілетін параметрлердің өзгеруіне жауап ретінде ТБТ толқын ұзындығының Брэгг ығысуын өлшеу үшін қолданылатын құрылғылар болып табылатын талшықты Брэгг торына (ТБТ) қатысты терминдердің анықтамалары мен түсіндірмелерін береді.

Қолданылған сенсор түрлері:

Қысым сенсоры: оптикалық талшықтың оптикалық қасиеттеріндегі өзгерістерді анықтау арқылы қысымды өлшейтін құрылғы.

Сенсорды сұраушы: сезілетін параметрлердің өзгеруіне жауап ретінде ТБТ толқын ұзындығының Брэгг ығысуын өлшейтін құрылғы[2].

Деформация сенсоры: оптикалық талшықтың оптикалық қасиеттеріндегі өзгерістерді анықтау арқылы механикалық кернеуді өлшейтін құрылғы.[22]

Температура сенсоры: оптикалық талшықтың оптикалық қасиеттерін өзгерту арқылы температураны өлшейтін құрылғы[2].

Талшықты Брэгг торы қолданатын өлшеу жүйесінің дәлдігі сонымен қатар сенсорларды калибрлеудің дәлдігін, орнату әдістерін, қоршаған ортаға әсерлерді және т.б. қоса алғанда бірқатар факторлардың функциясы болып табылады.

Талшық Брэгг торы (ТБТ): басқаларды беру кезінде толқын ұзындығының өте тар диапазонын таңдамалы түрде көрсету үшін IEC 60793-2 сәйкес оптикалық бір режимді кремний талшығына біріктірілген фазалық дифракциялық тор. (IEC 61757-1-1:2016)[2].

Талшықты Брэгг торы бар сенсорды қолдануды зерттеу Кернеу күйін бақылау жүйесі Трансформатор

Бұл мақалада жұмыс трансформатор жағдайын бақылауға қолданылған, өлшеу дәлдігін айтарлықтай жақсартуға әкелетін кросс-корреляцияға негізделген Fiber Bragg Grating (ТБТ) толқын ұзындығының ауытқуын анықтау алгоритмін ұсынады. Сынақ нәтижелері орталық толқын ұзындығын өлшеу қателігін 7дБ мен 14дБ аралығындағы сигнал-шу қатынасы (SNR) диапазонында 14:00 және 15:00 аралығында шектеуге болатынын көрсетеді. Жоғары SNR жағдайында абсолютті қатені шамамен 0,5 сағатқа дейін азайтуға болады. Нәтижесінде демодуляция алгоритмі шудың әсерін тиімді төмендетеді, бұл ТБТ сенсорының демодуляция жүйесінің сипаттамаларын әрі қарай зерттеуге және трансформатор жағдайын бақылаудың дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді [3].

Индекс шарттары трансформатор жағдайын бақылау, сигнал-шуыл қатынасы, толқын ұзындығының ауытқуы, шуды жою, талшықты Брэгг торы, демодуляция алгоритмі [3].

Кірістірілген Panda Fiber Брэгг торының көмегімен аэроғарыштық қолданбаларға арналған композиттік ламинаттың құрылымдық күйін бақылау

Бұл мақалада ТБТ стресс пен температураның өзгеруін бақылау үшін көміртекті талшықты композицияға (CFRP) енгізілген. ТБТ кернеу, кернеу, температура және қысым сияқты қоршаған физикалық ортаға тәуелді шағылысқан жарық толқын ұзындығының (Брэгг толқын ұзындығы) өзгеруін тіркейді[4].

Жұмыста авторлар штамм мен температураның өзгеруімен Брэгг торының толқын ұзындығындағы ығысуларды есептеу үшін тасымалдау матрицалық әдісін (ТММ) пайдаланды. Олар сондай-ақ талшық режимінің таралуын талдау және Panda талшығындағы стресстен туындаған қос сыну

әсерін бағалау үшін Ақырлы элементтер әдісі (FEM) модельдеулерін орындады.

Зерттеу нәтижелері кіріктірілген ТБТs жоғары сезімталдыққа және деформацияға және температураға Брэгг толқын ұзындығының сызықтық тәуелділігіне ие екенін көрсетті. Бұл композициялық материалдардың жағдайын тиімді бақылауға және ықтимал зақымдануды болжауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл деформациялар мен материалдың мінез-құлқы туралы деректерге бай ақпаратты пайдалана отырып, композиттік құрылымдарды жобалаудың жаңа әдістерін дамытуға әкелуі мүмкін [4].

1.4 40 астам суперпозициялық және үстіңгі құрылымды талшықты Брэгг торларын жасау

«40-тан астам қабатталған және үстеме құрылымды талшықты Брэгг торларын жасау» мақаласында 40-тан астам қабатталған және үстіңгі құрылымды талшықты Брэгг торларын жасаудың екі түрлі әдісі сипатталған: қабаттасқан торларды дәйекті жазу және шағын фокусталған нүктемен тікелей ультракүлгін түсіруді қолдану арқылы жүзеге асырылатын үстіңгі құрылымдық торлардың цифрлық синтезі. Суперпозицияланған торлар үшін сыну көрсеткішінің өзгеруінің дамуы талданады.

Талшықты Брэгг торлары сенсорлық және сүзу қосымшаларында, сондай-ақ желіні анықтау үшін кеңінен қолданылады. Кедергілерді болдырмау үшін олар деректер сигналының өткізу қабілетінен тыс жазылады. Жергілікті экологиялық өзгерістердің әсерін азайту үшін шағын ізі бар құрылғы қажет. Бұл мақалада бір талшықтағы 45 қондырмалы тордың және 44 үстіңгі құрылымды тордың рекордтық санының демонстрациялық өндірісі ұсынылған. Бұрын әдебиетте 16 қондырмалы және 15 қабатталған торлардың максималды саны туралы хабарланған [5].

Қабатталған және үстіңгі құрылымды торларды жасау үшін шағын бағытталған нүктемен тікелей ультракүлгін жазуды пайдалануды сипаттайды. Электроптикалық модулятордың модуляциясы бар интерферометр қолданылады, бұл тордың параметрлерін реттеуге мүмкіндік береді. Өндіріс процесі мен нәтижелері графиктер мен спектрлер түрінде берілген [15].

Қабатталған торлар үшін фотосезімталдықпен байланысты процестер дәйекті жазумен қанығатыны атап өтіледі, бұл қол жетімді тор контрастын және мүмкін болатын суперпозициялар санын шектейді. Қосымша құрылымды торлар, керісінше, сандық түрде жасалады және барлық торлар бір уақытта жазылады. Дегенмен, бұл әдістің сыну көрсеткішінің өзгерістерінің шкалалары шешу үшін тым аз болған кезде де шектеулері бар.

Қорытындылай келе, бұл жұмыс сериялық жазуды да, цифрлық синтезді де қолдана отырып, бір физикалық жерде 40-тан астам талшықты Брэгг торларының рекордтық санын өндіруді көрсетті. Толқындардың кең диапазонында торлы спектрлер алынды [5].

Тұтастай алғанда, бұл жаңа әдістерді ұсынатын және бір талшықтағы қабаттасатын және үстіңгі құрылымды торлардың рекордтық санына қол жеткізгенін көрсететін талшықты Брэгг торларын жасаудағы айтарлықтай ілгерілеушілікті білдіреді. Бұл сенсорлар, сүзгілер және оптикалық желілер саласындағы әртүрлі қолданбалар үшін маңызды болуы мүмкін [15].

Мақалада келесі формулалар қолданылды:

Сыну көрсеткішінің (n_{AC}) «AC» өзгерісін есептеу формуласы:

$$n_{AC} = \lambda_B = \frac{\tanh^{-1}(\frac{\sqrt{r_{max}}}{L})}{\pi} \quad (1.1)$$

мұнда λ_B – орталық Брэгг толқын ұзындығы, r_{max} – тордың максималды шағылыстыру қабілеті, L – тор ұзындығы [5].

Бұл жұмыс интеграцияланған оптикалық толқын өткізгіштерде көлбеу Брэгг торларын қолданудың жаңа технологиясын ұсынады. Авторлар осы платформаға негізделген жаңа құрылғыларды жасау үшін эксперименттер мен модельдеу жүргізді. Олар кванттық ақпараттық өңдеуде және көп жиілікті оптикалық телекоммуникацияда қолдануға болатын көп жиілікті құрылғыларды, фазалық баптауды және жақсартылған байланыс әдістерін талқылайды [6].

Жұмыста ультракүлгін сәулеленуді қолдана отырып, толқын өткізгіштер мен Брэгг торларын тікелей жазу әдісі сипатталған. Бұл әдіс дәл бақыланатын наноқұрылымдарды, соның ішінде көлбеу бұрышы бар көлбеу Брэгг торларын жасауға мүмкіндік береді. Бұл технологияны қолданудың бір мысалы-интеграцияланған поляризатор, онда торлар 45° Брюстер бұрышында қисайып, толқын өткізгіштің te және TM режимдерін тиімді бөлуге мүмкіндік береді. Поляризацияның әлсіреу коэффициенті 28,5 дБ алынды [15].

Сондай-ақ, авторлар мұндай құрылғылардың тиімділігін тек бірнеше дискретті режимдерді қолдайтын арнайы қамтумен толқындық режимдердің өзара әрекеттесуі арқылы жақсартуды ұсынды. Ол үшін микроөңдеу нәтижесінде пайда болған жотада орналасқан ультракүлгін сәулемен жазылған екі толқын бағыттаушы қолданылды. Торлардың сәйкес көлбеуі арқылы толқын өткізгіштер мен жабын режимдері арасындағы байланысқа 100% дейін тиімділікпен қол жеткізуге болатындығы көрсетілген. Бұл фазалық сезімталдығы бар тар жолақты сүзгілер мен қосқыштарды жасауға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ, көптеген кіріс арналарын қолдау үшін бірнеше кеңістіктік режимдерді қолдайтын толқын бағыттағыштарын пайдалану ұсынылды. Брэгг торлары толқындық және жабындық режимдер арасындағы жоғары селективті байланысты қамтамасыз етеді, бұл режимдер арасындағы еркін байланыс матрицаларын құруға мүмкіндік береді [6].

Авторлар ұсынылған конструкцияларға негізделген құрылғылар классикалық және кванттық ақпараттық өңдеуде қолданыла алады деп санайды. Оларды тар жолақты сүзу, режимді мультиплекстеу, бір фотонды немесе көп сәулелі әсер интерференциясы, оптикалық қақпалар, фазалық

қосқыштар жәнөнойам және сенімді платформадағы басқа функционалдылық үшін пайдалануға болады.

Жұмысты Ұлыбританияның кванттық технологиялар жөніндегі Дүниежүзілік бағдарламасы қолдады [6].

Бұл мақалада Саутгемптон университетінің зерттеушілері жасаған Брэгг торы бар жаңа интеграцияланған спектрометр ұсынылған. Бұл зерттеудің негізгі мақсаты құрылғылардың ажыратымдылығын жақсарту және олардың жұмысын түсінудің толық теориялық негізін жасау болды.

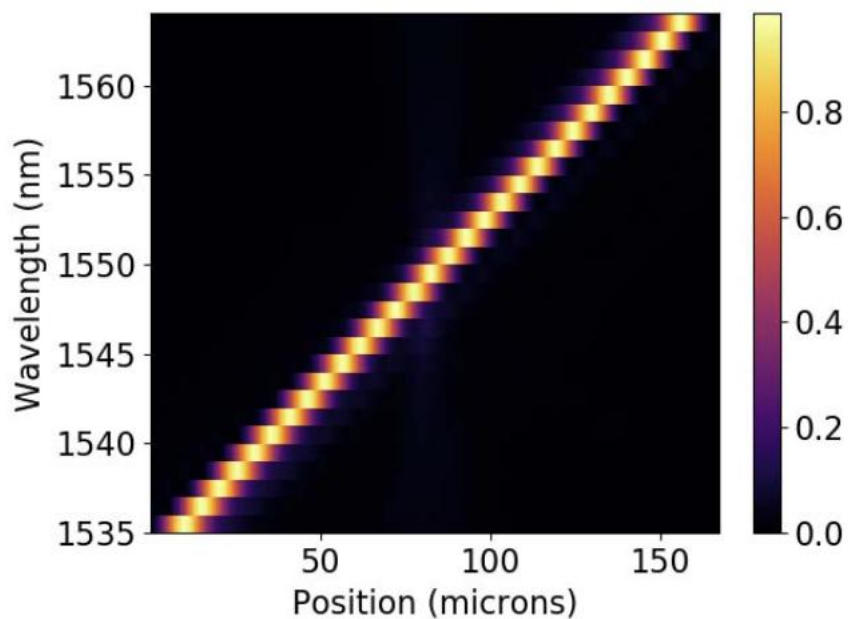
Ұсынылған спектрометрдің басты артықшылығы-оның Брэгг торының үлкен бұрышына байланысты кең өткізу қабілеттілігін қамтамасыз ету мүмкіндігі. Алдыңғы зерттеулер көлбеу бұрыштары аз құрылғыларды пайдаланды, ал бұл жұмыс өткізу қабілеттілігін арттыруға және поляризацияға сезімталдықты жақсартуға мүмкіндік беретін 45° көлбеу құрылғыларды пайдаланды [7].

Спектрометрдің жұмыс принципі жарықтың толқын ұзындығына тәуелді бұрышта жарықты толқын режимінен радиациялық режимдерге бағыттайтын блейзер торларын қолдануға негізделген. Чирпирленген блейзер торының дұрыс қалыптасуының көмегімен толқын ұзындығына байланысты позициямен фокус жасауға болады. CCD көмегімен фокустық жазықтықтың интеррогациясы спектрлерді шешуге мүмкіндік береді [16].

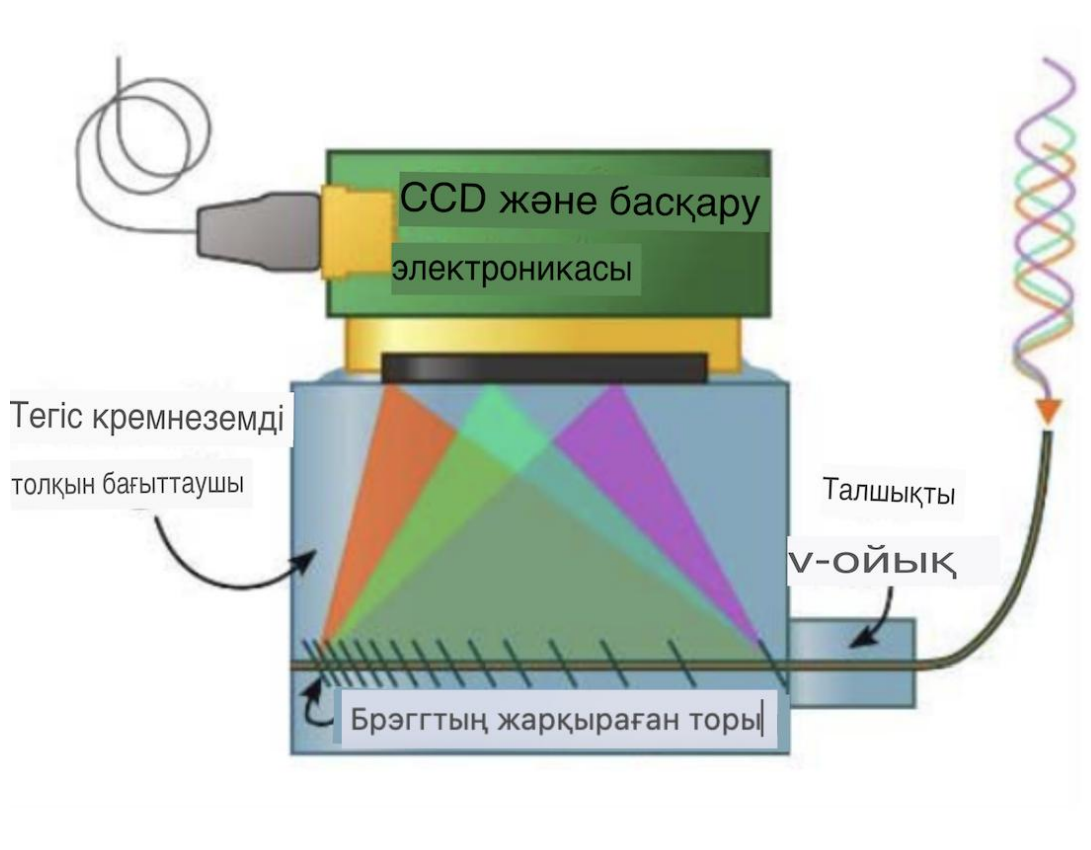
Зерттеушілер кремний диоксиді жазықтық платформасында Брэгг торларын жасау үшін тікелей ультракүлгін жазу әдісін қолданды. Торлар FND шыны қабаты бар кремний субстратындағы ультракүлгін диапазондағы тікелей жазу лазерімен жасалған. Бұл тор кезеңінің үлкен детонация диапазонына және жоғары детонация жылдамдығына қол жеткізуге мүмкіндік берді, бұл жоғары ажыратымдылықтағы және қысқа фокустық қашықтықтағы құрылғыларды жасауға мүмкіндік берді [7].

Эксперименттерде спектрометрдің 2,3 нм ажыратымдылықты қамтамасыз етуге қабілетті екендігі көрсетілді, Жеке шыңдарды 10 пм-ге дейін жоғары дәлдікпен өлшеуге болады. Оптикалық ажыратымдылық тікелей пропорционалды бірақ тордың ұзындығы, бұл болашақ құрылғыларда ажыратымдылықты арттыруға мүмкіндік береді [16].

Бұл зерттеу Брэгг торлы интеграцияланған спектрометрлердің дамуындағы маңызды прогресті білдіреді. Құрылғылардың ажыратымдылығын жақсарту және жаңа теориялық негізді әзірлеу зертханада спектрлік бақылау мен портативті өлшеулердің дамуына ықпал етеді [7].



1.2-сурет — Әртүрлі толқын ұзындықтарындағы фокустық нүкте қарқындылығының ені мен қалыпқа келтірілген таралуы үшін эксперименттік деректері



1.3-сурет – Спектрометрдің схемалық бейнесі блейзер торымен және интеграцияланған анықтау жүйесімен

Резонатор ішіндегі шағылыстыратын Брэгг торы арқылы фазалық конъюгацияланған импульстік лазердің жиілігін тұрақтандыру

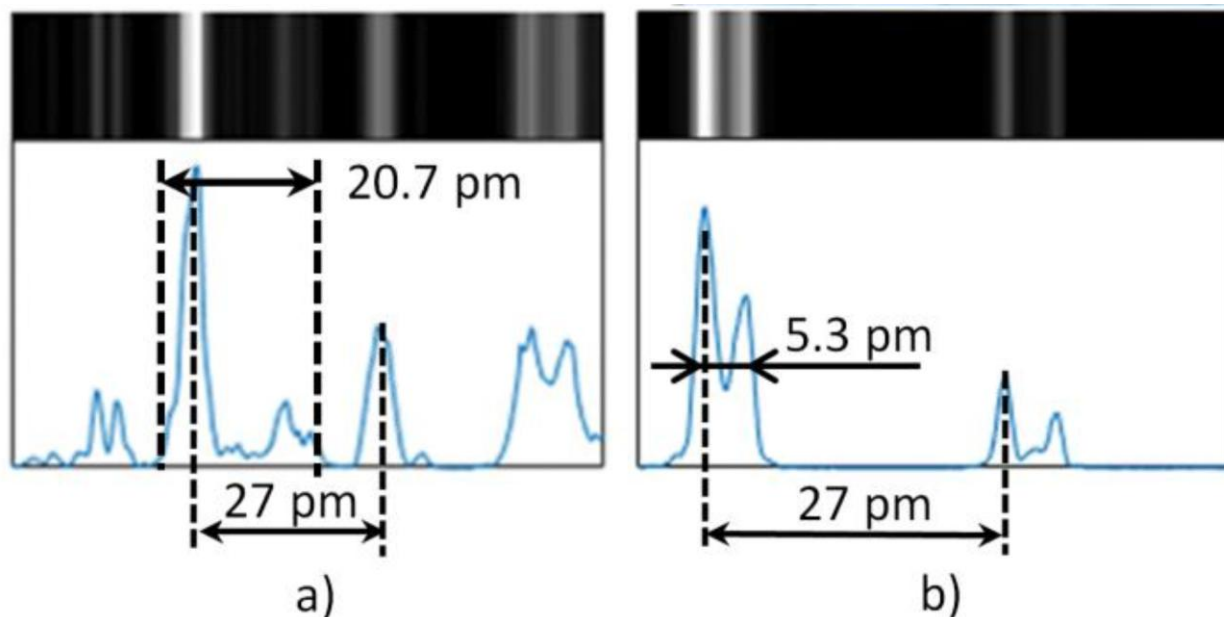
Бұл шолуда авторлары I. S. Khakhailn, E. E. авторлары "фазалық тұрақтандыру фазасы-конъюгат күйінің импульстік лазері intracavity reflecting Bragg grating" (резонатор ішіндегі шағылыстыратын Брэгг торы арқылы фазалық конъюгацияланған импульстік лазер жиілігін тұрақтандыру) мақаласы қарастырылады. Popyov, A. P. Pogoda, A. S. boreysho және V. M. Petrov. Зерттеу Д.ф. Устинов атындағы Балтық мемлекеттік техникалық университетінде және Ресейдің Санкт-Петербург қаласындағы ИТМО университетінде жүргізілді.

Жақсы оптикалық сапасы бар жоғары лазерлік қуатқа жетудің бір жолы-фазалық конъюгация құбылысын пайдалану. Бұл резонатор ішіндегі бұрмаланулардың орнын толтыру үшін жақсы. Сонымен қатар, спектрлік селективтіліктің арқасында бұл процесс лазердің сәулелену жолағының Шири азайтады. Алайда, генерацияның толқын ұзындығы әлі де импульстен импульске қарай өзгереді [8].

Негізгі нәтижелер:

Бұл жұмыста шағылыстыратын көлемді Брэгг торын (VBG) пайдалану толқын ұзындығын аз шығынмен тұрақтандыратыны көрсетілген. Nd:YAG белсенді ортасы бар фазалық конъюгациялық Лазер және көп циклді резонатор эксперименталды түрде жүзеге асырылды. Лазер спектрінің ені шағылыстыратын Брэгг торын пайдалану кезінде 20.7 PM-ден 5.3 PM-ге дейін қысқарды. Пассивті Q-коммутиация режиміндегі ең жоғары қозу кезінде 6 импульстік сериядағы сәулелену энергиясы 86 мДж құрады және резонаторішілік тормен тек 78 мДж дейін төмендеді. Сериядағы бір импульстің энергиясы сәйкесінше 14 мДж және 13 мДж болды. Шағылыстыратын Брэгг торын пайдалану лазердің тиімділігін айтарлықтай төмендетпестен жиілікті тұрақтандыруды қамтамасыз етеді деп қорытынды жасауға болады.

Лазер жиілігін тұрақтандыру көптеген қосымшалар үшін, әсіресе оптикалық байланыс және дәл өлшеу саласында үлкен маңызға ие. Бұл мақалада резонатор ішіндегі шағылыстыратын Брэгг торын пайдалану фазалық конъюгацияланған импульстік лазердің жиілігін тұрақтандырудың тиімді әдісі болып табылады. Бұл тәсіл спектрдің Шири қысқартуға және лазерлік генерацияның жоғары тиімділігін сақтауға мүмкіндік береді [8].



1.4-сурет — Резонаторда алынған интерферограммалар: а) шағылысатын ТБТ жоқ; б) ТБТ бар

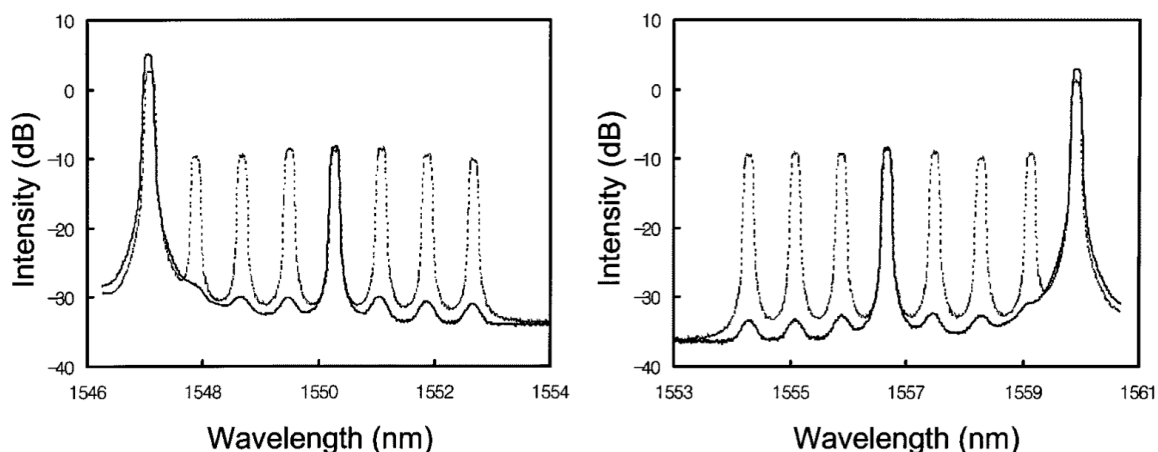
1.5 Екі жақты оптикалық күшейткіштің модулі

Бұл мақалада күшейткіш бақыланатын екі жақты оптикалық күшейткіштің модулі зерттеледі. Бұл модуль күшейтуді басқару үшін екі талшықты-оптикалық Брэгг торын пайдаланады және толқынды бөлу мультиплексирлеу (WDM) жүйелерінде оптикалық арналарды қосуға және жоюға арналған.

Бұл модуль шешетін негізгі мәселе екі бағыттағы сигналдарды жиі қосу және жою арқылы аман қалған арналардың сигнал күшінің ауытқуымен байланысты. Ұсынылған күшейтуді бақылау әдісі лазерлік күшейту шуының тербелісіне негізделген және аман қалған арналардың қуат тербелістерін 0,2 дБ-ден төменге дейін азайтуға мүмкіндік береді [9].

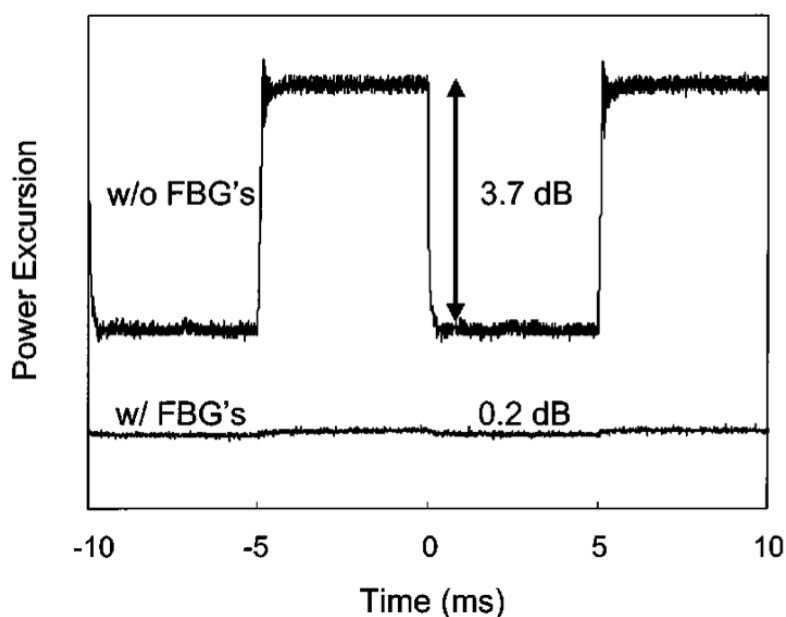
Мақалада талшықты-оптикалық Брэгг торлары, эрбий қоспалары бар талшықты күшейткіштер, оптикалық сүзгілер және басқа компоненттер бар оптикалық күшейткіш модулінің диаграммасы берілген. Эксперименттік нәтижелер сипатталған, оның ішінде шығыс сигналдарының спектрлері, сигналдар қуатының өзгеруі және бит қателігін өлшеу (BER) арқылы сигналды беру сапасын бағалау.

Бұл жұмыс WDM жүйелеріндегі қуат ауытқуы мәселесін шешуде толық оптикалық күшейтуді басқару әдісі тиімді екенін көрсетеді. Ұсынылған модуль сигнал қуатының тұрақтылығын қамтамасыз ететін және қабылдағыштың жақсы сезімталдығын сақтай отырып, WDM екі жақты сигнал беру жүйелерінде пайдалану мүмкіндігін көрсетеді [9].



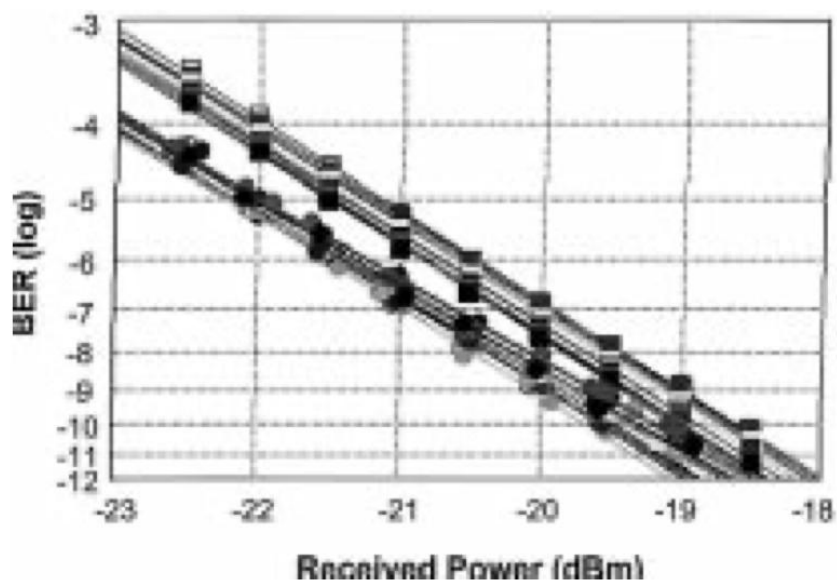
1.5-сурет — 3.1(a) төменгі ағын бағытына арналған шығыс сигналдарының спектрлері; 3.1(b) - жоғары ағыс бағыты үшін

Графиктер барлық он төрт арна ұсынылған күшейткіш модульге (үзік сызық) қосылған кезде және он төрт арнаның он үші жойылған кезде (тұтас сызық) сигнал спектрлерін көрсетеді.



1.6-сурет — Он төрт арнаның он үшінші қосымша модуляциясымен аман қалған арна қуатының өзгеруі

Төменгі және жоғарғы сызықтар, сәйкесінше, талшықты-оптикалық Брэгг торлары бар және онсыз аман қалған арна қуатының өзгеруін білдіреді. График талшықты-оптикалық Брэгг торларын пайдаланған кезде аман қалған арна қуатының ауытқуы 0,2 дБ-ден азға дейін төмендейтінін көрсетеді.



1.7-сурет — Барлық он төрт арна үшін өлшенген бит қателігі (BER) қисықтары

Кәдімгі бір режимді талшық арқылы 40 км қашықтықта сигналдарды жібергеннен кейін барлық он төрт арна үшін қабылдағыштың сезімталдығы өлшенді және $-19,8 \pm 0,3$ дБм (BER = 10^{-9} кезінде) болды. График ұсынылған модульдің сигнал беру сапасына кері әсер етпейтінін көрсетеді.

Телекоммуникациялық технологиялар конференциясында және фотоника конференциясында ұсынылған мақала қызықты экспериментті сипаттайды. Ол оптикалық байланыс жүйелерінде тарату қашықтығын жақсартуға қабілетті Эрбиум талшықты күшейткіші (DPC-EDFA) бар модуляцияланған Брэгг торлы қос өтімді күшейткішін ұсынды [17].

Мәліметтерді жоғары жылдамдықпен жіберу мәселесі – хроматикалық дисперсия, ол жіберілетін сигналдың сапасына әсер етеді және тарату ауқымын шектейді. Мақалада авторлар хроматикалық дисперсияны өтеу және әлсіреген сигналды күшейту үшін модуляцияланған Брэгг торын пайдалануды ұсынады [10].

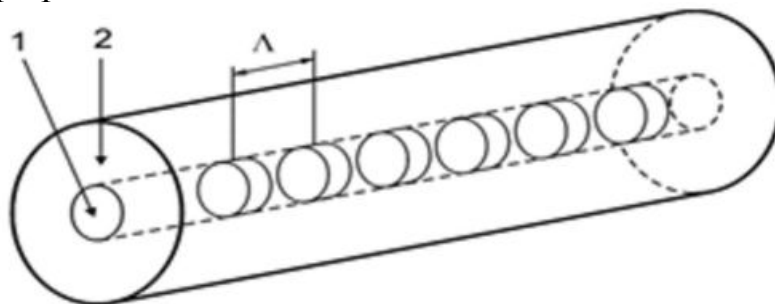
Олар эксперимент жүргізді, онда олар орнатуды егжей-тегжейлі сипаттады және әртүрлі компоненттерді, соның ішінде сигнал көзі мен циркуляторларды пайдаланды. Эксперимент нәтижелері DPC-EDFA күшейткішін қолдану көз диаграммасы, көздің ашылуы және уақытша діріл сияқты деректерді беру сапасын жақсартуға әкелетінін көрсетті. Бұл сигналды әдеттегі қос жиілік күшейткіштермен (DP-EDFA) салыстырғанда ұзағырақ қашықтыққа жіберуге мүмкіндік береді.

Зерттеушілер модуляцияланған Брэгг торын қолданатын ұсынылған әдіс хроматикалық дисперсияны өтеудің және сигналды күшейтудің тиімді әдісі болып табылады деген қорытындыға келді. Оның беру диапазонын жақсарту

және деректер сапасын сақтау үшін оптикалық байланыс жүйелерінде пайдалану мүмкіндігі бар.

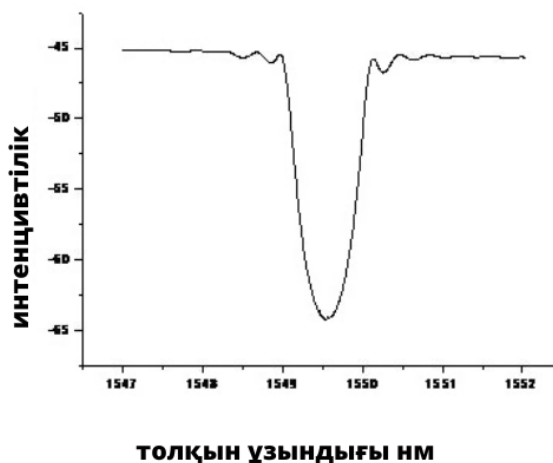
Бұл мақала оптикалық деректерді беру тиімділігін арттыру үшін жаңа әдістер мен технологияларды әзірлеудің маңыздылығын көрсетеді. Тәжірибе қазіргі заманғы байланыс жүйелерінде модуляцияланған Брэгг торымен DPC-EDFA күшейткішін қолдану мүмкіндігін растайды [10].

Талшықты Брэгг торы (ТБТ) - бұл талшықты жарық өткізгіштің өзегінде тікелей жасалған периодты құрылым. Құрылым-талшық бойындағы сыну көрсеткішінің модуляциясы. Әдетте, мұндай құрылымды мезгіл-мезгіл соққылар түрінде ұсынуға болады-сыну көрсеткіші өзгерген талшық өзегінің бөліктері. Мұндай соққылар талшықты жарық өткізгіштің осіне перпендикуляр орналасқан



1.8-сурет — Талшықішілік Брэгг торы.

Брэгг торының типтік өткізу спектрі 3.2-суретте көрсетілген.



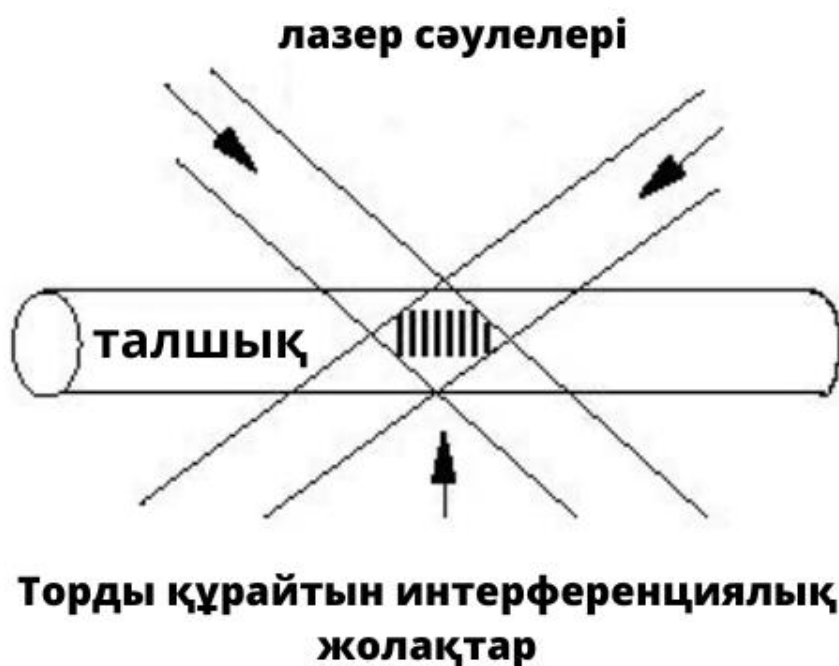
1.9-сурет — Брэгг торының өткізгіштігінің толқын ұзындығына тәуелділігі.

Талшықты Брэгг торларын қолданудың негізгі бағыттары:

- талшықты лазерлер
- мультиплексті пассивті талшықты-оптикалық сенсорлар
- телекоммуникациялық жүйелерге арналған оптикалық жиілік мультиплексорлары

- қайта реттелетін және бекітілген тар жолақты сүзгілер
- талшықты-оптикалық байланыс желілеріндегі дисперсиялық компенсаторлар
- жиілік-селективті тармақтағыштар және талшықтан жарық шығаратын құрылғылар
- сыртқы шағылыстырғыш ретінде Брэгг торы бар лазерлік диодтар
- талшықты-оптикалық күшейткіштер

ТБТ ультракүлгін лазердің қарқынды сәулеленуімен фотосезімтал бір режимді талшықты сәулелендіру арқылы жасалады. Лазердің екі сәулесі талшық кедергі аймағында болатындай етіп азаяды (сурет3.3).



1.10-сурет — ТБТ торы

Экспозиция орындарында сыну коэффициенті қайтымсыз артады және талшықта осылайша ауыспалы сыну көрсеткіші бар жолақтардың периодтық құрылымы қалыптасады.

Вульф-Брэгг Заңына сәйкес, мұндай құрылым жарықты Брэгг деп аталатын белгілі бір толқын ұзындығында көрсетеді, спектрдің қалған бөлігін іс жүзінде өзгеріссіз өткізеді (сурет3.2):

$$\lambda B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1.1)$$

мұндағы Λ -тор кезеңі, n_{eff} -бұл таралу режимі үшін тиімді сыну көрсеткіші.

Сыну көрсеткішінің бойлық вариациясы бар талшық Брэгг торы деп аталады. Әрбір тор жолағы сәулеленудің кішкене бөлігін кері көрсетеді. Толқын ұзындығы тор кезеңінен екі есе үлкен сәулелену үшін шағылысқан сәулелер фазаға қосылады және нәтижесінде қарқындылығы 1 шағылысқан

жарық сигналы пайда болады. 99% және одан да көп түсетін толқынның қарқындылығы және өте тар спектрлік жолақ.

Шағылысу спектрінің ені, ең алдымен, құрылымның ұзындығына байланысты және әдетте 0,1 - 0,4 нм шамасын құрайды. Әдеттегі WBR ұзындығы 3 - 10 мм аралығында болады. шағылысудың кең спектрін алу үшін чирпирленген торлар деп аталады (ұзындығы бойынша өзгермелі периоды бар торлар).

Белгілі бір толқын ұзындығында шағылысқан жарықтың пайда болу шарттары Брэгг жағдайлары деп аталады, ал ол пайда болатын толқын ұзындығы Брэгг толқын ұзындығы деп аталады. Барлық басқа толқын ұзындығы үшін VBD іс жүзінде мөлдір. Брэгг толқынының ұзындығы мен тордың шағылысу коэффициентін торды жасау процесінде үлкен дәлдікпен орнатуға болады. Бұл параметрлер тордың қызмет ету мерзімі ішінде тұрақты болып қалады. Екінші жағынан, Брэгг толқынының ұзындығы талшықтың температурасы мен кернеуіне байланысты. Телекоммуникациялық мақсаттар үшін тор параметрлерінің мұндай тұрақсыздығы зиянды және өтелуі керек. Алайда, бұл әсер пассивті талшықты-оптикалық датчиктерде өте қызықты қолдануды тапты, онда шағылысқан сигналдың толқын ұзындығының өзгеруіне байланысты қолданылатын жүктеменің температурасы немесе шамасы туралы айтуға болады. Тар жолақты сүзгі ретінде қызмет ететін, Брэгг толқын ұзындығындағы сәулеленуді көрсететін және басқа толқын ұзындықтарындағы сәулеленуді іс жүзінде сөнбестен өткізетін қарапайым шағылыстыратын торлардан басқа, ені бірнеше нанометрлік спектрлік жолақтағы сәулеленуді көрсететін кең жолақты шағылыстыратын торлар, сондай-ақ режимді араластыру торлары жасалады. онда сәулеленудің режимдік құрамы өзгереді.

Бөлінген Брэгг рефлекторы бар сандық ультрамодты лазердегі толқын ұзындығының лазерлік модуляциясы

Split-bragg рефлекторы (DBR) сандық ультрамодты лазерлер жарықтың пайда болуын басқару үшін толқын ұзындығы модуляциясын пайдаланады.

DBR лазері - бір немесе екі айна Брэгг торларымен ауыстырылатын жартылай өткізгіш лазер. Бұл шығарылатын жарықтың толқын ұзындығын өте дәл басқаруға мүмкіндік береді, өйткені Брэгг торы белгілі бір толқын ұзындығының сәулесін ғана көрсетеді.

Ультрамодалы лазерлерде жарық өте қысқа импульстарда пайда болады. Толқын ұзындығын өзгерту бұл импульстердің жиілігін өзгертуге мүмкіндік береді, ол көптеген қолданбаларда, соның ішінде коммуникацияда, материалдарды өңдеуде және биомедицинада пайдалы болуы мүмкін.

Мұндай лазерлердегі толқын ұзындығы модуляциясына әртүрлі тәсілдермен қол жеткізуге болады. Ең көп таралған әдістердің бірі - лазердің температурасын өзгерту. Брэгг торымен шағылған жарықтың толқын ұзындығы температураға байланысты болғандықтан, лазердің температурасын бақылау оның сәулеленуінің толқын ұзындығын басқаруға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ лазерге қолданылатын кернеуді өзгерту арқылы толқын ұзындығын модуляциялауға болады. Бұл лазер материалындағы сыну көрсеткішінің өзгеруіне, демек, лазер тудыратын жарықтың толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі.

Лазердің бұл түрі жоғары толқын ұзындығының тұрақтылығының, үлкен динамикалық жиілік диапазонының және ультра қысқа импульстарды жасау мүмкіндігінің артықшылықтарын ұсынады.

Сандық ультрамодты сплит-Брэгг рефлекторында (DBR) лазердегі толқын ұзындығын модуляциялау әдетте температура немесе электр өрісі сияқты физикалық жағдайларды өзгерту арқылы жүзеге асырылады.

Температураны модуляциялау: Температураны өзгерту радиацияның толқын ұзындығына әсер етеді. Жартылай өткізгішті лазер үшін оның формуласы келесідей:

$$\Delta\lambda/\Delta T = \lambda * d(1/n)/dT \quad (1.2)$$

мұнда:

- $\Delta\lambda/\Delta T$ – температураның өзгеруі кезінде толқын ұзындығының өзгеруі,
- λ – орталық толқын ұзындығы,
- n - сыну көрсеткіші,
- $d(1/n)/dT$ - температураға қатысты кері сыну көрсеткішінің туындысы.

Жартылай өткізгіштерде температураның өзгеруі сәулелену толқынының ұзындығының Цельсий бойынша шамамен 0,3 нм өзгеруіне әкеледі.

Кернеу модуляциясы: Қолданылатын кернеудің өзгеруі жартылай өткізгіштің сыну көрсеткішін өзгертеді, бұл өз кезегінде сәулеленудің толқын ұзындығын өзгертеді. Кванттық ұңғыма лазері үшін кернеудің өзгеруі толқын ұзындығының бір вольтқа шамамен 0,1 нм өзгеруіне әкелуі мүмкін.

Кез келген жағдайда нақты әсер лазердің нақты материалы мен дизайнына байланысты екенін және бұл мәндер айтарлықтай өзгеруі мүмкін екенін ескеріңіз.

Назар аударыңыз, бұл жуықтаулар жалпыланған және DBR лазерінің нақты орындалуына тән болмауы мүмкін. Нақты нәтижелер көптеген факторларға, соның ішінде лазерде қолданылатын материалдарға, оның дизайнына және нақты жұмыс жағдайларына байланысты болады.

2 Брэгг торы негзіндегі оптикалық сенсорлар мен датчиктер

2.1 Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар

Қыздыру немесе механикалық деформация (ВБР сызықтық созылуы) ВБР параметрлерінің өзгеруіне әкеледі (сыну көрсеткіші, тор кезеңі), бұл (1) формулаға сәйкес Брэгг толқын ұзындығына әсер етеді. Осылайша, VBD пайдаланылуы мүмкін:

Қоршаған ортаның температурасын өлшегіштер, сызықтық деформация датчиктері ретінде қысым, иілу және т. б. датчиктердегі сенсорлық элементтер қызметін атқара алады.

WBR-ді сенсорлық жүйелердің басқа түрлерінен ерекшелендіретін ерекшелігі-олардың толқын ұзындығы бойынша қарапайым мультиплекстеу мүмкіндігі. Яғни, бір талшықты сызықта өзінің ерекше Брэгг толқын ұзындығына ие бірнеше ондаған ВБР-ге дейін орналасуы мүмкін.

Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық датчиктерде өлшенетін шама (температура немесе механикалық кернеу) Брэгг толқын ұзындығыныңмещысуына айналады. Тіркеу жүйесі Брэгг торы шағылысқан толқын ұзындығының электрческысуын электр сигналына түрлендіреді. Мұндай сенсордың сезімтал элементінде электронды компоненттер жоқ, сондықтан ол толығымен пассивті, яғни оны жоғары жарылғыш, агрессивтілік, күшті электромагниттік кедергі аймағында пайдалану мүмкіндігі. Бір талшыққа көптеген Брэгг торлары орнатылуы мүмкін, олардың әрқайсысы өз толқын ұзындығына жауап береді. Бұл жағдайда нүктелік сенсордың орнына біз толқын ұзындығы бойынша мультиплекстелген таратылған тіркеу жүйесін аламыз. Ақпараттық параметр ретінде жарықтың толқын ұзындығын пайдалану сенсорды сәулелену көзі мен қабылдағыш параметрлерінің ұзақ мерзімді дрейфтеріне, сондай-ақ талшықтағы оптикалық қуаттың кездейсоқ сөнуіне сезімтал етпейді.

Оптикалық Брэгг торы (ТБТ) сенсорлары соңғы жылдары танымал бола бастады, өйткені олар физикалық параметрлерді электрлік қосылымдарсыз дәл өлшеуді қамтамасыз ете алады. ТБТ сенсорлары дәстүрлі электрлік сенсорлар сенімсіз болуы мүмкін генераторлар мен қозғалтқыштар сияқты жоғары электромагниттік кедергі (ЕМИ) орталарында қолданылуы мүмкін.

ТБТ сенсорлары әртүрлі салаларда, соның ішінде авиация, аэроғарыш, мұнай және газ, азаматтық құрылыс және медицина салаларында қолданылады.

Оптикалық сенсорлардағы Брэгг торларының артықшылықтарына мыналар жатады:

Физикалық параметрлердің өзгеруіне жоғары сезімталдық.

Жоғары температура мен қысымы бар ортада жұмыс істеу мүмкіндігі.

Электрлік әсер етпейді, бұл оларды жарылғыш ортада пайдалану үшін қауіпсіз етеді.

Кемшіліктер мыналарды қамтуы мүмкін:

Дәстүрлі электрлік сенсорлармен салыстырғанда өндіру қиын және құны жоғары.

Брэгг торлары немесе Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар (ТБТ - Fiber Bragg Gratings) әртүрлі салаларда, соның ішінде аэроғарыш пен теміржолда кеңінен қолданылады.

2.2 Брэгг торы негіндегі оптикалық дачиктер

Брэгг торы – оптикалық талшықтағы периодты құрылым, ол тек белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстырады және қалғандарының барлығын өткізеді. Мұндай сенсорлардың ерекшелігі - температура, қысым немесе деформация сияқты қоршаған ортадағы физикалық өзгерістерге жауап ретінде толқын ұзындығының өзгеруімен жарықты көрсету қабілеті.

Аэроғарыш өнеркәсібінде Брэгг торлы сенсорлары ұшақтың қанаттары немесе ғарыш кемесінің корпусы сияқты әртүрлі құрылымдардың денсаулығын бақылау үшін қолданылады. Олар күрделі мәселелердің алғышарттары болуы мүмкін микрожарықтарды немесе деформацияларды анықтауға көмектеседі. Сонымен қатар, мұндай сенсорлар қозғалтқыштардағы температура мен қысымды өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Теміржол саласында Брэгг торлы датчиктері рельстер мен жылжымалы құрамның жағдайын бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Олар рельстердегі деформациялар мен жарықтарды, сондай-ақ әртүрлі пойыздар жүйелеріндегі температура мен қысымның өзгеруін анықтай алады. Бұл апаттардың алдын алуға және техникалық қызмет көрсету және жөндеу шығындарын азайтуға көмектеседі.

Брэгг торлы сенсорларының маңызды артықшылығы олардың электромагниттік кедергілерге қарсы тұруы болып табылады, бұл оларды электр қозғалтқыштарының немесе радио құрылғыларының жанында мұндай кедергілер деңгейі жоғары орталарда пайдалану үшін өте қолайлы етеді.

Мәліметтерді оқу үшін арнайы жабдықтың қажеттілігі. Оптикалық сенсорлардағы Брэгг торы әртүрлі параметрлерді бақылауда және өлшеуде маңызды рөл атқарады. Оларды өндіру және пайдалану қиын және қымбат болуы мүмкін болса да, қиын жағдайларда олардың жоғары дәлдігі мен қауіпсіздігі оларды көптеген салаларда баға жетпес құрал етеді.

2.3 Брэгг торы негіндегі теміржол дачиктері

Гонконг политехникалық университетінің зерттеу тобы әзірлеген смарт темір жол мониторингі жүйесі теміржол қауіпсіздігі саласындағы елеулі серпіліс болып табылады. Ол озық технологияларды, соның ішінде талшықты-оптикалық Bragg Grating (ТБТ) сенсорларын және өздігінен басқарылатын магнитті смарт сенсорларды пайдалануға негізделген.

Оптикалық талшықтардың ішіне салынған ТБТ сенсорлары діріл, жеделдету, деформация, жүктеме және температура сияқты әртүрлі параметрлерді өлшей алады. Олар жоғары сенімділік пен дәлдікке ие және ақпаратты нақты уақытта 100 километрден астам қашықтыққа жібере алады. Бұл рельстер мен пойыздардың жағдайын үздіксіз бақылауға мүмкіндік береді [18].



2.1-сурет — Теміржол рельстеріндегі ТБТ дачиктері

Оптикалық кабельдегі Брэгг торының қоршаған ортадағы әсері

Сонымен қатар, өздігінен басқарылатын магнитті смарт сенсорлар магнитті композиттік материалдардың жаңа буынынан жасалған. Олар сыртқы қуатсыз жұмыс істей алады және магнит өрісі мен электр тогын өлшеу үшін қолданылады. Бұл датчиктер қарапайым дизайнға, жоғары экономикалық тиімділікке және пойыз астындағы электр жабдықтары жүйесіндегі ауытқуларды анықтау мүмкіндігіне ие.

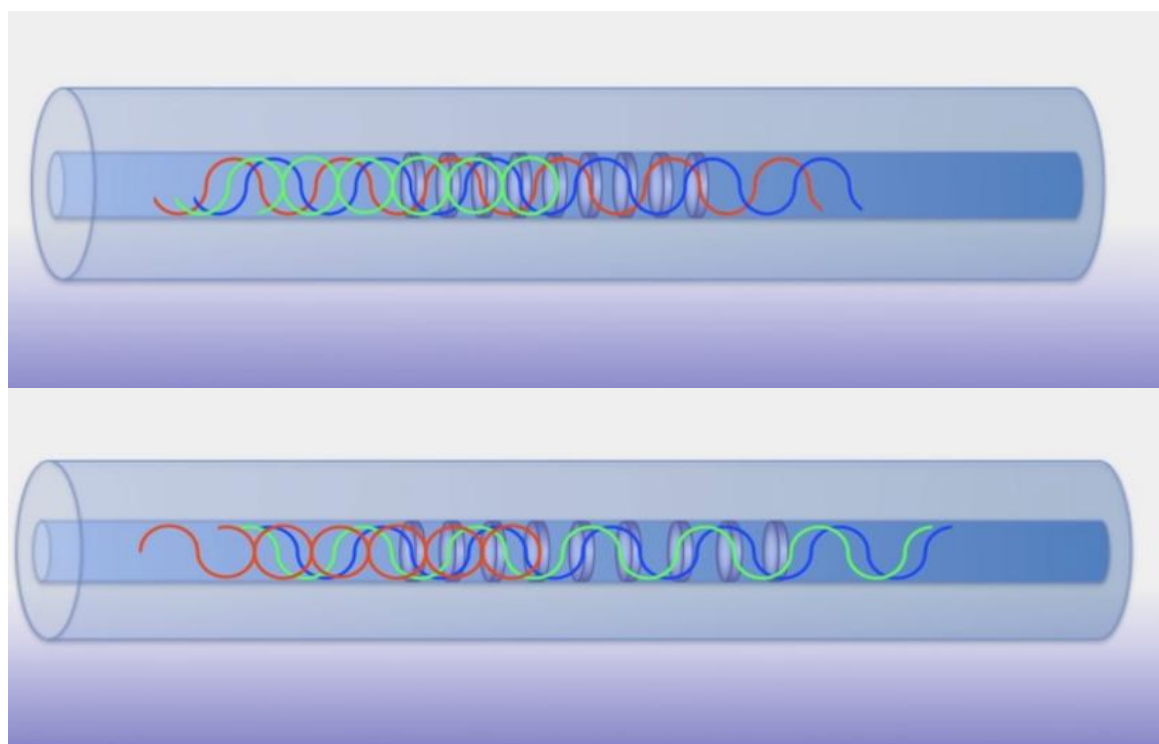
Гонконг политехникалық университетінің смарт теміржол бақылау жүйесі теміржол желілерінің қауіпсіздігі үшін маңызды маңызға ие. Ол операторлар мен диспетчерлерге жолдар мен пойыздардың жай-күйі туралы құнды ақпарат береді, бұл мүмкін болатын апаттардың алдын алу және жолаушылар мен қызметкерлердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша дер кезінде шаралар қабылдауға мүмкіндік береді.



2.2-сурет — Оптикалық талшықтағы ТБТ дачиктері температура, акселерометр

Жетістіктерінің арқасында Гонконг политехникалық университетінің мониторинг жүйесі ұлттық және халықаралық деңгейде танылды.

Ол эталонға айналды және темір жол қауіпсіздігінің жаңа халықаралық стандарттарының негізі болып табылады.



2.3-сурет – Оптикалық кабельдегі Брэгг торының қоршаған ортадағы әсері

3 Брэгг торы күшейткіш жұмыс моделін талдау және симмуляциялау

3.1 Брэгг-Вульф шарты

Брэгг-Вульф шарты кристалдық торға рентген немесе нейтрондық сәулеленудің шашырауымен байланысты негізгі принциптердің бірі болып табылады. Ол ағылшын физигі Уильям Лоуренс Брэгг пен оның ұлы Уильям Генри Брэггтың, сондай-ақ неміс физигі Вильгельм Конрад Рентген Вульфтың құрметіне аталған.

Брэгг-Вульф шарты кристалдық тордың атомдарымен шашыраған рентгендік немесе нейтрондық толқындардың интерференциясын түсіндіреді. Бұл конструктивті кедергі пайда болатын және шашыраңқы сәулелену күшейетін шарттың математикалық тұжырымы.

Брэгг-Вульф шарты бойынша кристалдық тордағы атомдар жазықтықтары арасындағы рентгендік немесе нейтрондық сәулеленудің жүріп өткен жолы толқын ұзындығының бүтін санына тең болғанда интерференция пайда болады. Шарттың тұжырымы келесідей көрінеді:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (3.1)$$

мұнда:

-d - кристалдық тордағы атомдардың жазықтықтары арасындағы қашықтық,

- θ - торға рентгендік немесе нейтрондық сәулеленудің түсу бұрышы,

-n - кедергі ретін көрсететін бүтін сан (1, 2, 3, ...),

- λ - рентгендік немесе нейтрондық сәулеленудің толқын ұзындығы.

Брэгг-Вульф шарты шашыраңқы сәулеленудің күшейетін бұрыштарын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл құбылыс Брэгг интерференциясы деп аталады. Шашыраған сәулеленуді анықтауға және өлшеуге болады, бұл кристалдық материалдың құрылымы, оның атомдық қашықтығы және бағдары туралы ақпарат береді.

Брэгг-Вульф шарты рентгендік дифракциялық талдау және нейтрондық дифракция сияқты зерттеу әдістерінің негізінде жатыр.



3.1-сурет — Брэгг-Вульф шарты

Бұл атомдық деңгейде материалдардың құрылымын зерттеудің қуатты құралы және ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында, соның ішінде физика, химия, материалтану және биологияда қолдануды табады.

Брэгг торы негізінде цифрлық талшықты-оптикалық қайталағыштың математикалық моделі.

Брэгг торлары оптикалық талшықты тарату желілерінде бөлінген шағылыстырғыштар мен сүзгілер ретінде пайдаланылады. Төмендегі формулалар мен теңдеулер негізгі математикалық модельді жасауға мүмкіндік береді:

3.2 Брэгг торын күшейткіш ретінде эрбий әйнегін пайдаланып математикалық модельін құру

Шағылысу толқын ұзындығын есептеуге арналған Брэгг теңдеуі:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.2)$$

Бұл формула Брэгг-Вульф теңдеуі (дифракция шарты) мұнда:

θ - шағылу бұрышы (тәжірибе арқылы өлшенген)

d - жазықаралық қашықтық (туралы ақпараттың негізгі көзі зат)

λ - толқын ұзындығы (белгілі, анодқа байланысты)

n – шағылу реті (көрші жазықтықтар «шағылған» сәулелер жолындағы айырмашылыққа қанша толқын ұзындығы сәйкес келеді)

Брэгг теңдеуін 1913 жылы британдық ғалымдар Уильям Генри Брэгг пен Уильям Лоуренс Брэгг ашты.

Брэгг торының шағылысу коэффициентін есептеу теңдеуі:

$$R = \exp(-2\alpha L)(\tan^2(\kappa L)) \quad (3.3)$$

мұндағы:

R – шағылысу коэффициенті, α – оптикалық талшықтың жұту коэффициенті, L – Брэгг торының ұзындығы, κ – қосылу коэффициенті.
Брэгг торының берілісін есептеу теңдеуі:

$$T = 1 - R \quad (3.4)$$

мұндағы:

T – өткізгіштік.

Эрбия шынысындағы оптикалық күшейткішіндегі (EDFA) күшейтуді есептеу теңдеуі:

$$G = \Gamma \sigma N L a \quad (3.5)$$

мұндағы:

G – күшейту, Γ – конфигурация параметрі, σ – жұтылу қимасы, N – эрбий иондарының концентрациясы, $L a$ – белсенді оптикалық күшейткіштің ұзындығы.

Брэгг торына негізделген сандық талшықты қайталағышты сипаттаудың жүйелік теңдеуі:

$$P_{\text{шығ}} = G(P_{\text{кір}} T + P_{\text{шағл}} R) \quad (3.6)$$

мұндағы: $P_{\text{шығ}}$ – сигналдың шығыс қуаты, $P_{\text{кір}}$ – сигналдың кіріс қуаты, $P_{\text{шағл}}$ – шағылысқан сигналдың қуаты.

Математикалық модельде мысал ретінде бізде талшықты-оптикалық Брэгг торлы қайталағышы бар делік және біз ұсынылған формулалар арқылы оның сипаттамаларын анықтағымыз келеді. Бізде келесі белгілі параметрлер бар делік:

$n = 1,45$ (талшықтың тиімді сыну көрсеткіші)

$\Lambda = 0,5$ мкм (Брэгг торлау кезеңі)

$\alpha = 0,2$ дБ/км (оптикалық әлсіреу коэффициенті)

$L = 1$ мм (Брэгг торының ұзындығы)

$\kappa = 100$ рад/м (байланыстыру коэффициенті)

$\Gamma = 0,7$ (конфигурация параметрі)

$\sigma = 1,0 \cdot 10^{-25}$ м² (сіңіру қимасы)

$N = 1,0 \cdot 10^{25}$ м⁻³ (эрбий ионының концентрациясы)

$L a = 5$ м (белсенді оптикалық күшейткіштің ұзындығы)

$P_{\text{кір}} = 1$ мВт (сигналдың кіріс қуаты)

Енді біз оптикалық талшықты қайталағыштың сипаттамаларын есептеу үшін жоғарыда жазылған формулаларымызды пайдалана аламыз:

Шағылысу толқын ұзындығын есептеуге арналған Брэгг теңдеуі:

$$\lambda = 2nL = 2 * 1,45 * 0,5 * 10^{-6} = 1,45 * 10^{-6} \text{ м (1450 нм)}$$

Брэгг торының шағылысу коэффициентін есептеу теңдеуі:

$$\alpha = 0,2 \text{ дБ/км} * (1 \text{ км}/1000 \text{ м}) = 0,0002 \text{ дБ/м}$$

$$\begin{aligned} R &= (-2\alpha L)(\tanh^2(\kappa L)) \\ &= \exp(-2 * 0,0002 * 0,001) * (\tanh^2(100 * 0,001)) \\ &\approx 0,9986 \end{aligned}$$

Брэгг торының берілісін есептеу теңдеуі:

$$T = 1 - R = 1 - 0,9986 = 0,0014$$

Эрбия шыны оптикалық күшейткішіндегі (EDFA) күшейтуді есептеу теңдеуі:

$$G = G\sigma NLa = \exp(0.7 * 1.0 * 10^{-25} * 1.0 * 10^{25} * 5) \approx 64.5$$

Брэгг торына негізделген сандық талшықты қайталағышты сипаттаудың жүйелік теңдеуі:

$$P_{\text{шығ}} = G * (P_{\text{кір}} * T) = 64.5 * (1 * 0.0014) \approx 0.0903 \text{ мВт}$$

Осылайша, ұсынылған формулалар мен берілген параметрлерді пайдалана отырып, біз Брэгг торы негізінде талшықты-оптикалық қайталағыштың келесі сипаттамаларын анықтадық:

Шағылысу толқын ұзындығы: $\lambda = 1450 \text{ нм}$

Брэгг торының шағылыстыру қабілеті: $R \approx 0,9986$

Брэгг торының өткізгіштігі: $T = 0,0014$

Эрбиум әйнегіне (EDFA) негізделген оптикалық күшейткіштегі кіріс:

$G \approx 64,5$

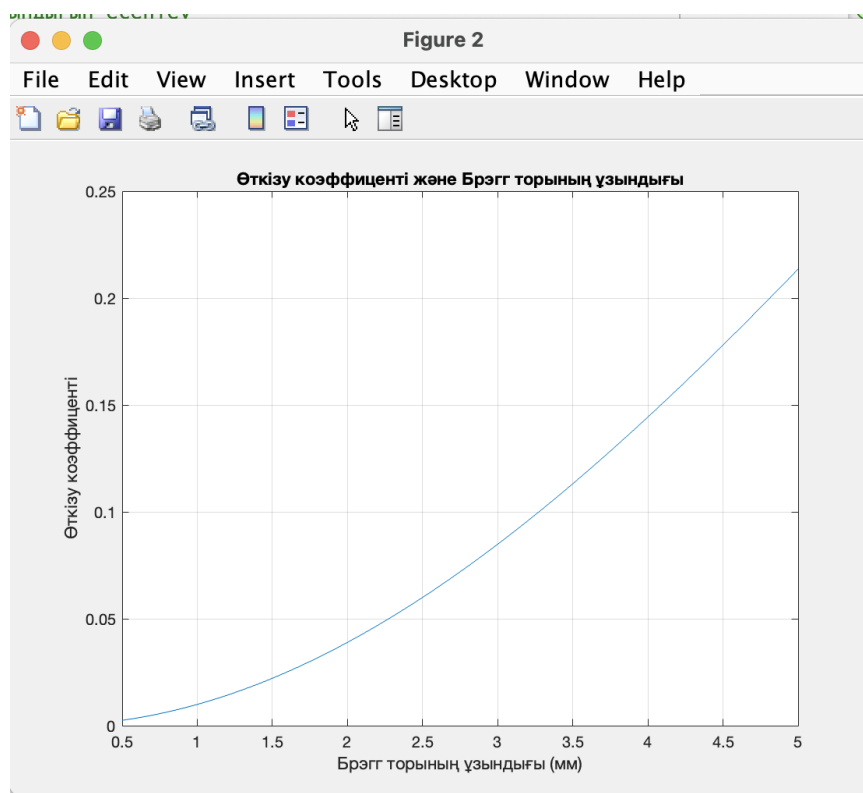
Сигналдың шығыс қуаты: $P_{\text{out}} \approx 0,0903 \text{ мВт}$

3.3 Математикалық модельді Matlab бағдарламасында симмуляция жасау

Бұл мысал талшықты-оптикалық Брэгг торлы қайталағышын сипаттау үшін ұсынылған формулаларды қалай пайдалану керектігін көрсетеді. Дегенмен, нақты жүйелерде талшықты-оптикалық қайталағыштарды жобалау

және талдау кезінде ескеру қажет қосымша факторлар мен шектеулер болуы мүмкін екенін атап өткен жөн.

Және осы алынған мәліметтерді Matlab бағдарламасы арқылы симмуляция жасап графигін ала аламыз:

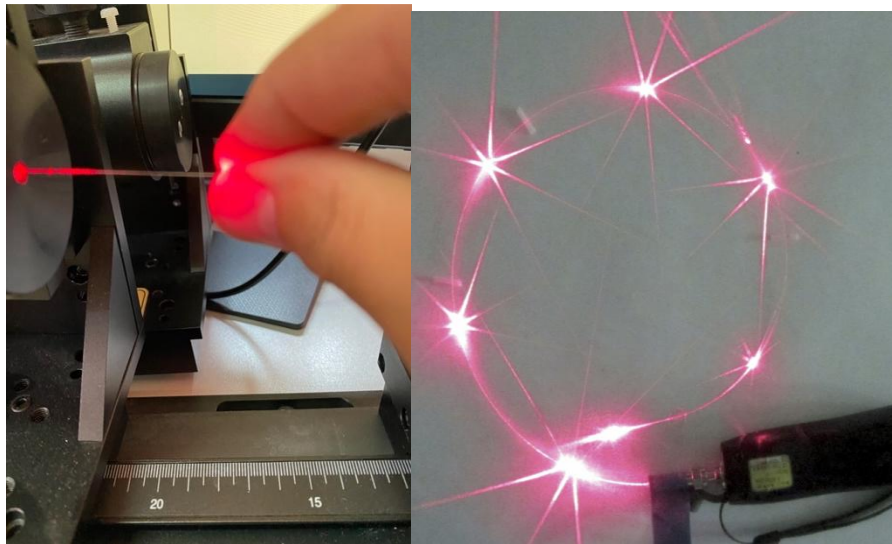


3.2-сурет — Matlab бағдарламасындағы шыққан график

3.4 Брэгг торын оптикалық талшықтан қалай өтетінін тексеріп көру

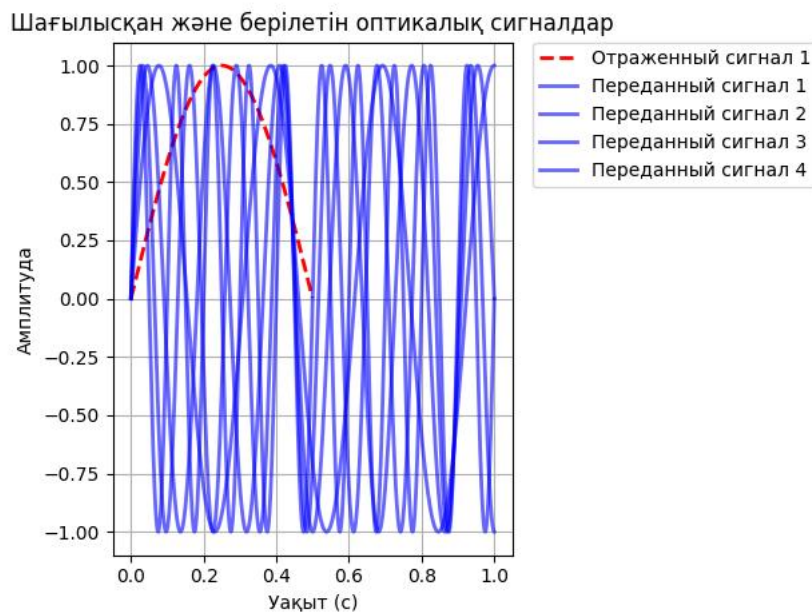
Яғни біз байқасақ болады біздің бұл жерде жоғарыда көрсетілген формулалар көмегімен біз Брэгг торындағы шағылысулары, қайталағыштарды, қуатты анықтай аламыз және сол формула арқылы matlab бағдарламасынан өзімізге қажетті графиктер мен симмуляция ала аламыз.

Python программалау тілімен Брэгг торындағы шағылған және берілген сигналдың симмуляциясын алмыз. Бұл графикте 5 сигнал өткізілген соның 4 еуі өткізіліп 1 еуі шағылған.



3.2- сурет — ТБТ практикада бақылау

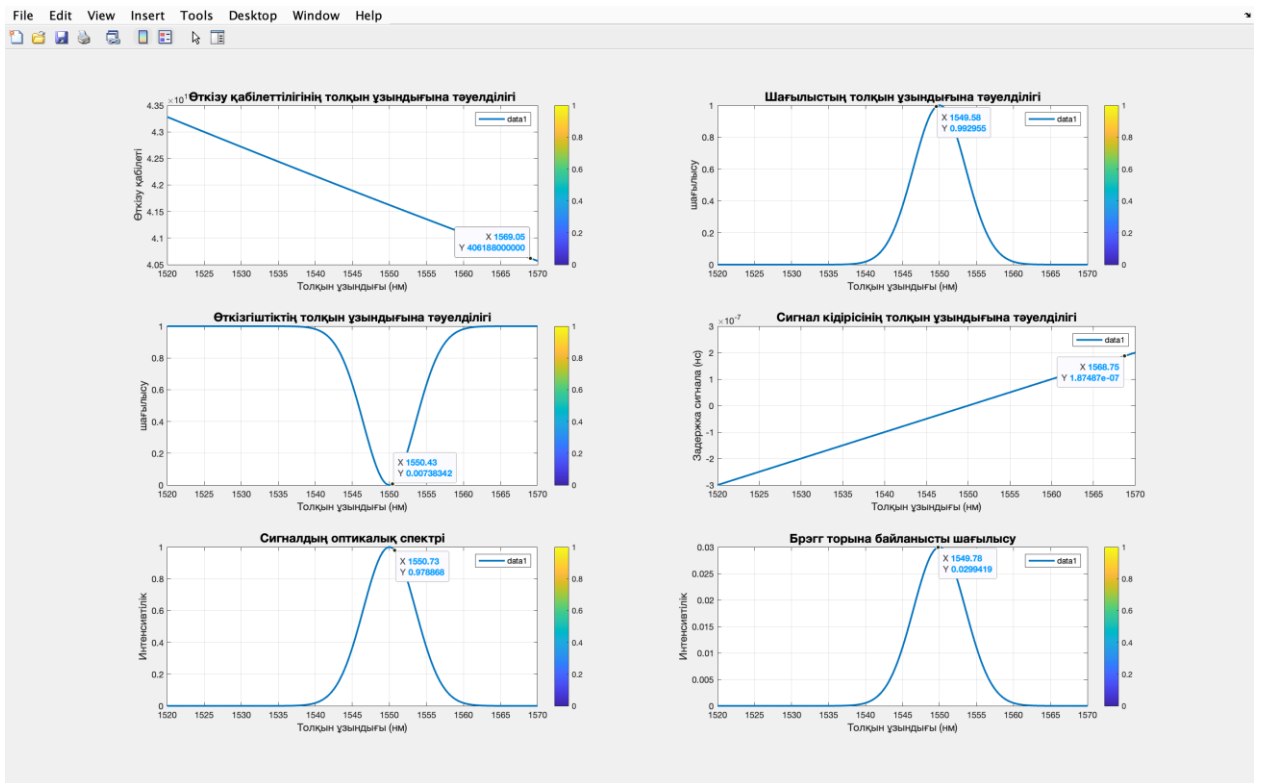
3.5 Matlab бағдарламасында және Python программалау тілінде симмуляция жасау



3.4-сурет — python бағдарламалау тіліндегі Брэгг торының өткізілген және шағылған графигі

Матлаб бағдарламасы көмегімен симмуляция:

Брэгг торына байланысты шағылысу, өткізгіштіктің толқын ұзындығына тәуелділігі, сигнал кідірісінің толқын ұзындығына тәуелділігі, шағылыстың толқын ұзындығына тәуелділігі, өткізу қабілеттілігінің толқын ұзындығына тәуелділігі графиктерін алу



3.5-сурет — Матлаб бағдарламасынан алынған графиктер

4 Брэгг торының спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы фотоиндукциялау, фазалық маска және шығындары

4.1 Брэгг торының спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы

Брэгг торы біз білетініміздей ауа райына температурасына қоршаған ортасына байланысты өзгереді әрі деформацияға ұшырайды сол төмендегі суретке байланысты көрсек болады:

Брэгг торын қолданудың негізгі орталықтарының бірі физика және оптика саласы болып табылады. Брэгг торы – жарық дифракциялық қасиеті бар периодты құрылым. Ол қалыпты торда орналасқан атомдардан, ионосфералардан немесе басқа бөлшектерден тұрады.

Брэгг торын оптикада қолдану оптикалық сүзгілерді, дифракциялық тарақтарды және интерферометрлерді құрумен байланысты. Брэгг торлары фотоникада, талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінде және лазерлік технологияда қолданылады. Олар жарықтың белгілі бір толқын ұзындығының өтуін басқаруға мүмкіндік береді және қажетті сипаттамалары бар оптикалық торларды жасау мүмкіндігін береді.

Брэгг торлары сонымен қатар рентген сәулелерінің дифракциясында және нейтрондардың дифракциясында қолданылады. Бұл аймақтарда олар кристалдар мен молекулалардың құрылымдық талдауын өлшеу және материалдарды сипаттау үшін қолданылады.

Сонымен қатар, Брэгг торлары акустикалық сүзгілер мен кідірістерді жасау үшін акустикада, фазалық антенна массивтерін жасау үшін микротолқынды технологияда, сондай-ақ кристаллографияда және материалдардың құрылымын зерттеу үшін материалтануда қолданылады.

Осылайша, Брэгг торы ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолданудың кең ауқымына ие, мұнда жарықтың, рентгендік немесе нейтрондық толқындардың, акустикалық толқындардың және толқындардың басқа түрлерінің дифракциясы мен интерференциясын бақылау қажет.

Брэгг торы-оптикалық талшық бойымен немесе басқа оптикалық ортада мезгіл-мезгіл өзгередінін сыну индексі бар құрылым. Брэгг торы жарықты Брэгг толқын ұзындығы деп аталатын белгілі бір толқын ұзындығымен шағылыстыра алады. Бұл толқын ұзындығы тордың периодымен және ортаның сыну индексімен анықталады.

Брэгг торының спектрлік сипаттамасы оның әртүрлі толқын ұзындығындағы жарықты қалай көрсететінін анықтайды. Сонымен, Брэгг торы әдетте тор кезеңіне сәйкес келетін толқын ұзындығын көрсетеді және қалған толқын ұзындығын өткізеді. Спектрлік шағылысу жолағының ені-бұл тор шағылысатын толқын ұзындығының диапазоны және әртүрлі факторларға, соның ішінде тордың ұзындығына, сыну индексінің модуляция күшіне және сыну индексінің профиліне байланысты.

Брэгг торының спектрлік сипаттамаларының мещысуы бірнеше себептерге байланысты болуы мүмкін. Ең көп таралған себептердің бірі-

температураның өзгеруі, бұл оптикалық талшықтың термиялық кеңеюіне немесе қысылуына әкелуі мүмкін, бұл тор кезеңінің өзгеруіне әкеледі. Тағы бір жалпы себеп-механикалық кернеу, ол тор кезеңін де өзгерте алады. Бұл екі әсер де Брэггтың толқын ұзындығының сысуына әкелуі мүмкін.

Сонымен қатар, Брэгг торлары әртүрлі салаларда, соның ішінде телекоммуникация мен сенсорлық технологияда кеңінен қолданылатынын атап өткен жөн. Оптикалық байланыста Брэгг торлары толқын ұзындығының мультиплексорлары ретінде әртүрлі толқын ұзындығының сигналдарын біріктіру және бөлу үшін қолданылады.

Сенсорлық технологияларда Брэгг торлары температура, кернеу және қысым сияқты физикалық параметрлердің сенсорлары ретінде қызмет ете алады. Мысалы, Брэгг торына негізделген температура сенсоры химиялық реактордағы температураны бақылау немесе электронды құрылғылардағы температураны бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Мұндай сенсорлар температураның немесе кернеудің өзгеруіне жауап ретінде Брэггтың толқын ұзындығының өзгеруіне негізделген.

Сондай-ақ, Брэгг торының сипаттамалары оны жасау кезінде реттелуі мүмкін екенін ескеру маңызды. Тор кезеңі және сыну индексінің модуляция күші сияқты өндіріс параметрлерін өзгерту арқылы қажетті спектрлік сипаттамалары бар торды алуға болады.

Сонымен, Брэгг торларын сәулеленудің толқын ұзындығын таңдау үшін талшықты лазерлер мен диодты лазерлерде де қолдануға болады. Бұл қосымшаларда Брэгг торы тек белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты көрсететін резонатор ретінде қызмет етеді.

"Fiber Bragg Gratings" кітабында автор: Raman Kashyap олардың оптикалық қасиеттерін тереңірек түсінуге және болжауға мүмкіндік беретін Брэгг торларын талдау және модельдеу әдістерін қарастырады. Кітапта сипатталған талдау және модельдеу әдістері туралы кейбір мәліметтер:

Ақырлы элементтер әдісі (Finite Element Method, FEM): бұл әдіс Брэгг торларын сандық модельдеу үшін кеңінен қолданылады. Ол Талданатын аймақты Максвелл теңдеулері сандық түрде шешілетін ақырлы элементтерге бөлуге негізделген. Соңғы элементтер әдісі талшықтағы күрделі сыну индексі мен гетерогенділік профильдерін есепке алуға мүмкіндік береді, бұл дәлірек нәтиже береді [11].

Матрицаны беру әдістері (Transfer Matrix Methods): бұл әдістер Брэгг торы арқылы жарықтың таралуын сипаттайтын матрицаны беруге негізделген. Матрицаны беру әдістерін қарапайым сыну индексі профильдері бар торларды аналитикалық модельдеу үшін, сондай-ақ компьютерлік бағдарламалар арқылы сандық модельдеу үшін қолдануға болады [12].

Брэгг торларының негізгі параметрлері: кітапта Брэгг торларының оптикалық қасиеттерін анықтайтын маңызды параметрлер талқыланады. Тор периоды мен талшықтың сыну көрсеткішімен анықталатын Брэгг толқын ұзындығы, тордағы сыну көрсеткішінің максималды және минималды мәні арасындағы айырмашылықты сипаттайтын модуляция тереңдігі және белгілі

бір оптикалық сипаттамаларға жету үшін өзгертілуі мүмкін сыну индексінің профилі кіреді.

Брэгг торларын талдау және модельдеу олардың белгілі бір толқын ұзындығының шағылысуы мен өтуі, дисперсиясы және өткізу қабілеттілігі сияқты қасиеттерін зерттеуге және оңтайландыруға мүмкіндік береді. Бұл әдістер оптикалық байланыс пен сенсорлардағы арнайы қолданбаларға арналған Брэгг торларын жобалауға және жобалауға көмектеседі.

Әрқайсысына тоқтала кетсек:

Соңғы элемент әдісі (Finite Element Method, FEM):

Ақырлы элементтер әдісі-Брэгг торларын сандық модельдеудің қуатты құралы. Ол талданатын аймақты ақырлы элементтер деп аталатын шағын ішкі аймақтарға бөлуге негізделген. Әр элементтің ішінде талшықтағы жарықтың таралуын сипаттайтын Максвелл теңдеулері шешіледі. Содан кейін бұл теңдеулер бүкіл тордың оптикалық қасиеттерін сипаттайтын Ғаламдық матрицаны алу үшін біріктіріледі.

Соңғы элементтер әдісінің артықшылығы оның талшықтағы күрделі сыну индексі мен гетерогенділік профильдерін есепке алу қабілетінде. Ол әртүрлі пішіндер мен геометриялармен Брэгг торларын дәлірек модельдеуге және талдауға мүмкіндік береді. Дегенмен, бұл әдіс есептеу ресурстарын қажет етеді және кейбір басқа әдістермен салыстырғанда іске асыру қиынырақ болуы мүмкін.

Матрицаны беру әдістері (Transfer Matrix Methods):

Матрицаны беру әдістері Брэгг торларын талдау және модельдеу үшін кеңінен қолданылады. Олар жарықтың тормен өзара әрекеттесуін сипаттайтын матрицаны берудің математикалық тұжырымдамасына негізделген. Бұл әдістерді қарапайым сыну индексі профильдері бар торларды аналитикалық модельдеу және компьютерлік бағдарламаларды қолдана отырып сандық модельдеу үшін қолдануға болады.

Матрицаны беру әдістерінде тор белгілі оптикалық қасиеттері бар қабаттар жиынтығына бөлінеді. Әрбір қабат шағылысу мен өткізгіштікті ескере отырып, жарықтың қабат арқылы өтуін ескеретін беріліс матрицасымен сипатталады. Содан кейін қабаттардың беріліс матрицалары біріктіріліп, бүкіл тор үшін жалпы беріліс матрицасын алады. Бұл беру матрицасын шағылысу, өткізу және фазалық сдысу сияқты тордың оптикалық сипаттамаларын есептеу үшін пайдалануға болады.

Матрицаны беру әдістері әдетте қарапайым сыну индексі профильдері бар торлар үшін қолданылады, мұнда аналитикалық шешімдер мүмкін. Олар Брэгг торларының негізгі оптикалық қасиеттерін анықтаудың жылдам және тиімді шешімін ұсынады.

Осы әдістерді қолдана отырып, Брэгг торларын талдау және модельдеу олардың белгілі бір толқын ұзындығының шағылысуы мен өтуі, дисперсиясы және өткізу қабілеттілігі сияқты қасиеттерін зерттеуге және оңтайландыруға мүмкіндік береді. Олар оптикалық байланыс пен сенсорлардағы әртүрлі қосымшалар үшін Брэгг торларын жобалауға және жобалауға көмектеседі.

"Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing" кітабында авторлар Брэгг торларын жасаудың әртүрлі әдістерін және талшықтағы сыну көрсеткішінің мерзімді өзгерістерін жасауға мүмкіндік беретін жазу процестерін қарастырады. Міне, осы әдістердің кейбірі туралы мәліметтер:

Фото сипаттама: Фото Сипаттама-Брэгг торларын жасаудың ең кең таралған әдістерінің бірі. Ол талшықтағы сыну индексінің мерзімді өзгерістерін жасау үшін ультракүлгін (ультракүлгін) сәулеленуді қолдануға негізделген. Фотосезімтал материалдар мен талшықты-оптикалық жеңді қолдану арқылы Брэгг торының мерзімді құрылымын жасайтын фотохимиялық реакциялар пайда болады.

Лазерлерді қолдану: лазерлер Брэгг торларын жасау үшін де қолданылады. Бұл әдісте лазерлік сәулелену сыну индексінің мерзімді модуляциясын жасау үшін талшықтың белгілі бір аймағына бағытталған. Лазерлік сәулелену әртүрлі тәсілдермен жүзеге асырылуы мүмкін, мысалы, сәуле тікелей талшыққа немесе талшыққа қолданылатын фотосезімтал материалдар арқылы.

Интерференция әдістері: интерференция әдістері интерференциялық жарық сәулелерінің өзара әрекеттесуі арқылы Брэгг торларын жасауға мүмкіндік береді. Бір мысал-екі сәулелі интерференция әдісі, онда әртүрлі түсу бұрыштары бар екі лазерлік сәуле сыну индексінде мерзімді өзгерістер жасайды. Бұл әдіс әртүрлі параметрлері бар торларды қалыптастыруда жоғары дәлдік пен икемділікті қамтамасыз етеді.

Фазалық камуфляж: фазалық камуфляж - бұл жазылған интерференциялық жарық сәулесінің фазасын өзгерту арқылы Брэгг торларының пішіні мен параметрлерін басқаруға мүмкіндік беретін әдіс. Бұл әдіс сыну индексінің күрделі профилдерін алуға және өткізу қабілеттілігі мен модуляция тереңдігі сияқты Брэгг торларының сипаттамаларын басқаруға мүмкіндік береді.

Талшық ішіндегі Брэгг тор құрылымдарын фотоиндукциялау процесі жарықтың фотосезімтал материалдарға әсеріне негізделген. Бұл жағдайда фотохимиялық реакциялардың ерекшеліктеріне байланысты талшықтың сыну индексі өзгереді. Бұл процесс 1978 жылы ашылды және содан бері жарық беру техникасында кеңінен қолданылады.

4.2 Брэгг торларын фотоиндукциялау процесі

Фотосезімтал талшық: Брэгг торларын фотоиндукциялау процесінің басталуы фотосезімталдығы бар талшықты пайдалану болып табылады. Мұндай талшықтар әдетте олардың фотосезімталдығын арттыратын германия немесе фосфор қоспаларымен жасалады.

Ультракүлгін сәулелену: содан кейін талшық ультракүлгін сәулемен сәулеленеді, ол талшықтағы фотосезімтал қоспалармен әрекеттеседі. Қажетті

Брэгг торын алу үшін ультракүлгін сәулеленудің қарқындылығы мен ұзақтығын бақылауға болады.

Фотохимиялық реакциялар: ультракүлгін сәулелену талшықта фотохимиялық реакцияларды тудырады, бұл сыну индексінің өзгеруіне әкеледі. Бұл өзгерістер белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты көрсете алатын Брэгг торын құрайды.

Брэгг торларын фотоиндукциялаудың артықшылықтары:

Қарапайымдылық пен ыңғайлылық: Брэгг торларын Фотоиндукциялау салыстырмалы түрде қарапайым және ыңғайлы әдіс. Ол күрделі жабдықты немесе арнайы дағдыларды қажет етпейді.

Икемділік: Фотоиндукцияланған жасау шағылысу толқынының ұзындығын, өткізу қабілеттілігін және тордың ұзындығын қоса алғанда, әртүрлі сипаттамалары бар Брэгг торларын жасауға мүмкіндік береді.

Жоғары тиімділік: фотоиндукцияланған жасау әдісімен жасалған Брэгг торлары жоғары шағылысу тиімділігіне ие және жарыққа ұзақ уақыт әсер ете алады.

Теория және формулалар:

Брэгг торларының жұмыс теориясы интерференция және Жарық дифракциясы принциптеріне негізделген. Брэгг торынан өткен кезде жарық сыну индексінің өзгеруінің әр қабатынан шағылысады және бұл шағылысқан толқындар бір-біріне кедергі жасайды.

мұндағы λ -тормен шағылысатын жарықтың толқын ұзындығы, n -талшықтағы орташа сыну индексі, және Λ -тор кезеңі.

Брэгг торларын жасауда лазерлерді қолдану

Брэгг торларын жасау процесінде лазерлерді қолдану талшықтағы сыну индексінің мерзімді өзгеруін индукциялау үшін лазерлік сәулеленуді қолдануға негізделген өте кең таралған әдіс болып табылады

Лазерлерді Пайдалану процесі

Лазер сәулесінің фокусы: бұл әдісте лазерлік сәулелену талшықтың белгілі бір аймағына бағытталған. Мұны талшықты тікелей сәулелендіру немесе талшыққа жағуға болатын фотосезімтал материалдар арқылы жасауға болады.

Сыну индексіндегі өзгерістерді индукциялау: лазерлік сәулеленудің әсерінен талшықтағы сыну индексі өзгереді. Бұл өзгеріс лазерлік сәулеленудің әсерінен болатын жылу және фотохимиялық процестерден туындайды.

Брэгг торын жасау: сыну индексіндегі өзгерістер Брэгг торын білдіретін талшықта периодты құрылымды жасайды. Бұл тор белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстыруға қабілетті.

Лазерлерді қолданудың артықшылықтары:

Дәлдік: лазерлер сыну индексінің өзгеру процесін өте дәл басқаруға мүмкіндік береді, нәтижесінде нақты сипаттамалары бар Брэгг торлары пайда болады.

Тиімділік: Брэгг торларын жасау үшін лазерлерді пайдалану жарықтың шағылысу тиімділігі жоғары торларды алуға мүмкіндік беретін тиімді әдіс болып табылады.

Икемділік: лазерлерді қолдана отырып, әр түрлі типтегі және конфигурациядағы Брэгг торларын жасауға болады, бұл әдісті әр түрлі қолдануға икемді етеді.

Брэгг торларын құруға арналған интерференция жолақтары

Интерференция әдістері Талшықта Брэгг торларын жасау үшін кеңінен қолданылады. Олар сыну индексінің өзгеруінің периодты құрылымын құру үшін екі немесе одан да көп жарық сәулелерінің өзара әрекеттесуіне негізделген.

Интерференцияны қолдана отырып, Брэгг торларын құру процесі

Жарық сәулесінің интерференциясы: екі немесе одан да көп жарық сәулелері белгілі бір бұрышпен қиылысып, кедергі құрылымын жасайды. Бұл мезгіл-мезгіл өзгеретін жарық қарқындылығы бар аймақтар.

Сыну индекіндегі өзгерістерді индукциялау: интерференция аймақтарындағы жарық сәулелерінің қарқындылығы талшықтың сыну индекіндегі өзгерістерді тудырады.

Брэгг торын жасау: нәтиже-белгілі бір толқын ұзындығының жарығын көрсететін Брэгг торының рөлін атқаратын периодтық құрылымды құру.

Интерференция әдістерін қолданудың артықшылықтары

Дәлдік: интерференция әдістері қажетті параметрлері бар торларды қалыптастыру мүмкіндігін қамтамасыз ете отырып, Брэгг торларын жасау кезінде жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Икемділік: интерференциялық әдістер Брэгг торларын қалыптастыруда үлкен икемділікті ұсынады. Жарық сәулелері арасындағы бұрыштың өзгеруі тор кезеңін басқаруға мүмкіндік береді, ал жарық қарқындылығының өзгеруі тор модуляциясының тереңдігін басқаруға мүмкіндік береді.

Брэгг торларын жасауға арналған фазалық Маска

Фазалық маскировка-бұл жазылған интерференциялық жарық сәулесінің фазасын өзгерту арқылы Брэгг торының пішіні мен параметрлерін басқаруға мүмкіндік беретін әдіс.

Фазалық маска: фазалық маска-ол арқылы өтетін жарықтың фазасын өзгертетін арнайы құрылғы. Фазалық масканы белгілі бір профильге сәйкес Жарық фазасын өзгерту үшін жобалауға болады, бұл қажетті параметрлермен Брэгг торының пайда болуына әкеледі.

Сыну индекіндегі өзгерістерді индукциялау: фазалық маска арқылы өткен Жарық фазалық Маска профиліне сәйкес талшықты-оптикалық сыну индекіндегі өзгерістерді тудырады.

Брэгг торын жасау: нәтиже-белгілі бір толқын ұзындығының жарығын шағылыстыруға қабілетті берілген параметрлері бар Брэгг торын жасау.

Фазалық маскировка қолданудың артықшылықтары

Тор параметрлерін басқару: фазалық маскировка Брэгг торының параметрлерін, соның ішінде тор кезеңін, модуляция тереңдігін және профиль пішінін дәл бақылауға мүмкіндік береді.

Күрделі торларды құру: фазалық маскировка қолдану арқылы белгілі бір қосымшаларға бейімделетін күрделі торлар жасауға болады.

Басқа әдістер сияқты, Брэгг Заңы фазалық маскировка мен интерференция әдістерін қолдана отырып жасалған Брэгг торларының жұмыс теориясында шешуші рөл атқарады.

Оптикалық сенсорлардағы Брэгг торы

Брэгг торы әртүрлі қабаттардан шағылысқан толқындар бір-біріне кедергі жасайтын Брэгг дифракциясы принципі бойынша жұмыс істейді. Егер жарықтың толқын ұзындығы мен қабаттар арасындағы қашықтық Брэгг шартын қанағаттандырса, толқындар фазада интерференцияланады, нәтижесінде толқын шағылысады.

4.3 Оптикалық кабельдерде Брэгг торын қолданумен байланысты шектеулер мен мәселелер, сонымен қатар техникалық мәселелер мен өндіріс шығындары.

Оптикалық кабельдерде Брэгг торларын пайдалану толқын ұзындығын дәл бақылау мүмкіндігін және тамаша тұрақтылықты қоса алғанда, бірқатар артықшылықтарды қамтамасыз етеді. Дегенмен, бұған байланысты кейбір шектеулер мен проблемалар да бар:

1. Жылу сезімталдығы: Брэгг торлары температураның өзгеруіне сезімтал, бұл шағылысқан толқын ұзындығының өзгеруіне әкелуі мүмкін. Бұл кейбір қолданбаларда температура компенсациясын қажет етуі мүмкін.

2. Созылу сезімталдығы: Брэгг торының талшықтары механикалық кернеуге де сезімтал, бұл шағылысқан жарық толқынының ұзындығының өзгеруіне әкелуі мүмкін. Бұл талшық механикалық кернеуге немесе деформацияға ұшыраған қолданбаларда мәселе болуы мүмкін.

3. Өндірістің күрделілігі: Брэгг торлы талшықтарын өндіру процесі салыстырмалы түрде күрделі және жоғары дәлдікті қажет етеді. Бұл өндірістің өзіндік құнына әсер етіп, оларды кәдімгі талшықты-оптикалық кабельдерге қарағанда қымбаттауы мүмкін.

4. Шектеулі динамикалық диапазон: Брэгг торлы талшықтары шектеулі динамикалық диапазонға ие, бұл олардың жоғары қуатта жұмыс істеу мүмкіндігін шектейді.

5. Шектеулі өткізу қабілеттілігі: Брэгг торлы талшықтары кәдімгі талшықтармен салыстырғанда олардың өткізу қабілетін шектейтін белгілі бір толқын ұзындығын ғана көрсетеді.

Осы проблемалар мен шектеулерге қарамастан, Брэгг торлы талшықтары толқын ұзындығын дәл бақылау және жоғары тұрақтылық қажет болатын көптеген қолданбаларда маңызды құрал болып қала береді.

Шешу жолдар:

1. Жылулық сезімталдық талшықты-оптикалық Брэгг торлары (ТБТs) жоғары жылу сезімталдығымен танымал. Себебі оптикалық талшықтың физикалық қасиеттері, оның ішінде сыну көрсеткіші мен тор геометриясы температураға байланысты өзгереді. Бұл ТБТ көрсететін толқын

ұзындығының өзгеруіне әкеледі, бұл кейбір қолданбаларда ақаулық тудыратындай маңызды болуы мүмкін. Жылу әсерлерін өтеу қосымша шараларды қажет етеді, мысалы, арнайы материалдарды пайдалану немесе температураны бақылау, бұл жүйенің күрделілігі мен құнын арттыруы мүмкін.

Негіздеме: ТБТs термиялық сезімталдығы нақты қолданбаға байланысты кемшілігі де, артықшылығы да болуы мүмкін. Кейбір жағдайларда бұл сезімталдық ТБТs температура сенсорлары ретінде пайдалану үшін өте қолайлы етеді.

Қалай әрекет ету керек: Термиялық сезімталдық проблема болып табылатын қолданбалар үшін температураны өтеу әдістерін қолдануға болады. Мысалы, анықтама ретінде температураның өзгеруінен оқшауланған жұп ТБТs пайдалануға болады. Бұл толқын ұзындығының термиялық ығысуын өтейді.

1. Кернеуге сезімталдық:

ФБГ механикалық кернеуге де сезімтал. Талшық созылғанда немесе сығылғанда тордың периоды өзгереді, нәтижесінде шағылған толқын ұзындығының ығысуы болады. Бұл құрылымдық бақылау немесе акустикалық анықтау сияқты талшық елеулі механикалық кернеуге ұшырайтын қолданбаларда мәселе болуы мүмкін. Дегенмен, екінші жағынан, бұл қасиет жоғары сезімтал кернеу мен деформация сенсорларын жасау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Негіздеме: ФБГ-лардың механикалық кернеуге сезімталдығы, олардың жылулық сезімталдығы сияқты, артықшылық үшін пайдаланылуы мүмкін. ТБТs ғимараттар мен көпірлердің жағдайын бақылаудан биомедициналық қолданбаларға дейін көптеген қолданбаларда штамм және деформация сенсорлары ретінде пайдаланылады.

Қалай әрекет ету керек: Кернеу сезімталдығы проблема болып табылатын қолданбаларда бұл сезімталдықты азайту үшін арнайы ТБТ жасау әдістерін қолдануға болады. Сондай-ақ, кернеуге сезімталдықты азайту үшін жылу кеңеюінің төмен коэффициенті бар материалдарды қолдануға болады.

2. Өндірістің күрделілігі:

ТБТ өндіру процесі күрделі және жоғары дәлдікті талап етеді. Әдетте бұл күрделі жабдықты және дәл бақылауды қажет ететін талшық өзегіне торды «жазу» үшін ультракүлгін лазерді пайдалануды қамтиды. Ол сондай-ақ мамандандырылған материалдар мен процедураларды қажет етеді, бұл кәдімгі талшықтармен салыстырғанда өнімнің өзіндік құнын арттырады.

Негіздеме: ТБТ қарапайым оптикалық талшықтарға қарағанда өндіру қиынырақ және қымбат болса да, олар көптеген қосымшаларда оларды қажет ететін бірегей қасиеттер жиынтығын қамтамасыз етеді. Бұл олардың белгілі бір толқын ұзындығын дәл және дәйекті түрде көрсету қабілетін қамтиды, бұл оларды көптеген технологиялық қолданбалар үшін құнды құрал етеді.

Қалай күресуге болады: ТБТ өндірісінің құны мен күрделілігін азайту үшін жаңа әдістер мен технологияларды қолдануға болады, мысалы, торларды «жазу» үшін фемтосекундтық лазерлерді пайдалану немесе өндіріс

жылдамдығын арттыру және еңбек шығындарын азайту үшін автоматтандырылған жүйелерді пайдалану.

4. Шектеулі динамикалық диапазон:

ТБТ-де динамикалық диапазон шағылысатын тордың қасиеттерімен шектеледі. Жоғары қуаттарда шағылысқан сигнал қанық болуы мүмкін, бұл ТБТ жұмыс істей алатын максималды қуатты шектейді. Бұл телекоммуникациялық жүйелер сияқты жоғары қуатпен жұмыс істеу қажет қолданбаларда мәселе болуы мүмкін.

Негіздеме: ТБТ шектеулі динамикалық диапазоны олардың жұмыс істеуінің тікелей салдары болып табылады. Дегенмен, олар жоғары өңдеу қуатын қажет етпейтін көптеген қосымшаларда тиімді пайдаланылуы мүмкін.

Қалай күресуге болады: Динамикалық диапазонды арттыру үшін параллель немесе сериялық конфигурацияда бірнеше ТБТ қолдануға болады. Бұл жүктемені бірнеше торға бөлу арқылы үлкенірек қуат ауқымын өңдеуге мүмкіндік береді.

5. Өткізу жолағын шектеу:

ТБТ тек белгілі бір толқын ұзындығын көрсетеді, бұл олардың спектрлік өткізу жолағын шектейді. Өткізу қабілеттілігін қажет ететін қолданбаларда бұл мәселе болуы мүмкін. Дегенмен, әртүрлі толқын ұзындығы бар бірнеше ТБТ пайдалану сияқты әдістер бұл шектеуді белгілі бір дәрежеде жеңе алады.

Негіздеме: ТБТ өткізу қабілетінің шегі олардың жұмыс істеуінің табиғи ерекшелігі болып табылады. Олар нақты толқын ұзындығын жоғары дәлдікпен көрсетуге арналған, яғни олар міндетті түрде шектеулі өткізу қабілетіне ие болады.

Қалай күресуге болады: Өткізу қабілетін арттыру үшін әрқайсысы әртүрлі толқын ұзындығын көрсету үшін реттелетін бірнеше ТБТ қолдануға болады. Бұл жүйеге бір уақытта толқын ұзындығының үлкен санымен жұмыс істеуге мүмкіндік береді, жалпы өткізу қабілеттілігін арттырады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе дипломдық жұмыста келесі негізгі нәтижелер алынды:

Дипломдық жұмыс Брэгг торы негізіндегі сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтаудың жаңа тәсілін зерттеуге және дамытуға арналған.

Жұмыста талшықты-оптикалық қайталағыштарды анықтау және басқарудың қолданыстағы әдістері талданады, сонымен қатар Брэгг торының қайталағыш сипаттамаларына әсері зерттеледі. Брэгг торын пайдалана отырып, сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтаудың жаңа тәсілін құруға басты назар аударылады, бұл оның сипаттамаларын жақсартуға және деректерді беру сенімділігін арттыруға мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында Брэгг торы негізіндегі талшықты-оптикалық қайталағыштың жұмысын талдау үшін математикалық модельдер мен тәжірибелік әдістер әзірленді. Брэгг торын күшейткіш ретінде эрбий әйнегін пайдаланып математикалық модельдерді құрдым. Соны симмуляция жасау үшін Matlab бағдарламасында жасап көрдім. Сонымен қатар Python бағдарламалық тілінде Брэгг торының симмуляциясын жасадым.

Тәжірибелер жаңа тәсілді қолдану есебінен қайталағыштың өнімділігі мен тұрақтылығының айтарлықтай жақсарғанын көрсетті.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, қолданыстағы байланыс және деректерді беру жүйелерінде Брэгг торы негізіндегі сандық талшықты-оптикалық қайталағышты алшақ қоя отырып сигналды күшейту әдісін енгізу бойынша практикалық ұсыныстарды ұсынды.

Бұл жұмыс қазіргі таңда жаңа технологиялар шығару үшін маңызды болып саналды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

[1] Gilbert, S.L., W.C. Swann, and C.M. Wang, “Hydrogen cyanide H¹³C¹⁴N absorption reference for 1530 nm to 1565 nm wavelength calibration–SRM 2519a,” NIST special publication, 260, p.137
DOI: [10.1109/LSENS.2017.2782670](https://doi.org/10.1109/LSENS.2017.2782670)

[2] Ibrahim, Selwan K., John A. O’Dowd, Vivian Bessler, Devrez M. Karabacak, Johannes M. Singer, “Optimization of Fiber Bragg Grating Parameters for Sensing Applications,” SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging 2017, Invited Paper 10208–25, 2017.

[3] Yang, F., Gong, Y., Fan, Y., Zhang, Q., Wang, X., Wu, D., & Wei, H. (2019). *Application Research of Fiber Bragg Grating Sensing System in Condition Monitoring of Voltage Transformer*. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)

[4] Annunziato, A., Erario, A., Anelli, F., Abbate, G., Godfrey, M., Jantzen, S. L., Prudeniano, F. (2020). *Structural Health Monitoring of Composite Laminate for Aerospace Applications via Embedded Panda Fiber Bragg Grating*. 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON): <https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203011>

[5] Senta L. Jantzen, Devin H. Smith, Rex H. S. Bannerman, Paolo L. Mennea, Lewis J. Boyd, James C. Gates, Peter G. R. Smith and Christopher Holmes Fabrication of more than 40 Superimposed and Superstructured Fiber Bragg Gratings [10.1109/IPC47351.2020.9252283](https://doi.org/10.1109/IPC47351.2020.9252283)

[6] Horak, P., Weisen, M. J., Gates, J. C., Gawith, C. B. E., & Smith, P. G. R. (2019). *Tilted Bragg Gratings as an Efficient Platform for Integrated Multimode Interference Devices*. 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). <https://doi.org/10.1109/ICTON.2019.8839999>

[7] Field, J. W., Berry, S. A., Bannerman, R. H. S., Smith, D. H., Gates, J. C., Gawith, C. B. E., & Smith, P. G. R. (2019). *Miniaturised, Planar, Integrated Bragg Grating Spectrometer*. 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871943>

[8] A.P. Pogoda and A.S. Boreysho, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng*, pp. 11042, 2019

[9] Kim, C. H., Yoon, H., Lee, S. B., Lee, C.-H., & Chung, Y. C. (2000). *All-optical gain-controlled bidirectional add-drop amplifier using fiber Bragg gratings*. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(7), 894–896. <https://doi.org/10.1109/68.853541>

[10] Jamaludin, M. Z., Abdullah, M. K., Abdullah, F., Rahman, F. A., & Mahdi, M. A. (2008). *Double-Pass Chirped Bragg Grating Erbium-Doped Fiber Amplifier: Improved Transmission Distance*. 2008 6th National Conference on Telecommunication Technologies and 2008 2nd Malaysia Conference on Photonics. <https://doi.org/10.1109/NCTT.2008.4814234>

[11] [электрондық ресурс] – Қол жеткізу режимі: <https://old.bigenc.ru/physics/text/1885652>

- [12] Raman Kashyap "Fiber Bragg Gratings"
- [13] Scholl, S.L., Jantzen, A., Bannerman, R.H.S., Gow, P.C., Smith, D.H., Gates, J. C., Holmes, C. "Thermal approach to classifying sequentially written fiber Bragg gratings. *Optics Letters*", 44(3), 2019.
- [14] Zaitsev, I. O., Shpylka, A., & Shpylka, N. (2020). *Output Signal Processing Method For Fiber Bragg Grating Sensing System. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235412>
- [15] M. T. Posner *et al.*: Integrated polarizer based on 45° tilted gratings, *Opt. Express*, vol. 27. pp. 11174- 11181, Apr. 2019.
- [16] C. Sima, J.C. Gates, H.L. Rogers, P.L. Mennea, C. Holmes, M.N. Zervas and P.G.R. Smith, "Ultra-wide detuning planar Bragg grating fabrication technique based on direct UV grating writing with electro-optic phase modulation," *Opt. Express* 21 (13) 15747-15754 (2013)
- [17] M. Z. Jamaludin, M. K. Abdullah, F. Abdullah, A. F. Abbas, M. A. Mahdi, and F. A. Rahman, "Hybrid high-gain double-pass erbium-doped fiber amplifier with dispersion compensation feedback loop," *Optics and Laser Tech. Let.*, vol. 40, no. 2, pp. 270-272, Mar. 2008.
- [18] C. Holmes, M. Godfrey, D. J. Bull and J. Dulieu-Barton, "Real-time through-thickness and in-plane strain measurement in carbon fibre reinforced polymer composites using planar optical Bragg gratings", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 133, 2020.
- [19] G. Wild and S. Hinckley, "Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art," *IEEE Sensors J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1184–1193, Jul. 2008.
- [20] Ibrahim, Selwan K., John A. O'Dowd, Vivian Bessler, Devrez M. Karabacak, Johannes M. Singer, "Optimization of Fiber Bragg Grating Parameters for Sensing Applications," *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging 2017*, Invited Paper 10208–25, 2017.
- [21] Wolfgang, R., Habel, Katerina Krebber, Werner Daum, "Results in standardization of FOS to support the use of SHM systems," *Proc. of SPIE Vol. 9916*, 991625, EWOF2016.
- [22] Ibrahim, Selwan K., Martin Farnan, Devrez M. Karabacak, Johannes M. Singer, "Enabling Technologies for Fiber Optic Sensing," *SPIE Photonics Europe 2016*, Invited Paper 9899–35, 2016

СЫН - ПІКІР
дипломдық жұмыс

Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

6B06201- Телекоммуникация

Тақырыбы: **Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау**

Орындалды:

а) графикалық бөлімі 3 бет;

б) түсіндірме жазбасы 50 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Құдайберген Бекжанның дипломдық жұмысы талшықты оптикалық кабельдегі Брэгг торларын пайдаланып күшейткіш жасай отырып зерттеуге арналған. Дипломдық жұмыс төмендегі бөлімдерден тұрады:

Зерттеу жұмыс істеу принциптерін және талшықты-оптикалық лазерлердің толқын ұзындығын тұрақтандыру әдістерін зерттеуден басталған. Бұл процестерге бос кеңістіктің әсері де қарастырылған. Одан әрі талшықты-оптикалық сенсорларды, лазерлерді және лазерлік диодтарды модуляциялау әдістері қарастырылған. Дипломдық жұмысқа байланысты әдеби шолу жасалынды.

Жұмыстың екінші бөлімінде Брэгг торы негізіндегі оптикалық сенсорлар мен дачиктер қолдану егжей-тегжейлі қарастырылған және мұндай жүйелерде толқын ұзындығы модуляциясына қалай қол жеткізуге болатыны зерттелген.

Жұмыстың үшінші бөлімінде берілген құрылым периодының ұзындығы үшін шағылу мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты анықтау үшін теориялық зерттеу мен симмуляция ұсынылған болды. MatLab бағдарламалық жасақтамасы арқылы бос кеңістіктегі Брэгг торының симмуляциясы орындалады және дәлелденді.

Төртінші бөлімде Брэгг торының спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы, фотоиндукциялауны фазалық маскасы және шығындары қарастырылған

Жұмыстың қорытынды бөлімінде оптикалық сенсорларда Брэгг торларын қолдану қарастырылады және осы құрылғылардың әртүрлі салалардағы ықтимал қолданулары мен перспективалары туралы пікірталас жүргізілген.

Бұл дипломдық жұмыс жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғары дәрежеде жазылған.

Жұмыс бағасы

Жалпы, дипломдық жұмысқа “95/A/ өте жақсы” деген бағаға, ал студент Құдайберген Бекжан 6B06201-«Телекоммуникация» мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавр» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Алматы энергетика және байланыс университеті

т.ғ.д., профессор

Якубова М.З

«2» сентябрь 2023 ж.



ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

дипломдық жұмыс

Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

6B06201- Телекоммуникация

Тақырыбы: Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау

Дипломдық жұмыс талшықты оптикалық кабельдегі Брэгг торларын пайдаланып күшейткіш жасай отырып зерттеуге арналады.

Талшықты-оптикалық лазерлердің толқын ұзындығын тұрақтандыру әдістерін зерттеуден басталды. Бұл процестерге бос кеңістіктің әсері де қарастырылған. Одан әрі талшықты-оптикалық сенсорларды, лазерлерді және лазерлік диодтарды модуляциялау әдістері қарастырылды.


Брэгг торы негізіндегі оптикалық сенсорлар мен дачиктер қолдану егжей-тегжейлі қарастырылды және мұндай жүйелерде толқын ұзындығы модуляциясына қалай қол жеткізуге болатыны зерттелген.

Сенсорды жобалау мен өндіру технологияларына талдау жүргізілді. Соның ішінде сенсордың материалын таңдау, құрастыру және тестілеу мен тексеру нәтижелерін алу қарастырылған.

Жүргізілген тәжірибелік жұмыстардың барысында берілген құрылым периодының ұзындығы үшін шағылу мен толқын ұзындығы арасындағы байланысты анықталды. MatLab бағдарламалық жасақтамасы арқылы теориялық зерттеу мен симмуляция ұсынылған болды..

Студент дипломдық жұмыс жасауда өздігінен жұмыс істей алу қабілетін көрсете алды.

Студент Құдайберген Бекжан өздігінен жұмыс жасай алатынын көрсетті. Жалпы дипломдық жұмысты “97А/ өте жақсы”, деп бағалап, ал студент Құдайберген Бекжан 6B06201-«Телекоммуникация» мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» дәрежесіне сай.


Ғылыми жетекші
ЭТЖТ каф. PhD докторы,
қауымдастырылған профессор
Н.К.Смайлов
« » 2023 ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

Тақырыбы: Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.6

Дәйексөз (35): 1.6

Әріптерді ауыстыру: 32

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 21

Ақ белгілер: 7

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

1.06.2023

Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 21

Знаки из других алфавитов: 32

Интервалы: 0

Белые Знаки: 7

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

1.06.2023.
Дата

Маркүла С. Әу
проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Құдайберген Бекжан Нұрғазыұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Брэгг торы негізінде жасалатын сандық талшықты-оптикалық қайталағышты анықтау

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 21

Знаки из других алфавитов: 32

Интервалы: 0

Белые Знаки: 7

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

1.06.2023
Дата

Заведующий кафедрой

