

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

ӘОЖ 621.39:004 (043)

Қолжазба құқығында

Мырзахан Әмина

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертацияның атауы

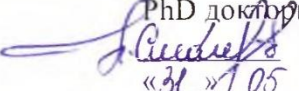
Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын
зерттеу және модельдеу

Дайындау бағыты

7М06201 – «Телекоммуникация»

Ғылыми жетекші

PhD докторы, қауым-н профессор

 Н.Қ. Смайлов

«31» 05 2023 ж.

Рецензент

PhD докторы,

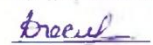
ғылым жөніндегі проректор

 Д.С. Жамангарин

«31» 05 2023 ж.

Норма бақылаушы

т.ғ.м. аға оқытушы

 Ж. Досбаев

«31» 05 2023 ж.



Алматы 2023

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

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

7M06201-Телекоммуникация

БЕКІТЕМІН

ЭТЖҒТ кафедра Меңгерушісі

т.ғ.к., қауым. профессор

Е.Таштай
Е.Таштай

«06» 06 2021 ж

Магистерлік диссертацияны орындауға

ТАПСЫРМА

Магистрант *Мырзахан Әмина*

Тақырыбы: «Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау
технологиясын зерттеу және модельдеу»

Университет ректорының «29» қазан 2021ж. №1753-м бұйрығымен
бекітілген.

Аяқталған жобаны тапсыру мерзімі: «8» маусым 2023ж.

Диссертациялық жұмыстың бастапқы берілістері: 1. ГОСТ Р 59165-2020
Оптика және фотоника. Талшықты-оптикалық лазерлер. Талшықты Брагг
торына негізделген температура сенсорлары. Жалпы техникалық талаптар
және сынау әдістері. 2. ГОСТ Р 59166-2020 Оптика және фотоника.
Талшықты-оптикалық негізіндегі лазерлер. Сынақ әдістері 3. ГОСТ Р 59088-
2020 Оптика және фотоника. Талшықты-оптикалық лазерлер. Жіктелуі

Диссертациялық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Талшықты – оптикалық радиожіілік сигналдарын 1547,88-ден 1559,88 нм-
ге дейінгі арақашақтықта зерттеу.

ә) Оптикалық қосқыш және бір жиілікті single frequency (SF) талшықты
лазерлер

б) Талшықты – оптикалық лазерлерді ерекшеліктері және қолданыстағы
маңыздылығы бағдарламада тексеру

Сызбалық материалдар тізімі: (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс)

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

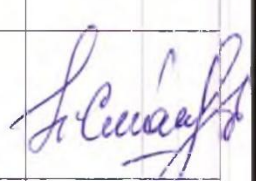
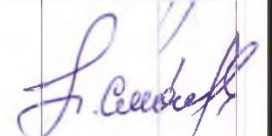
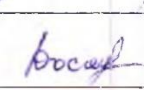
IEC 61757-2-1:2021; Fibre Optic Sensors—Part 2-1: Temperature Measurement—
Temperature Sensors Based on Fibre Gratings. Standard, International
Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2021.

Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Талшықты – оптикалық радиожілік сигналдарын 1547,88-ден 1559,88 нм-ге дейінгі арақашақтықта зерттеу	07.02.2023	орындалды
Оптикалық косқыш және бір жиілікті single frequency (SF) талшықты лазерлер	24.03.2023	орындалды
Талшықты – оптикалық лазерлерді ерекшеліктері және қолданыстағы маңыздылығы бағдарламада тексеру	20.04.2023	орындалды
Алынған компьютерлік модель көмегімен нәтижелерді талдау	26.04.2023	орындалды

Аяқталған магистрлік диссертациялық үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушысының қойған

қолдары

Бөлімдердің атаулары	Кеңесшілер (тегі, аты, әкесінің аты, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диссертация жұмысының тақырыбын талдау	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	15.02.2023 ж.	
Теориялық ақпарат	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	25.04.2023 ж.	
Норма бақылау	Досбаев Ж., ЭТЖҒТ каф. аға оқытушысы, т.ғ.м	01.06.2023 ж.	

Ғылыми жетекші



Смайлов Н.К.

Магистрант тапсырманы орындауға алды



Мырзахан Ә.

Күні

« 31 » 05 2023 ж.

АНДАТПА

Автоматтандырылған бақылау және басқару жүйелерінің қарқынды дамуына байланысты өнеркәсіптің барлық салаларында физикалық шамалардың датчиктері — температура, қысым, үдеу, қозғалыс, ток қажеттілігі артады. Аталған талаптарды талшықты-оптикалық датчиктер барынша қанағаттандырады. Жарық және оптикалық талшық қасиеттерінің арқасында талшықты-оптикалық термометрлер жоғары уақыт және кеңістіктік рұқсат етілген және өте жоғары дәлдікпен электромагниттік бөгеуілдер кезінде температураны өлшеуге қабілетті. Қазіргі таңда температураны өлшеу саласында бірқатар жабдықтар белгілі және мұндай жүйелерді жетілдіру өлшеу техникасындағы перспективалық бағыт болып табылады. Талшықты-оптикалық датчиктерге мынандай талаптар қойылады: өлшеудің жоғары дәлдігі мен сенімділігі; - сигналдар қашықтыққа тәуелді емес; жоғары ұзақ мерзімді тұрақтылық; жақсы коррозияға төзімділік; сенсорларды өте жоғары температурада қолдануға болады; орнатудың қарапайымдылығы. Қойылған талаптардың ішінде тиімдісі – жоғары температурада берілген нормадан астам өлшеу жүргізу.

АННОТАЦИЯ

В связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления во всех отраслях промышленности возрастает потребность в датчиках физических величин — температуры, давления, ускорения, движения, тока. Указанные требования максимально удовлетворяют волоконно-оптические датчики. Благодаря свойствам светового и оптического волокна волоконно-оптические измерители способны измерять температуру при электромагнитных помехах с высокой временной и пространственной допустимостью и очень высокой точностью. В настоящее время известен ряд оборудования в области измерения температуры, и совершенствование таких систем является перспективным направлением в измерительной технике. К волоконно-оптическим датчикам предъявляются следующие требования: высокая точность и надежность измерений; - не зависит от расстояния сигналов; высокая долговременная стабильность; хорошая коррозионная стойкость; датчики могут использоваться при очень высоких температурах; простота установки. Из предъявляемых требований наиболее эффективным является проведение измерений при высокой температуре выше заданной нормы.

ANNOTATION

Due to the rapid development of automated monitoring and control systems in all industries, there is an increasing need for sensors of physical quantities — temperature, pressure, acceleration, motion, current. These requirements are maximally satisfied by fiber-optic sensors. Due to the properties of light and optical fiber, fiber-optic meters are able to measure temperature under electromagnetic interference with high temporal and spatial tolerance and very high accuracy. Currently, a number of equipment in the field of temperature measurement is known, and the improvement of such systems is a promising direction in measuring technology. The following requirements are imposed on fiber-optic sensors: high accuracy and reliability of measurements; - does not depend on the distance of signals; high long-term stability; good corrosion resistance; sensors can be used at very high temperatures; easy installation. Of the requirements, the most effective is to carry out measurements at a high temperature above a given norm.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	6
1 Бір жиілікті жартылай өткізгіш лазерлердің қазіргі жағдайы және жасау жолдары	7
1.1 Жартылай өткізгіш лазерлерге қойылатын жалпы ережелер мен талаптар	9
1.2 Жартылай өткізгіш лазердің бір жиілікті генерация режимі	10
2 Талшықты-брагг торы бар бір жиілікті жартылай өткізгіш лазерлерді жасау	15
2.1 Жартылай өткізгіш лазердің толқын өткізгіш қабатының құрылымының ерекшеліктері	18
3 Өлшеу жүйесінің құрылымы. Талшықты – оптикалық сенсордың жалпы жұмыс принципі	20
3.1 MATLAB – әмбебап талшықты-оптикалық сенсорға арналған модель құру	25
3.2 Optisystem жүйесінде ТБТ моделін құру	27
4 Талшықты – оптикалық датчиктердің ерекшеліктері және қолданыстағы маңыздылығы	36
4.1 Энергияны сақтау жүйелері масштабында қолдануды анықтау	36
4.2 Талшықты-оптикалық температура датчиктері және олардың биомедициналық қолданылуы	37
Қорытынды	38
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	39

КІРІСПЕ

Ондаған жылдар бойғы зерттеулер көрсеткендей, талшықты оптикаға негізделген температура сенсорлары қатал ортада және ұзақ қашықтықта өміршең құрал болып табылады. Электрлік немесе электромеханикалық сенсорлармен салыстырғанда талшықты сенсорлар электрлік пассивті жұмыс, электромагниттік кедергіге төзімділік, жоғары сезімталдық және мультиплекстеу мүмкіндіктері сияқты маңызды артықшылықтарға ие. Олар сонымен қатар зондтау әдістерінің кең спектрін ұсынады. Талшықты талшықтың соңында немесе оның жанында пайда болатын сигналдарға, мысалы, қара дененің немесе фосфордың сәулеленуіне жарық ретінде пайдалануға болады. Ол сондай-ақ сенсор және бағыттаушы сигнал ретінде пайдаланылуы мүмкін, мысалы, Бриллюэннің шашырауына негізделген термометрия немесе жазылған талшықты Брагг торлары (ТБТ). ТБТ жылу сенсорлары ретінде оптикалық жолдың ұзындығының өзгеруін жылу кеңеюіне және температура әсерінен болатын сыну көрсеткішінің өзгеруіне байланысты өлшейді: ТБТ жарық көзімен жарықтандырып, шағылысу спектрін анықтай отырып, оптикалық жолдың ұзындығының қалай өзгеретінін дәл бақылауға болады. Талшықты-оптикалық сенсорлардың енгізілуін көптеген қосымшаларда табуға болады, мысалы, электр желілерінің күйін бақылау, газ турбиналары немесе композиттік қысым ыдыстарын бақылау. Кремний талшықтары $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін сенімді өлшеу деректерін қамтамасыз ететіндігі дәлелденді, бірақ жоғары температурада оларды қолдану қиын болды.

Сапфир талшықтары перспективалы балама болып табылады, өйткені олар өте жоғары температурада оптикалық және механикалық тұрақты болып қалады. Мүмкін, қиын болса да, ТБТ-ны сапфир талшықтарына енгізу. Хабисройтер және т.б. индукциялық пеште $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ дейінгі температурада ТБТ (S-ТБТ) сапфир датчигін пайдалану туралы бұрын хабарланған. Датчик 20 Гц мониторинг жиілігінде $\pm 2\text{ K}$ температуралық рұқсатты қамтамасыз етті, бірақ көріп отырғанымыздай, өлшеулердің белгісіздігінде сандық бағалау әлі де жоқ. ТБТ тіпті $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ дейінгі температураға төтеп бере алатындығы анықталды. Соңғы есептер сонымен қатар бір режимді сапфир талшықтарын осы мақсатта сәтті қолдануға болатындығын көрсетеді, дегенмен олардың кішкентай диаметрі әдетте механикалық тірек ретінде қабықтың белгілі бір формасын қажет етеді, бұл жұмыс температурасының диапазонын шектейді.

Сондықтан, ең жоғары температурада, әдетте, жеткілікті механикалық беріктікті қамтамасыз ету үшін қалың сапфир талшығын қолдану қажет. Өкінішке орай, қалың талшықпен жұмыс істеу оптикалық тұрғыдан қиын. Әдеттегі жұмыс толқынының ұзындығы шамамен 1550 нм, диаметрі 100 мкм сапфир талшығы көптеген беріліс режимдерін қолдайды.

1 Бір жиілікті жартылай өткізгіш лазерлердің қазіргі жағдайы және жасау жолдары

Лазердің негізгі ерекшеліктерінің бірі оның жоғары когеренттілігі, соның ішінде кеңістіктік когеренттілік пен уақытша когеренттілік. Біріншісі дифракцияның шектелуіне жақын жоғары сәуле сапасын білдіреді, яғни аудан бірлігіне және тұтас бұрыш бірлігіне оптикалық қуат ретінде өлшенетін жоғары жарықтық. Соңғысы жоғары монохроматтылықты, яғни өте тар сызық енін білдіреді. Жарықтың монохроматтылығы салыстырмалы. Призма немесе тор арқылы шешілетін жарық күн сәулесімен және қыздыру шамдарымен салыстырғанда монохроматикалық болып табылады. Атомдардың немесе молекулалардың энергетикалық деңгейлері арасындағы ауысулардан туындайтын сәулелердің сызықтары қарапайым монохроматорға қарағанда әлдеқайда тар болады. Лазерлік тербеліс сызықты одан әрі тарылтады. Лазердің жиілікті тұрақтандыруы спектрді керемет тазартады. Қазір жиілік желісі ені 1 Гц-тен аз лазерлерге қол жеткізілді.

Лазердің монохроматтылығы оның сызық ені $\delta\lambda$ немесе жиілік ені $\delta\nu$ эквивалентімен өлшенеді. Сондай-ақ ол $\delta\nu$ реципрокына пропорционал τ_c когеренттілік уақытымен сипатталады. Когеренттілік ұзындығы L_c - жарықтың τ_c ұзақтығы бойынша таралу қашықтығы, былай өрнектеледі.

$$\tau_c = \frac{1}{2\pi\delta\nu} = \frac{1}{c} \frac{\lambda^2}{\delta\lambda} = \frac{L_c}{c},$$

мұндағы c – вакуумдегі жарық жылдамдығы. Когеренттіктің тікелей әсері оптикалық интерферометрдің жұмысында көрсетілген. Қолданылатын ең үлкен оптикалық жол айырмасы (OPD) тек көздің когерентті ұзындығы болып табылады; L_c шегінен тыс интерференциялық жиектер барған сайын анық емес болады; осылайша өлшеу дәлдігі мен ажыратымдылығы төмендейді. Интерферометрдің дәлдігі кедергі жиектерінің анықтығымен анықталады; оның көрнекілігі келесідей анықталады:

$$V = \exp(-\tau/\tau_c) = \exp(-L_{OPD}/L_c),$$

мұндағы L_{OPD} – интерферометрдің OPD мәні, ал $s = L_{OPD}/c$ – OPD сәйкес кідіріс. Бірлікке қарай жоғары көріну үшін интерферометр көзінің OPD ұзындығынан әлдеқайда үлкен когеренттілік ұзындығы қажет, бұл үлкен жұмыс қашықтығына сәйкес келеді.

Лазердің сызық ені оның режим құрылымына байланысты. Лазерлік тербеліс екі қуысты айналар арасында болады. Оптикалық жол айналарға перпендикуляр болғанда және айналу таралу арасындағы фазалық ығысу 2π -ге бүтін еселік тең болғанда, тұрақты толқынның оптикалық өрісі қалыптасады және бойлық режимдер спектрге әкеледі. Режим амплитудалары әдетте тең емес, күшейту спектрімен және режимді таңдау механизмімен анықталады. Белгілі бір

режим басқаларына қарағанда амплитудасы анағұрлым жоғары болса, ол негізгі режим деп аталады; оның амплитудасының екінші жоғарғы жағы режиміне қатынасы бүйірлік режимді басу коэффициенті (SMSR) деп аталады. Егер SMSR жоғары деңгейге жетсе, қолданба талап етеді, мысалы. 10-нан үлкен болса, лазер бір бойлық режимде жұмыс істейді деп саналады. Оптикалық толқын қуыста айнаға әртүрлі бұрыштары бар бағытта таралуы мүмкін, көлденең режимдер деп аталатын қуыстың құрылымымен анықталатын әртүрлі өріс таралулары қалыптасады. Олардың ішінде таралу бағыты қуыс ұзындығына параллель немесе ең кіші бұрышты режим негізгі режим деп аталады. Жоғары ретті көлденең режимдердің лазерлік толқын ұзындығы негізгі режимнен ауытқиды. Бойлық режимдердің сызық ені ілеспе көлденең режимдер арқылы кеңейтіледі. Сондықтан тар сызықты сигнал жиілігі лазері бір бойлық режимде және негізгі көлденең режимде жұмыс істеуі керек.

Лазер сызығының ені оның фазалық шуының көрінісі болып табылады. Өздігінен сәулелену лазер сәулесінде сөзсіз болады. Сорғы лазерге ұлғайған сайын, стимуляцияланған сәулеленуге спонтанды сәулеленудің қатынасы сызық ені тарылған сайын төмендейді. Лазер сызығының ені формуласын оның өнертапқыштары А.Л.Шовлоу және Ч.Х. Таунс, өздерінің түпнұсқа қағазында [20]:

$$\delta v = 2\pi h\nu(\delta v_c)^2 / P,$$

мұндағы δv_c - пассивті қуыс резонансының жарты ені, бұл қуыста айналу таралу үшін фотонның өмір сүру ұзақтығының кері мәні, P - шығыс қуаты. Қуыстың ұзындығы неғұрлым үлкен болса және қуыстың жоғалуы, соның ішінде айнадан тасымалдануы аз болса, фотонның қызмет ету мерзімі соғұрлым ұзағырақ болады. Қуат неғұрлым жоғары болса, спонтанды мазмұнның үлесі соғұрлым аз болады.

Жартылай өткізгіш лазерлердің өсу тарихында 1960 жылдар оның сәбиінің жасы болды; 1970 жылдары лазердің табалдырығы айтарлықтай төмендеді, гетеро-қиылыс пайда болды және бөлме температурасында cw жұмысы жүзеге асырылды. Лазерлік қуысты жобалау және негізгі көлденең режим үшін дайындау шамамен 1980 жылдары қол жеткізілді. Бойлық режимді басқару схемаларының көптеген сынақтарынан кейін, динамикалық жалғыз бойлық режимді орындауы бар DFB лазері оптикалық талшықты байланыстар үшін жарық көзі ретінде бірінші таңдау болды, ал жартылай өткізгішті лазер аралықта кең ауқымды индустрияландыру дәуіріне кірді. ғасыр. Дегенмен, көптеген жаңа қосымшалар, әсіресе алдыңғы қатарлы ғылым мен техниканың шекарасында, барған сайын жоғары талаптар қояды. Олардың кейбіреулері төмендегідей тізілген.

Когерентті оптикалық байланыстар. Оптикалық байланыс пен компьютер ақпараттық технологияны (АТ) бұрын-соңды болмаған деңгейге көтереді. Дегенмен, адамдардың ақпаратқа деген сұранысы үздіксіз артып келеді. Когерентті оптикалық байланыс ақпарат тасымалдаушылары ретінде оның амплитудасымен бірге оптикалық толқынның жиілігін, фазасын және поляризация күйін пайдаланады; байланыс мүмкіндігі мен жылдамдығы айтарлықтай артады.

Одан кейін лазерлік көздің анағұрлым жоғары когеренттілігі, төмен шуылдары және жоғары тұрақтылығы қажет [21].

Суық атом физикасының зерттеулері. Атомдарды лазермен салқындату лазерлік технологияның ең маңызды жетістіктерінің бірі болып табылады, ол бірнеше тапсырыстар үшін жиілік стандарты мен уақыт стандартын жақсартады. Атомдарды лазерлік сәулемен салқындату және ұстау әдістерін әзірлеуге қосқан үлесі үшін Стивен Чу, К.Коэн-Таннуджи және В.Д.Филлипс 1997 жылы физика бойынша Нобель сыйлығымен марапатталды [22]. Суық атомдық сағаттың дамуы оптикалық жиілік тарағын жиілікті санау әдісі ретінде қабылдайтын оптикалық сағаттың пайда болуына түрткі болды, бұл лазерлік технологияның тағы бір маңызды жетістігі. Дж.Л.Холл және Т.В. Ханш 2005 жылы физика бойынша Нобель сыйлығын лазер негізіндегі дәлдік спектроскопиясын, соның ішінде оптикалық жиілікті тарауды дамытуға қосқан үлесі үшін жеңіп алды [23]. Екі жетістік оптика мен лазердің көптеген озық технологияларын пайдаланады; олардың арасында жоғары сапалы бір жиілікті жартылай өткізгіш лазер таптырмас рөл атқарады.

Жоғары дәлдіктегі метрология және спектроскопия. Оптикалық интерферометр ғылым тарихында маңызды рөл атқарды. Эйнштейннің салыстырмалық теориясының тәжірибелік негіздерінің бірі Мишельсон интерферометрімен «эфирдегі» жарық жылдамдығын өлшеу нәтижесі болды. Содан бері интерферометрия көптеген салаларда үздіксіз және кеңінен қолданылады; мысалы адамдар оны инерциялық толқынды өлшеу үшін пайдаланады. Жартылай өткізгішті лазерлері бар интерферометрлер қайнар көзі ретінде ғалымдар мен өнеркәсіпшілердің назарын көбірек тартады. Типтік мысал ретінде мұхиттану мен геоғылымнан бастап навигацияға, балық аулауға және сейсмикалық толқындарды анықтауға дейінгі әртүрлі салаларда қолданылатын гидрофон мен геофон [24] болып табылады.

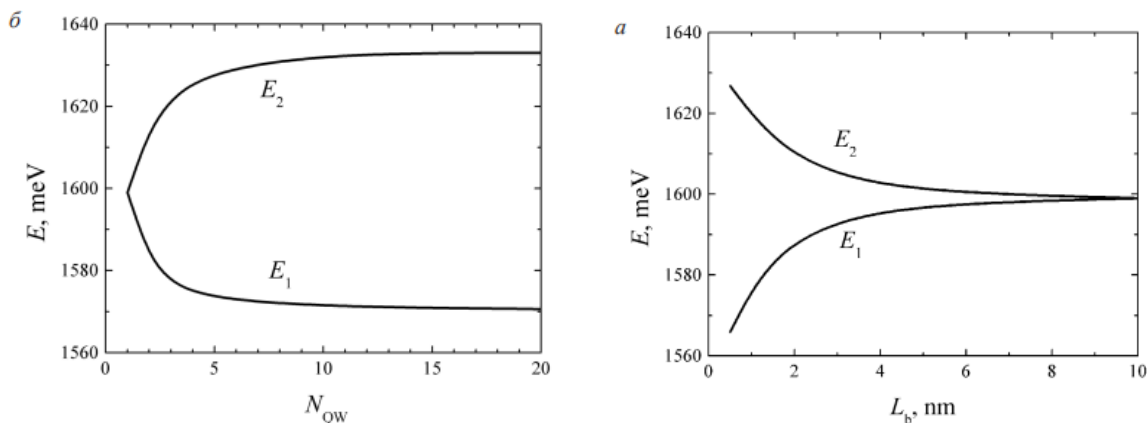
1.1 Жартылай өткізгіш лазерлерге қойылатын жалпы ережелер мен талаптар

Электронға арналған атомда энергияның белгілі бір (квантталған) деңгейлері бар, олардың кейбіреулері (атап айтқанда, аз) энергия ми) толтырылған, қалғандары бос. N оқшауланған атомдардан тұратын жүйенің энергетикалық құрылымын сипаттау үшін бір атомды қарастыру жеткілікті, оның энергия деңгейлерінің әрқайсысы қосымша N -азғындау денінің еселігі (яғни, онда бір атоммен салыстырғанда электрондар N есе көп болуы мүмкін).

Егер екі атом өзара әрекеттесуге келсе, мысалы, атомаралық қашықтықтың азаюына байланысты олардың толқындық функциялары қабаттасады. Бұл жағдайда энергия деңгейлерінің әрқайсысы екі атомға жататын екі ішкі деңгейге бөлінеді. Жалпы алғанда, атомаралық қашықтық неғұрлым аз болса, атомдар соғұрлым күшті әрекеттеседі және атом деңгейлері соғұрлым көп бөлінеді. Мұны ұқсас кванттық механикалық құбылыс-екі бірдей кванттық шұңқырлардың өзара әрекеттесуі арқылы көрсетуге болады (сурет. 1.6, а). Бұл мысалда екі кванттық

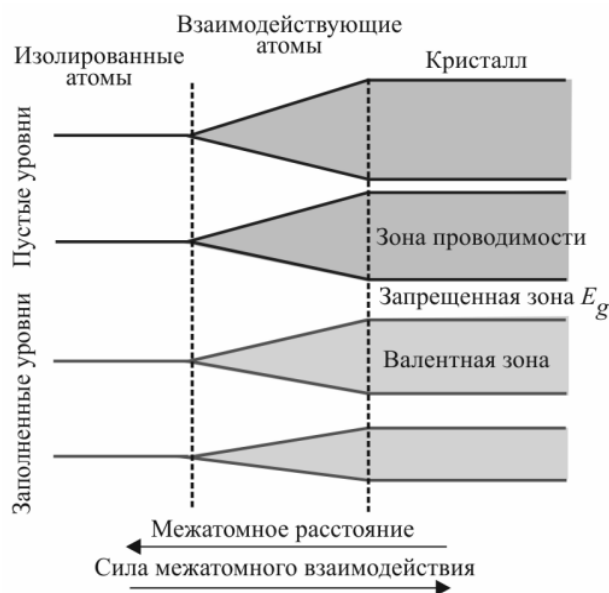
механикалық объектінің өзара әрекеттесу күші кванттық шұңқырларды бөлетін тосқауыл қабатының қалыңдығына байланысты.

Егер N кванттық механикалық объектілер өзара әрекеттесе, бастапқы энергия деңгейлері N жақын орналасқан энергетикалық ішкі деңгейлерден (күйлерден) тұратын аймаққа бөлінеді. Бұл аймақтың ені, яғни аймақтың ең жоғарғы және ең төменгі ішкі деңгейлері арасындағы қашықтық негізінен жақын көршілер арасындағы өзара әрекеттесу күшімен анықталады, сондықтан жеткілікті үлкен N өзара әрекеттесетін объектілердің санына байланысты тоқтайды (сурет. 1.1, б).



1.1-сурет – Тосқауылдың қалыңдығына ($N_{QW} = 2$) (А) және кванттық шұңқырлар санына ($L_b = 1.5$ нм үшін) байланысты $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ қоршалған қалыңдығы 5 нм GaAs кванттық шұңқырларындағы негізгі энергия деңгейінің бөлінуі

Қатты дененің энергетикалық құрылымы дәл осылай ұйымдастырылған, онда электрондар тек энергетикалық Атом деңгейлерінен пайда болған белгілі бір энергетикалық аймақтарды алады (сурет. 1.2). Атомдағы энергия деңгейінің орны неғұрлым жоғары болса, көрші электрондар өзара әрекеттеседі. Сондықтан валенттік электрондар үлкен қызығушылық тудырады, яғни. атомдағы толтырылған деңгейлердің ең жоғарғы бөлігін толтыратын электрондар, өйткені төменгі қабықшалардың электрондары өзара әлсіз әсер етеді және сәйкесінше бұл деңгейлер әрең бөлінеді, ал жоғары атомдық деңгейлерде электрондар болмайды.



1.2-сурет – Оқшауланған атомдардың энергетикалық деңгейлерінен қатты денеде электронды аймақтардың пайда болуының схемалық иллюстрациясы

1.2 Жартылай өткізгіш лазердің бір жиілікті генерация режимі.

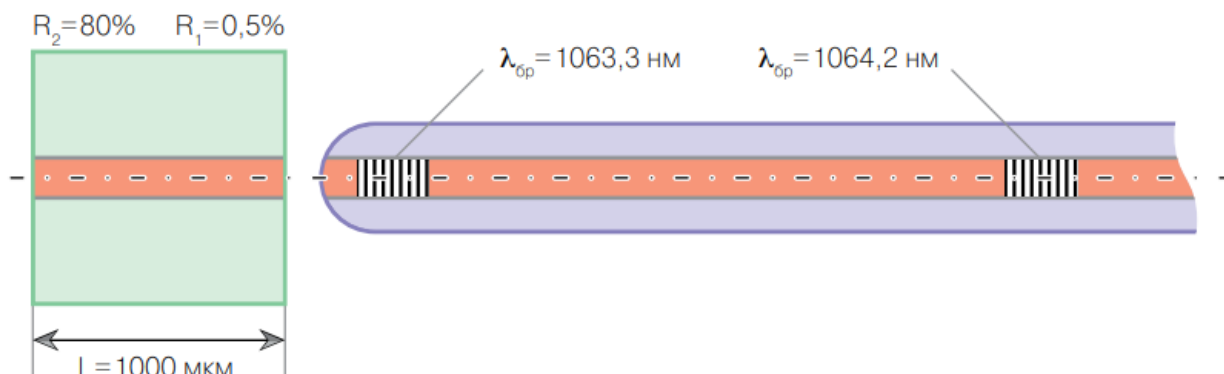
Бір жиілікті генерациялау режимін құру және сәулеленудің толқын ұзындығын қайта құру мүмкіндігі жартылай өткізгіш лазерлерді көптеген мәселелерді шешуге тартымды етеді. Олар телекоммуникацияда, арнаның спектрлік тығыздағышымен талшықты-оптикалық байланыс желілерінде, талшықты-оптикалық датчиктерде, жоғары ажыратымдылықтағы спектроскопияда, Медициналық және экологиялық диагностика аппаратурасында, жиілік стандарттарында, ғылыми аспаптарда кеңінен қолданылады.

Қайта реттелетін жартылай өткізгіш лазерлерді құрудың бастапқы кезеңінде көптеген адамдар қысқа резонаторы бар (100-200 мкм) лазерлік диодтарды (LD) қолданды. Қысқа резонаторлы лазерлердің сәулелену спектрі көбінесе бір бойлық режимге ие және олардың генерация толқыны температура мен айдау тогы өзгерген кезде оңай қайта құрылады. Бірақ сонымен бірге олардың төмен қуаты мен үлкен кедергісі, омық және жылу, жұмыс тұрақсыздығына және ресурстың төмендеуіне әкеледі.

Сондықтан таратылған кері байланыс лазерлері кеңірек таралды. Лазерлердің бұл класы неғұрлым тұрақты бір жиілікті жұмыс режиміне ие және кең температура диапазонында жеткілікті үлкен оптикалық сәулелену қуатына ие. Сәулеленудің толқын ұзындығын кең диапазонда қайта құру үшін көбінесе сыртқы резонатор лазерлердің дизайнына енгізіледі, ол дифракциялық торды пайдаланады.

1.3-суретте поляризацияны сақтай отырып, бір режимді Жарық өткізгіште екі дифракциялық торы бар бір жиілікті қайта реттелетін лазерлік диодтың дизайны көрсетілген. Оның негізгі бөлшектері белсенді элемент болып табылады (резонатордың алдыңғы беті ағартатын жабыны бар, $R_1 = 0,5\%$; артқы жағы

шағылыстыратын, $R_2 = 80\%$); дифракциялық торлар (бір режимді Жарық өткізгіштің өзегіне жазылған); лазерлік сәулеленуді енгізуді оңтайландыру үшін жарық өткізгіштің соңындағы цилиндрлік линза [1].



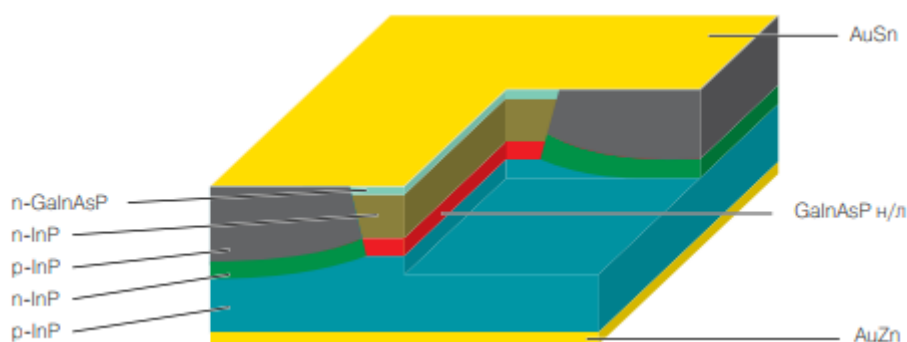
1.3-сурет – ВБР бар қайта реттелетін бір жиілікті лазер

Толқын ұзындығын қайта құру Брагг формуласына сәйкес жүреді:

$$\Lambda = m\lambda_B / (2n_T),$$

мұндағы Λ -тор кезеңі; λ_B -лазердің толқын ұзындығы; n_T -тиімді сыну көрсеткіші; m - толқындық режим тәртібі.

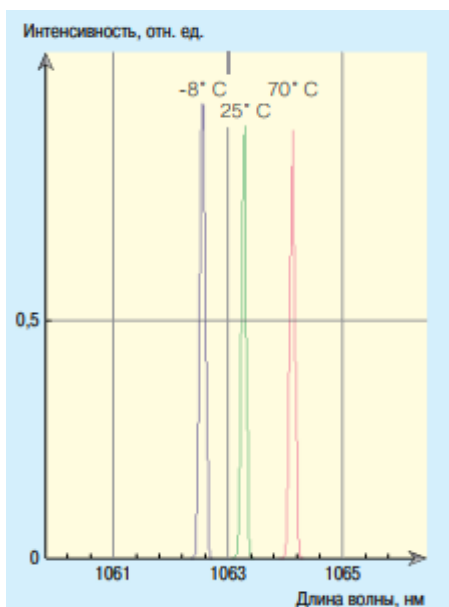
Жарық өткізгіштегі Брагг торларының өзара орналасуы қысқа қашықтықтан, яғни 10-20 мкм-ден 1,5 м-ге дейін өзгереді. Сәулелену сызығының минималды ені 8 кГц-ке жетті. Тегіс қайта құру диапазоны 1-2 нм бизнесте бекітілген. Талшықты-Брагг торының (WBR) және LD температурасының өзгеруіне байланысты толқын ұзындығының жақсы өзгеруіне қол жеткізуге болады.



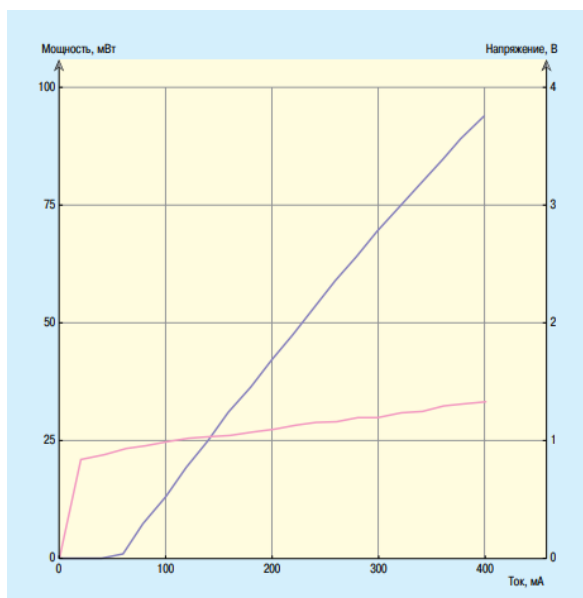
1.4-сурет – ВБР бар белсенді лазер элементінің дизайны

Жұмыста [2] гетероэпитаксиалды құрылымдардан жасалған лазерлер сипатталған: InGaAsP-InP және GaAs AlGaAs – сәулелену толқын ұзындығы 635-1650 нм, МОС гидридті эпитаксия әдісімен жасалған. Белсенді элементтің құрылымы (сурет.2) тиісті кезеңнің поляризациясын сақтай отырып, жарық өткізгіштегі дискретті Брагг торлары берілген толқын ұзындығында динамикалық тұрақты бір жиілікті жұмыс режимін қамтамасыз етті. Бір жиілікті ЛД сәулелену қуаты ($\lambda = 1550$ нм) ватт-ампер сипаттамасының сызықтығын сақтай отырып, 75

мВт-тан асады (сурет.3). ВБР бар бір жиілікті лазердің спектрлік сипаттамаларын зерттеу толқын ұзындығын қайта құруға дейінгі және кейінгі сәулелену сызығының ені 8 кГц екенін көрсетті. Бүйірлік режимдерді басу 40 дБ-ден астам болды. Әр түрлі температурада (8-70°C) 1064 нм толқын ұзындығындағы лазердің генерация спектрі мещысады (1.4-сурет) және тегіс қайта құру кезінде ол 1,5 НМ толқын ұзындығына түседі. ВБР бар лазерлік модульдің дизайны 1.5-суретте көрсетілген.

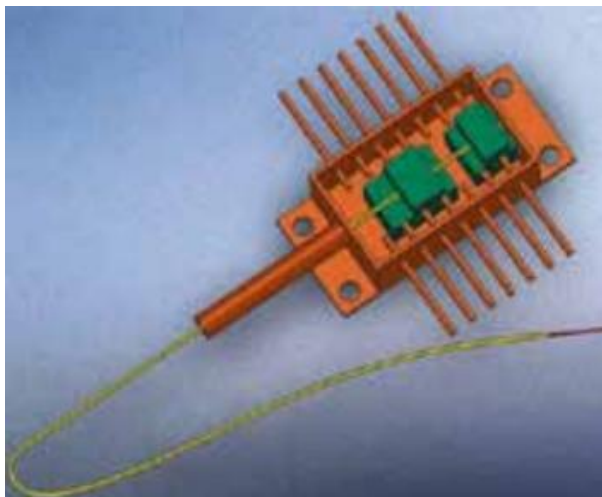


1.5-сурет – VBD лазерінің ватт-ампер сипаттамасы



1.6-сурет – Әр түрлі температурадағы лазерлік сәулелену спектрлері

Толқын ұзындығының дискретті қайта құрылуын бір режимді талшықта жасалған 2 немесе 4 ангстром периоды бар екі немесе одан да көп Брэгг торлары қамтамасыз етті. Ол үшін олардың температурасы немесе ЛД айдау тогы өзгерді [3,4]. Сонымен қатар, олар 2 немесе 4 ангстром дискреттілігі бар толқын ұзындығы шкаласы бойынша LD сәулеленуінің λ сдсыуын қамтамасыз ететін температураны өзгерту әдістерін жасады.



1.8-сурет. ВБР бар лазерлік модульдің дизайны

Осылайша, біз тұрақты динамикалық генерация режимінде 635-1650 НМ толқын ұзындығы диапазонында жұмыс істейтін бір жиілікті қайта реттелетін лазерлік модульдерді жасай алдық. Бұл LD сәулеленуінің тар сызық ені-8 кГц, температураны өзгерту кезінде біз оның толқын ұзындығын 1,5 НМ диапазонында 2 немесе 4 ангстром қадамымен қайта құрамыз.

2 Талшықты-брагг торы бар бір жиілікті жартылай өткізгіш лазерлерді жасау.

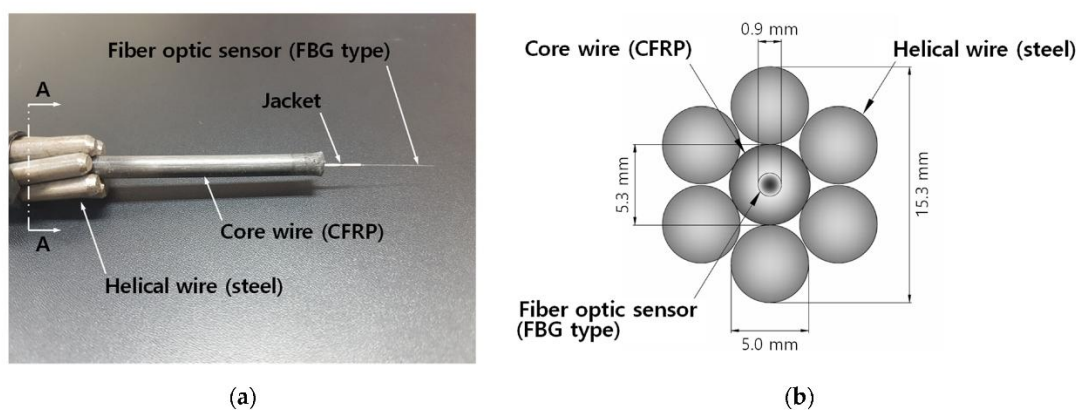
Температураны өлшеу үш әдістің бірімен жүзеге асырылуы мүмкін: электрлік емес әдіс, пирометриялық әдіс және электрлік әдіс. Электрлік емес әдіс объектінің физикалық күйін немесе физикалық немесе химиялық параметрлерін өзгертуді қолданады. Пирометриялық әдіс объектінің жылу сәулеленуін зерттейді. Үшінші әдіс температура мен объектінің кедергісінің өзгеруі (кедергі датчиктері) немесе термопараның термоэлектрлік беріктігі мен температура (генерация датчиктері) арасындағы байланысқа негізделген. Көптеген электрлік температура сенсорлары бар, мысалы, теріс температура коэффициенті (NTC) термисторлар [1], кедергі температурасы датчиктері, термопаралар [2] немесе жартылай өткізгіш температура датчиктері [3]. Соңғы уақытта оптикалық талшықты сенсорлар көптеген қосымшалар үшін қарқынды дамуда, мысалы: температураны өлшеу [4], ығысуды өлшеу [5], деформация/қысымды анықтау [6], сонымен қатар биофотоникалық және медициналық зерттеулер [7]. Диэлектрлік табиғаты арқасында көптеген артықшылықтарды бөлуге болады: байланыссыз жұмыс, шағын өлшемдер мен салмақ, жоғары тиімділік және төмен шығындар. Талшықты-оптикалық температура сенсорларының әртүрлі түрлері ұсынылды, мысалы, талшықты Брагг торлары (ТБТ) [8], конустық оптикалық талшықтар [9], ұзақ мерзімді торлар (LPG) [10] және Фабри қауырсындары (F-P) [11] немесе модальды интерферометрлер [12]. FBG негізіндегі температура сенсорларының сезімталдығы төмен Термо-оптикалық коэффициент пен әйнектің жылу кеңеюіне байланысты шектелген [13]. F-P интерферометрлеріне негізделген сенсорлардың сезімталдығы өте жоғары болуы мүмкін; мысалы, [14] ол $>2,70 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ болды, бірақ тек $51,2\text{--}70,5 \text{ }^\circ\text{C}$ диапазонында. Бұл құрылымдар температураны $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ -қа дейін $\sim 36,8 \text{ пм}/^\circ\text{C}$ сезімталдықпен өлшеуге мүмкіндік береді. жоғары температура диапазондары үшін сапфир талшығына негізделген сенсорлар жасалды [15] және олардың сезімталдығы $35,7 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ -тан аспайды.

Сенсорларды басқа түрлерімен салыстырғанда талшықты-оптикалық датчиктер жоғары дәлдік пен сенімділікке ие. Жақында Smart Strand алдын-ала кернеулі бетон конструкцияларындағы немесе кабельдер қолдайтын көпірлердегі кабельдердің күшін өлшеу үшін талшықты-оптикалық сенсорлардың артықшылықтарын арттыру үшін жасалды. Smart Strand жеті сымды өзектің өзегіне салынған талшықты Брагг торлары (ТБТ) бар. Басқа датчиктер сияқ

ты, температура ТБТ-мен өлшенетін деформацияға әсер етеді; сондықтан механикалық деформациямен байланысты емес температура әсері температураның өзгеруіне ұшыраған ұзақ мерзімді өлшеу кезінде өтелуі немесе түзетілуі керек. Алайда, ТБТ үшін температураны өтеу процедурасы әлі анықталған жоқ және тиісті зерттеулерде өтемақы үшін басқа формулалар қолданылды. Сонымен қатар, ТБТ сенсорлары белгілі бір материалға, мысалы, талшықты күшейтілген полимерге оралған кезде, жылу әрекеті кезінде ТБТ, орауыш материал және бастапқы материал арасындағы өзара әрекеттесуді ескеру қажет.

Талшықты-оптикалық сенсорлар басқа сенсорлармен салыстырғанда олардың дәлдігі мен ұзақ мерзімділігіне байланысты перспективалы шешім болып саналады [16]. Талшықты-оптикалық сенсорлардың әр түрлі түрлерінің ішінде талшықты Брагг торына (ТБТ) артықшылық беріледі, өйткені ол жақсы құрылған теориялық негізге ие және осы типтегі көптеген зерттеулер жинақталған [17]. Жоғарыда аталған кәдімгі сенсорлардың кемшіліктері мен шектеулерін жеңе отырып, жіп күшін өлшеуге арналған қосымшалардағы талшықты-оптикалық сенсордың артықшылықтарын арттыру үшін, жеті сымды жіптің өзегіне салынған ТБТ типті талшықты-оптикалық сенсорлары бар Smart Strand жасалды [18]. SmartStrand толық масштабы PSC үлгілерінде және нақты PSC конструкцияларында қысқа мерзімді алдын-ала кернеудің жоғалуына әсер ететін алдын-ала кернеудің таралуын (ТК) бағалау үшін қолданылды [19].

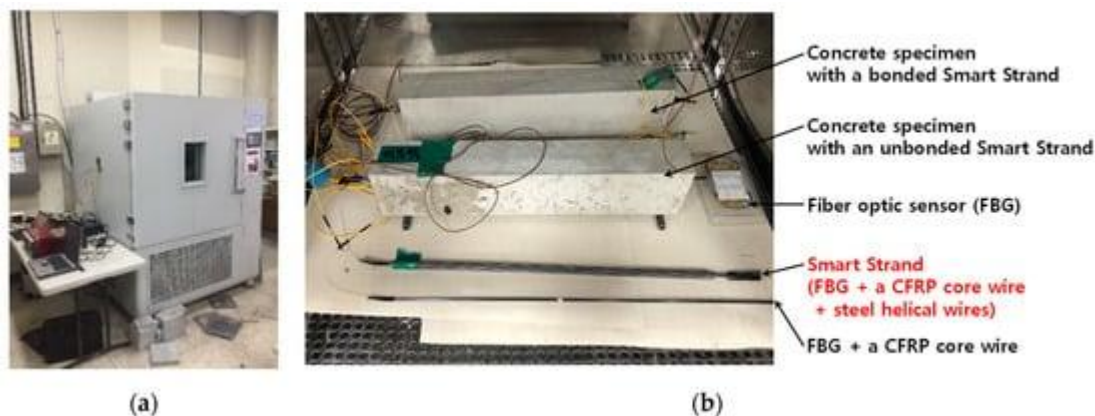
Кірістірілген ББЖ бар Smart Strand - Сур. 1 Smart Strand конфигурациясы мен негізгі өлшемдері 1860 МПа және диаметрі 15,24 мм болатын әдеттегі жеті сымды стренгтермен бірдей [20]. Алайда, кәдімгі жіптегі болат өзегі бар сым көміртекті талшықты күшейтілген полимер сымына (CFRP) ауыстырылады, осылайша қажетті мөлшерде VBR бар талшықты-оптикалық сенсорды салуға болады, ал CFRP өзегі бар сым пультрузия процесі арқылы жасалады. Көміртекті талшықпен қоршалған талшықты-оптикалық сенсор алдын-ала кернеу кезінде түтікпен және іргелес жіптермен жанасудан болатын зақымданудан қорғалуы мүмкін және жіптің шынайы осьтік созылуын өлшей алады. Сенсор функциясынан басқа, Smart Strand құрылымдық компоненттің функциясына ие, өйткені Smart Strand кернеуі мен деформациясы арасындағы байланыс қарапайым жіппен бірдей. Smart Strand дамыту туралы қосымша ақпаратты әдебиеттерден табуға болады [21].



2.1 Сурет – Smart Strand конфигурациясы және Өлшемдері: (A) конфигурация; және (b) А–А қимасы және өлшемдері.

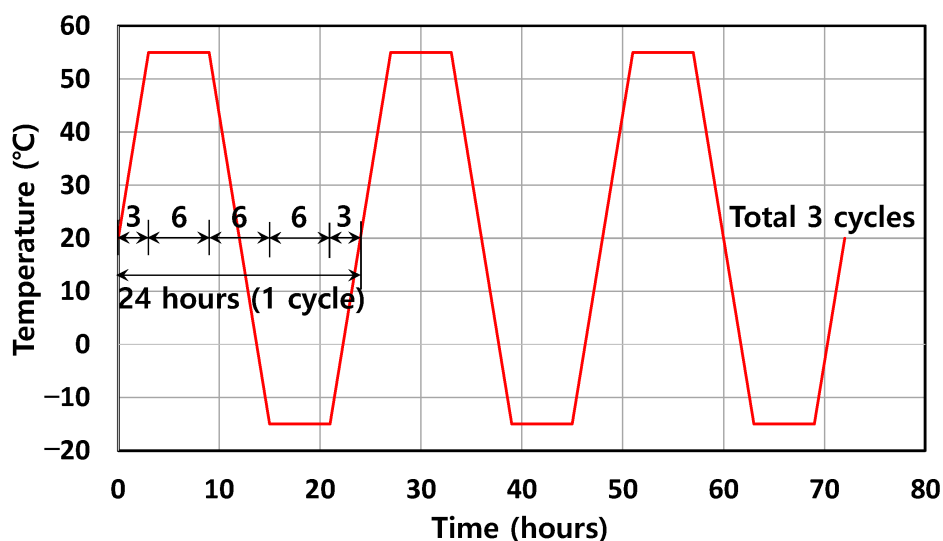
2.2 – суретте сынақ үшін пайдаланылатын $900 \times 900 \times 900$ мм кеңістігі бар температурасы бақыланатын камера көрсетілген; ішіне бірнеше даналар орналастырылған. Барлық үлгілердің ұзындығы 600 мм, ал ортасында FBG болды. SmartStrand қосылған немесе қосылмаған екі бетон үлгілері де сыналды, бірақ олар

осы зерттеуден тыс және осы құжатта талданбайды. Термиялық деформация үшін үйкеліс шектеулерін болдырмау үшін тегіс беті бар тефлон парағы үлгілердің астына қойылды. Өтемақы үшін нақты температураны өлшеу үшін үлгілердің жанына бірнеше термопаралар орналастырылды. Жарық шығару және ФБГ-да шағылысқан жарық толқындарының мәліметтерін жинау оптикалық сұрау салушының көмегімен жүргізілді.



2.2 Сурет Камераны сынау: А) температурасы бақыланатын камера; және б) әртүрлі үлгілер.

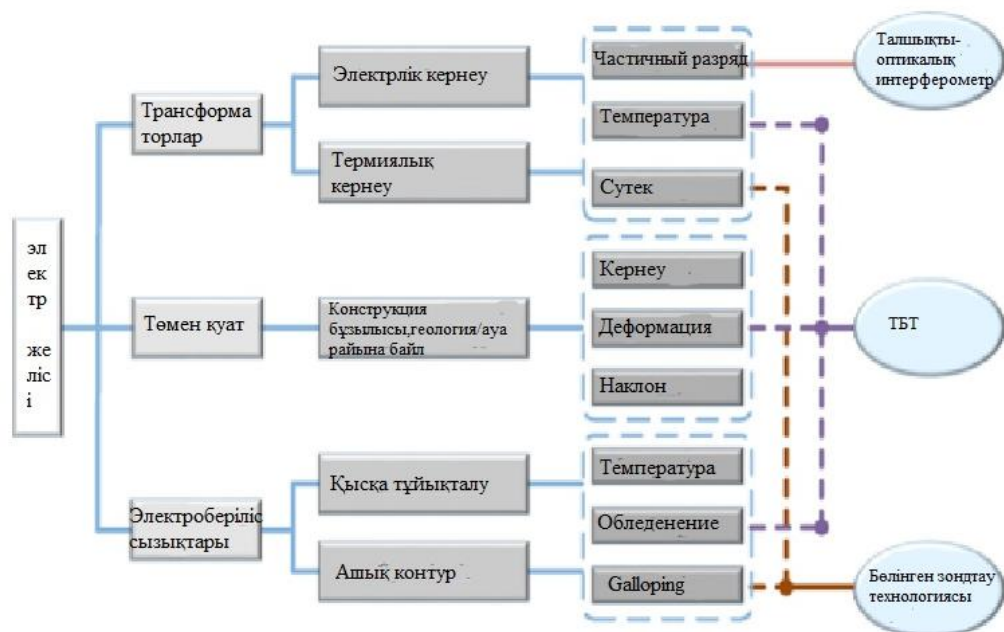
2.3 – суретте көрсетілгендей, камераның температурасы жеткілікті диапазонда $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ — тан $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа дейін өзгерді, бұл $\Delta T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ немесе $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (бөлме температурасы) $\pm 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ -толқын ұзындығының реакциясын жоғарылату арқылы (13) теңдеуді тексеру қатесін азайту үшін. Максималды және минималды температура 6 сағат бойы сақталды, ал аралық температура 6 сағат ішінде біртіндеп өзгерді, бұл үлгілердің камера температурасына жетуі үшін жеткілікті уақытты қамтамасыз етеді. Барлығы үш цикл қолданылды, олардың әрқайсысының ұзындығы 24 сағатты құрайды.



2.3 Сурет – Камера ішіндегі температура өзгерісі.

2.1 Жартылай өткізгіш лазердің толқын өткізгіш қабатының құрылымының ерекшеліктері

Бұл бөлімде талшықты – оптикалық зондтау технологиялары, оның ішінде талшықты-оптикалық тор (FBG), талшықты-оптикалық интерферометр, таратылған талшықты-оптикалық зондтау және электр желісі қарастырылады.



2.4 Сурет – Электр желісінің құрылымы және талшықты-оптикалық зондтау технологиясы негізінен электр желілерінде қолданысы

2.2 Суретте көрсетілгендей, трансформаторлар, электр беру тіректері және әуе желілері электр желісінің үш негізгі компоненті болып табылады. Трансформатордың істен шығуының екі негізгі себебі-электрлік және жылу кернеулері, оларды ішінара разряд және температура мен газдың ауытқулары, әдетте H₂ арқылы басқаруға болады. Геология / ауа-райынан туындаған электр беру тіректерінің деформациясы, қисаюы және деформациясы талшықты-оптикалық сенсорлармен өлшенуі мүмкін. Қысқа тұйықталу немесе электр беру желілерінің ашық тізбегі температураны, мұздануды және секіруді өлшеу арқылы бағалануы мүмкін. Талшықты-оптикалық интерферометрге негізделген сенсорларды ультра жоғары сезімталдықпен жасауға болады, бірақ олар ішінара разрядты анықтау үшін қолданылады. VBR қосымшалардың барлық түрлерінде кеңінен қолданылады, өйткені олардың ауыр мультиплекстеу қабілеті бар және ең жақсы коммерциялық талшықты-оптикалық құрылғылардың бірі болды. Таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар көптеген қосымшаларда да қолданылады және электр желілерінде кеңінен қолданылатын OPSC / OPGW арқасында ең перспективалы өлшеу схемаларының бірі болып табылады.

Қазіргі уақытта байланыс желілерінің көпшілігі талшықты жарық өткізгіштерін ақпарат беру ортасы ретінде пайдаланады. Талшықты жарық

өткізгіштерді пайдалану жоғары жылдамдықты деректер беру желілеріне қажеттілікті қанағаттандыруға, сондай-ақ болашаққа беріктіктің ұзақ мерзімді қорын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді; кедергілерден және сырттан рұқсатсыз кіруден барынша қорғалуға қол жеткізуге ұмтылу.

Талшықты шамдар тек байланыс жүйелерінде ғана қолданылмайды. Оларды екі санатқа бөлуге болады: арнайы және телекоммуникациялық. Телекоммуникациялық шамдар әртүрлі байланыс жүйелерінде қолданылады. Арнайы оптикалық талшықтар басқа қолдануды тапты. Қазіргі уақытта арнайы талшықтар негізінде құрылғылар мен құрылғыларды құру бағыты белсенді дамуда. Оптикалық талшықтар әртүрлі физикалық параметрлердегі датчиктерде (температура, қысым, механикалық кернеулер және т.б.), созылған нысандарды бақылау жүйелерінде, талшықты лазерлерде, навигациялық құрылғыларда, медициналық құрылғыларда қолданылады.

Бұл құрылғылар олардың әрекет ету принципіне және дизайн ерекшеліктеріне байланысты әртүрлі түрлерге бөлінеді. Көбінесе арнайы оптикалық талшықтарға негізделген құрылғыларды жасау үшін Bragg талшықты торлары қолданылады. Әдетте, олардың негізінде физикалық параметрлер датчиктері мен бақылау жүйелерінің сезімтал элементтері, талшықты лазерлік резонаторлар, арналарды тығыздайтын телекоммуникациялық жүйелердің спектрлік сүзгілері және т. б. жүзеге асырылады.

Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлардың қасиеттерін зерттеу материалдың геометриялық параметрлерін оған сыртқы әсер ету арқылы өзгертуге мүмкіндік береді (температура, механикалық кернеу, қысым және т.б.). Осы өзгерістерді талдай отырып, оптикалық талшыққа сыртқы әсердің сипатын бағалауға болады. Бұл құбылыстар арнайы талшықты жарық өткізгіштерге негізделген көптеген құрылғылар мен құрылғылардың негізі болып табылады [23].

Өлшеу құралдары сияқты, Брагг торларының негізінде жасалған талшықты-оптикалық сенсорларды әртүрлі шамаларды өлшеу үшін түрлендіргіштер жасау үшін пайдалануға болады. Датчиктердің артықшылықтары:

- жаңа ұшақтар немесе электр станциялары сияқты заманауи конструкцияларда кеңінен қолданылатын көміртекті талшықтармен нығайтылған әйнек сияқты жаңа композициялық материалдармен жақсы үйлесімділік;
- өте жоғары деформация өлшеу (астам $10,000 \mu\text{m} / \text{M}$), сондықтан жоғары кернеулі композиттік конструкциялар үшін өте қолайлы;
- кішкентай және жеңіл салмақ;
- электромагниттік кедергілерге иммунитет (жарықтандыру кезіндегі кедергілерге де);
- табиғатта пассивті (электр энергиясының қажеті жоқ), сондықтан жоғары кернеулі және ықтимал жарылыс қаупі бар атмосферада орналасуы мүмкін;
- сигналдар қашықтыққа тәуелді емес (байланыс ұзындығы 50 км-ден асады);
- бір талшықта 20 данаға дейін көптеген талшықты Брэгг торлары болуы мүмкін;
- жоғары ұзақ мерзімді тұрақтылық;

- жақсы коррозияға төзімділік;
- сенсорлардың арнайы нұсқаларын өте жоғары температурада 700° С дейін қолдануға болады;
- көптеген сенсорларды қамтамасыз ететін бір талшықтың төмен жылу өткізгіштігіне және сұйық гелий температурасына жақын қалдық температураға тәуелділігі бар тұрақты оптикалық қасиеттеріне байланысты криогендік ортада тиімді пайдалану;
- орнатудың қарапайымдылығы (уақыт, кабель төсеу, тестілеу) [24].

3 Өлшеу жүйесінің құрылымы. Талшықты – оптикалық сенсордың жалпы жұмыс принципі

Талшықты-оптикалық сенсор – бұл физикалық шаманың сенсоры, оның дизайнында талшықты-оптикалық толқын жетегі сезімтал элемент ретінде қолданылады. Талшықты-оптикалық температураны өлшеу дегеніміз – шыны талшықтар сызықтық сенсор ретінде қолданылатын температураны өлшеу үшін оптоэлектрондық құрылғыларды қолдану. Талшықты – оптикалық температура сенсорлары қауіпсіздікке қатысты салаларда қолданылады. Мысалы, олар химиялық процестердегі температураны бақылау, өндірістік қатынастарды оңтайландыру үшін қуат кабельдерінің температурасын бақылау, теміржол туннельдері мен вагондардағы өрт қауіпсіздігін қамтамасыз ету және құбырлардағы ағып кетуді анықтау үшін қолданылады. Қарастырылған сенсорларды Мұнай және газ ұңғымаларының тиімділігін арттыру үшін пайдалануға болады.

Талшықты – оптикалық сенсордың жалпы жұмыс принципі келесідей: сәулелену көзінен жарық оптикалық талшық арқылы өтеді, нәтижесінде бұл талшықтағы параметрлердің өзгеруіне әкеледі. Оптикалық талшықтан өткеннен кейін спектрлер мен қарқындылық бастапқы сәулемен салыстырылады. Өлшенген мәндерді бағалау нәтижесі талшықтың сипаттамаларына байланысты емес. Өлшеу ақпаратын жарық ағынының үзілуі, жарықтың шағылысуы, радиациялық энергияның өзгеруі сияқты құбылыстар тасымалдайды. Жарықтың үзілуін қолданатын сенсорлар өте кең таралған және қолдануға оңай [25].

Брэгг торларының негізінде жасалған талшықты-оптикалық сенсор-қарқынды интерференциялық жарықтың әсерінен ядрода пайда болатын талшық бойындағы сыну көрсеткішінің мерзімді бұзылу кезеңі. Бұл индекстің бұзылуы жарық толқынының жолақ сүзгісі ретінде жұмыс істейді, ол толқын ұзындығы бар оптикалық сигналдан нақты тар жолақты көрсетуге мүмкіндік береді. Брагг толқын ұзындығы (λ_B) деп аталатын шағылысқан тар жолақтың орталық толқын ұзындығы Брагг теңдеуімен анықталады:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (3.1)$$

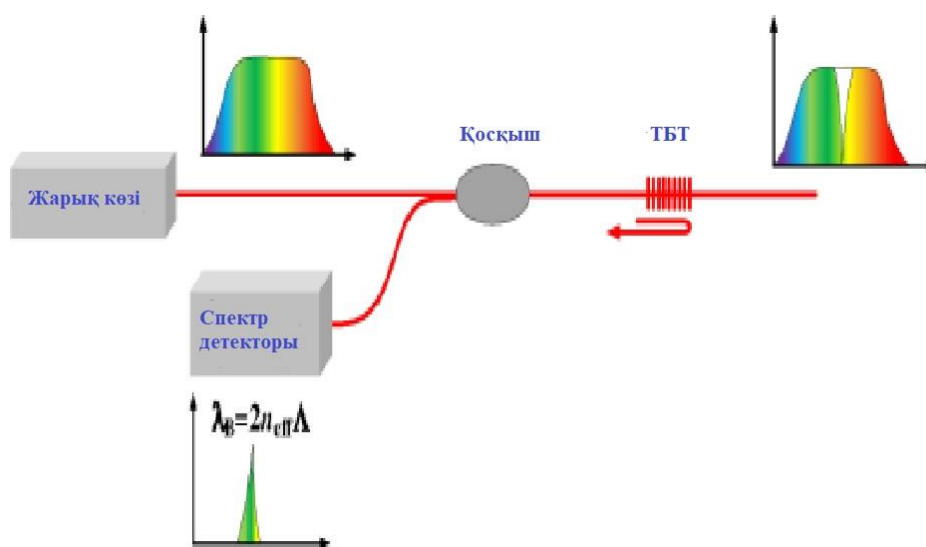
мұндағы, Λ - тор периоды, ал n_{eff} - ядроның тиімді сыну көрсеткіші.

Талшықты Брэгг торымен жарықтың сүзгіден өтуінің негізгі принципі 1-суретте көрсетілген. n_{eff} және Λ температура мен кернеуді қоса алғанда, қоршаған орта параметрлеріне сезімтал. n_{eff} температурасының өзгеруі Термо-оптикалық әсерге, ал Λ - жылу кеңеюіне байланысты. Талшықтағы кернеу сонымен қатар оптикалық әсерге байланысты n_{eff} өзгерісін өзгертеді, ал созылу кезінде Λ өзгереді. Осылайша, Брэггтің толқын ұзындығы температура мен деформацияның өзгеруімен ауысады, ал қатынасты келесідей білдіруге болады:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda [(1 - \rho_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (3.2)$$

мұндағы ε - талшықтағы деформация, ρ_e - тиімді Поккель коэффициенті (талшық өзегі үшін, $\rho_e \approx 0,22$), α - термиялық кеңею коэффициенті, ω - температурасы бар n_{eff} өзгеру жылдамдығын көрсететін пермо-оптикалық коэффициент (кремний диоксидінің ядросы үшін, $\omega = 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), және ΔT - температураның өзгеруі.

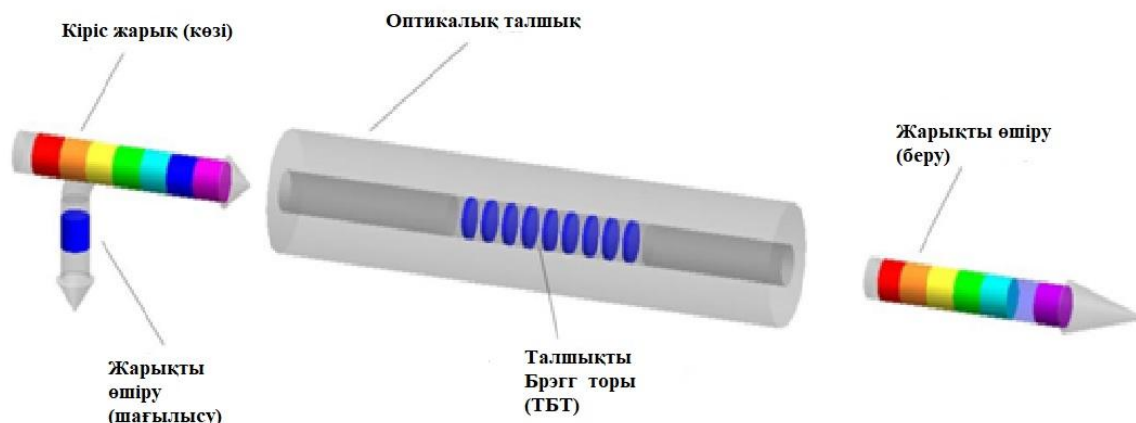
Екінші формула деформация (температура) тұрақты болған кезде Брэгг толқын ұзындығы мен температура (деформация) арасындағы сызықтық қатынасты білдіреді. Осы жағдайларда, талшықты Брэгг торы өте қолайлы және температура (деформация) бар Брэгг толқын ұзындығын калибрлегеннен кейін температураны өлшеу (деформация) кезінде қолдануға ыңғайлы [26]. сурет (2.5)



2.5 Сурет – Талшықты Брэгг торының моделі

1978 жылы Кеннет о. Хилл оптикалық байланыста да, оптикалық сенсорлық жүйелерде де ТБТ және олардың қосымшалары бойынша алғашқы жұмыс туралы хабарлады [27]. Содан бері сенсорлардың бұл түрі энергия, аэроғарыш және азаматтық салалардағы физикалық, химиялық, клиникалық, биомедициналық және электр параметрлері сияқты әртүрлі параметрлерді өлшеу кезінде кеңінен қолданылады. Олар қарапайым, ішкі сезімтал элементтер болып табылады, оларды кварц талшығына фото жазуға болады және талшықты-оптикалық сенсорларға қатысты барлық артықшылықтарды ұсынады. Әдетте, ТБТ сенсорын оптикалық талшық ядросының сыну көрсеткішінің таңдаулы Фото-индукцияланған модуляциясы ретінде қарастыруға болады. Резонанстық толқын ұзындығы ТБТ (Bragg толқын ұзындығы), λ_B , негізгі режимнің (пэфф) және тордың периоды (Λ) тиімді сыну көрсеткішімен байланысты, жоғарыдағы теңдеуге сәйкес (1.1)

Тор кең жолақты оптикалық көздермен жарықтандырылған кезде, шағылысқан спектр-бұл тордың жазықтықтарымен жарықтың кедергісінен туындаған өткір шың. Тордың кез-келген бұзылуы (мысалы, сыртқы деформация немесе температураның өзгеруі) шағылысқан немесе берілетін спектрлерде анықталатын Брэгг толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі [28].



3.4 Сурет – Брэгг тор құрылымының схемасы.

ТБТ – ның басты артықшылығы – абсолютті өлшеу және жарықтың ауытқуынан тәуелсіздік. Тар жолақты шағылысатын спектр мен төмен кірістірілетін шығындардың арқасында ТБТ матрицалары бір режимді талшықтың (SMF) бойымен оңай құрылады. Мультиплекстеудің керемет мүмкіндігі таратылған зондтау немесе квази-үлестірілген зондтау үшін пайдалы. Қазіргі уақытта VBR зондтау қосымшаларында маңызды рөл атқарады. Физикалық, химиялық, биомедициналық және электрлік параметрлерді қоса алғанда, қоршаған ортаның әртүрлі параметрлеріне жоғары сезімталдыққа байланысты олар азаматтық Инфрақұрылым, аэроғарыш, энергетика және теңіз салаларында денсаулықты құрылымдық бақылау үшін қолданылады, мұнда өлшенетін шамаларға қатысты ақпарат әдетте Брэгг толқын ұзындығының ығысуымен кодталады.

Қазіргі уақытта талшықты-оптикалық датчиктер Брэгг торлар негізінде дайындалған түрлі салаларда өздерін дәлелдеді. Коммерциялық нарықтың дамуы осы сенсорларға қызығушылықтың артуын көрсетеді [29].

Эксперимент

Қазіргі таңда талшықты Брэгг торлары (ТБТ) негізінде температура сенсорлары кеңінен таралды. Бұл датчиктер 300 °С-тан аспайтын температураға дейін зерттелген [30].

Жоғары температурада ТБТ негізіндегі сенсорлардың әрекетін зерттеу қажет, бұл электрлік температура сенсорларын орнату мүмкін емес құрылғыларда маңызды болып келеді.

Мүмкін болатын қиындықтар: ең көп таралған Жоғары температуралы қорғаныс-қатайтатын жабындар (ҚҚЖ) поли-имидтен жасалады, ол үшін жоғарғы температура шегі 300 °С құрайды. Жоғары температураға төтеп бере алатын, мысалы, металл жабыны, өндіру қиын, Арнайы технологиялық жабдықты қажет етеді және материалдың кеңеюіне температураның әсеріне байланысты қосымша зерттеуді қажет етеді. Бұл ретте шығарылатын өнімнің аз көлемі тиімсіз болып шығады.

Бұл жұмыста сенсордың дизайны ұсынылады, жоғары температурада ТБТ жұмысының негізгі мүмкіндігі зерттеледі.

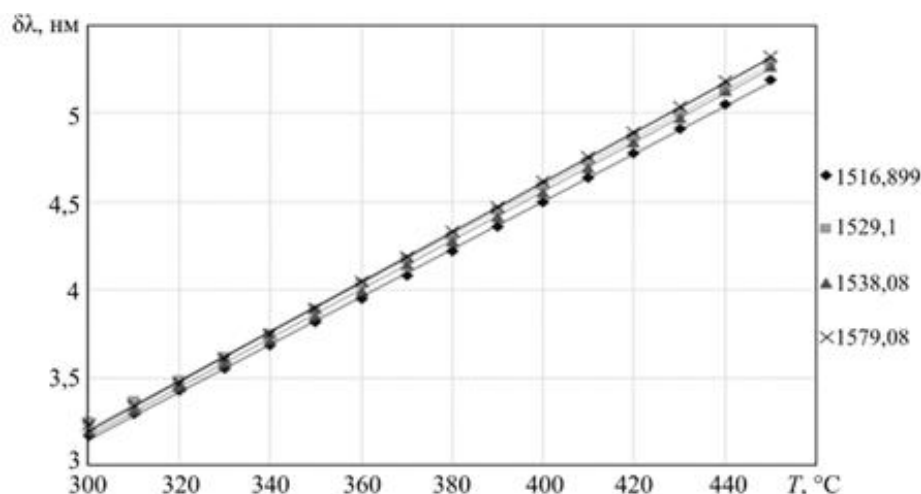
Халықаралық ғылыми-теориялық конференциясының материалдарынан алынған эксперименттік нәтижелерге сүйенсек, Брэгг торларының жұмыс қабілеттілігінің шекті температурасына қол жеткізілген жоқ.

Эксперимент температурасы 25 °С – тан 450 °С – қа дейін, толқын ұзындығы 1516,9 нм-ден 1584,4 нм-ге дейін мәндер алынып жүргізілген.

Эксперименттік зерттеудің сипаттамасы. Зерттелетін нысандар ретінде фазалық маска әдісімен төрт талшықты Брагг торлары жазылды, полиимидті қорғаныс-қатайту жабынымен жабылған. Әрбір ТБТ ұзындығы 30 мм, орталық толқын ұзындығы: $\lambda_1 = 1516,98$ нм, $\lambda_2 = 1529,12$ нм, $\lambda_3 = 1538,11$ нм, $\lambda_4 = 1579,08$ нм. [31]

Брэгг толқын ұзындығы шыңының ығысуын анықтау сұрау құрылғысы – спектроанализатор (СП) көмегімен жүргізілді FiberSensing FS2200.

Графиктерде (сурет. 3.5) ТБТ барлық төрт үлгісі үшін орталық толқын ұзындығының ығысуының температуралық тәуелділігінің нәтижелері ұсынылған. Ең кіші квадраттар әдісімен есептелген жуықтау сызықтары қосылды.



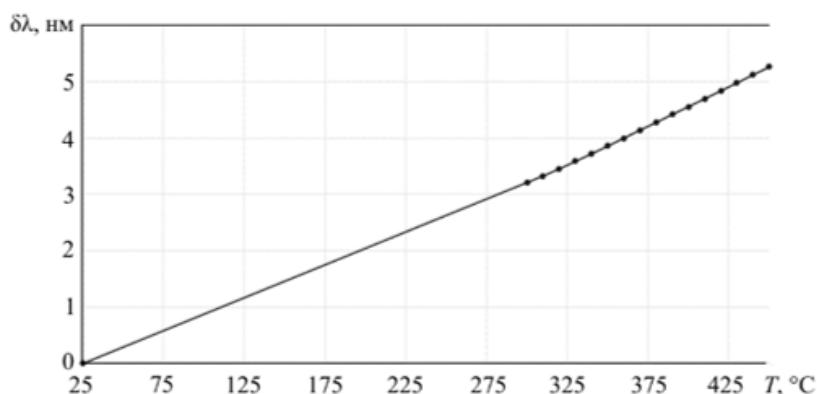
3.5-сурет – Толқын ұзындығының түпнұсқадан ауытқуы (25 °с кезінде)

Мәндердің максималды таралуы 0,08 нм құрайды, бұл шаманың реті бойынша VBR жазбасының дәлдігіне сәйкес келеді. Осылайша, толқын ұзындығының температураға тәуелділігі 300-ден 450 °С-қа дейін болуы мүмкін (шамамен 3 °С қателікпен) интерполяцияланған келесі байланыс [32]:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(T_k) + k_0(300 - T_k) + k(T - 300), i = 1 \dots 4,$$

1 °С-қа дейінгі дәлдікті арттыру үшін температураға (немесе толқын ұзындығының температурасына) байланысты толқын ұзындығын есептеу үшін сенсорларда (1) қатынасын қолдану керек, мұнда $\lambda_i(300)$ эксперименталды түрде анықтау керек.

Осылайша, 300 °С-тан асатын температурада шағылысу толқын ұзындығының ТБТ-на тәуелділігін модельдеуге болады (сурет. 3) (1), (3) қатынастар арқылы сызықтық. Бұл модель қорғаныс-қатайтатын жабын болмаған кезде температураға байланысты шағылысу толқын ұзындығының шыңын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді.



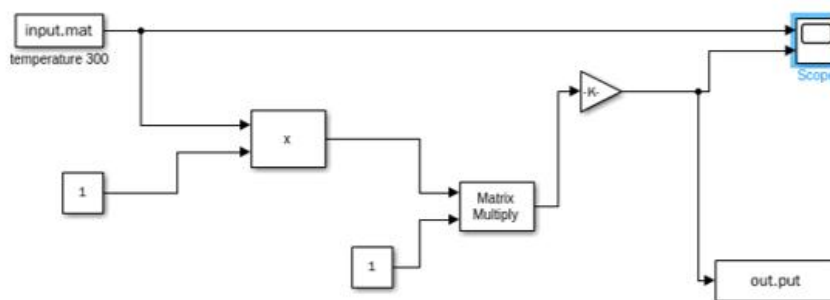
3.6-сурет – ТБТ өзгеріс моделі

Эксперимент кезінде (екі күн) 300-ден 450 °С-қа дейінгі температура диапазонында әртүрлі талшықты Брэгг торлары үшін нәтиженің қайталануы байқалды.

350 °С температурада полиамидті қорғаныс жабыны буланып кетеді, бірақ бұл сенсордың жұмысына әсер етпейді. Осы температура диапазонында жүргізілген қайта өлшеу мұны растайды. 450 °С-қа жеткенде жиналған температура сенсоры тұрақты дәлдікпен сигнал берді. Осылайша, тордың жұмыс қабілеттілігінің шекті температурасына қол жеткізілген жоқ. [33]

3.1 MATLAB – әмбебап талшықты-оптикалық сенсорға арналған модель құру

Оптикалық талшықтың талшықты-оптикалық температура сенсоры ретінде пайдаланылуы мүмкін екендігі туралы дәлелдер болғандықтан, осы сенсордың тиімділігін бағалау үшін микрогиб және макрогиб модельдеу құралы негізінде конфигурацияны модельдеу арқылы зерттеу жүргізіледі. Сенсордың оңтайлы дизайнын анықтау үшін Matlab-тың Simulink toolbox көмегімен модельдеу арқылы сенсордың сипаттамаларын анықтау арқылы өнімділікке талдау жасалды.

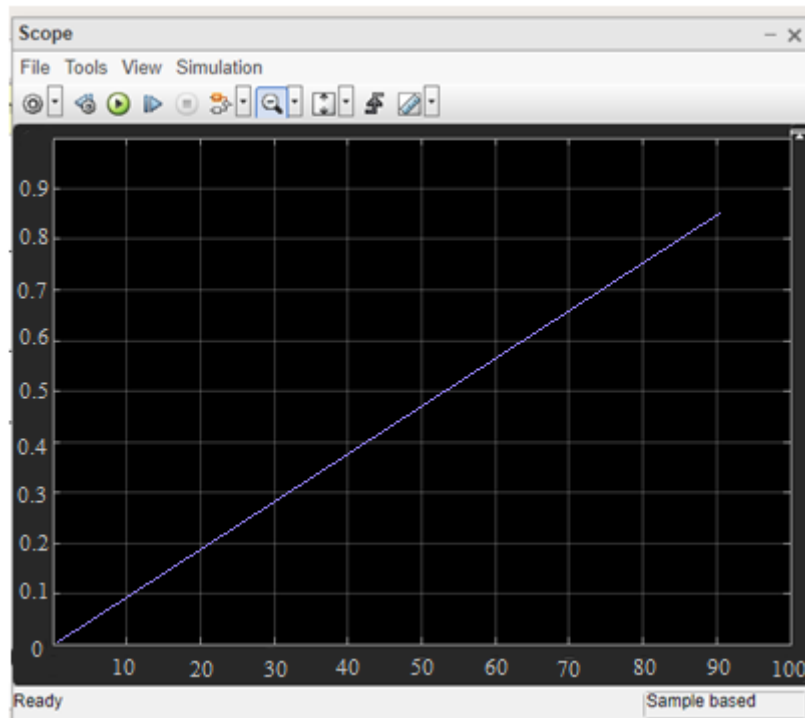


3.7-сурет – MATLAB – әмбебап талшықты-оптикалық сенсорға арналған SIMULINK моделі.

Кейіннен сенсорды жоғары температура диапазонында қолдануға арналған модель жасалды.

Microbend сенсорының жалпы моделінің жалпы конфигурациясы үшін оптикалық талшықтың өткізу қабілеттілігін өзгерту өрнегінен және модельдеу нәтижелері төменде көрсетілген. Кейіннен сенсорды 0-ден 100°C -қа дейінгі жоғары температура диапазонында қолдануға арналған модель жасалды, нәтижелер сызықтық екендігі анықталды, бірақ құрылғы сигналдары деректерді түзете алатындай көлбеу тым тік болды. Салынған модель төменде көрсетілген. Тұрақты беріліс үшін өлшенген мәндердің графигі төменде келтірілген, бұл нәтижелер өте сызықты екенін көрсетеді. Көлбеуді түзету үшін күшейткішке қолайлы пайда алу үшін итерациялар жасалды және қажетті жауап 8-суретте көрсетілген. Мұны түрлендіргіш каскадындағы өлшеу операциялық күшейткіштерінің кері байланыс желісін қарапайым орнату арқылы іс жүзінде жүзеге асыруға болады. Сол сияқты, басқа температура диапазондары үшін өлшенетін диапазонда графиктер алу үшін сәйкесінше өзгертілуі мүмкін. Осылайша, жасалған модель әртүрлі температура диапазонында жұмыс істейтін әртүрлі қосымшалар үшін температура сенсорларын тиімді жобалауға көмектеседі.

Модельдеу нәтижесі келесідей:



3.8-сурет – Температуралық өшуліктің сызықты анализы

Брэгтің талшықты сенсоры – бұл брэг торында температура мен деформация толқын ұзындығына және берілу функцияларына әсер етеді, өйткені температура немесе деформация тордың өлшемін өзгертеді, сондықтан тордың өлшемі өзгерсе, толқын ұзындығы да өзгереді.

$$r(\lambda) = \frac{iK \sin h(QL)}{Q \cosh(QL) - i\Delta\beta \sin h(QL)}$$

$$r(\lambda) = \frac{Q}{Q \cosh(QL) - i\Delta\beta \sin h(QL)}$$

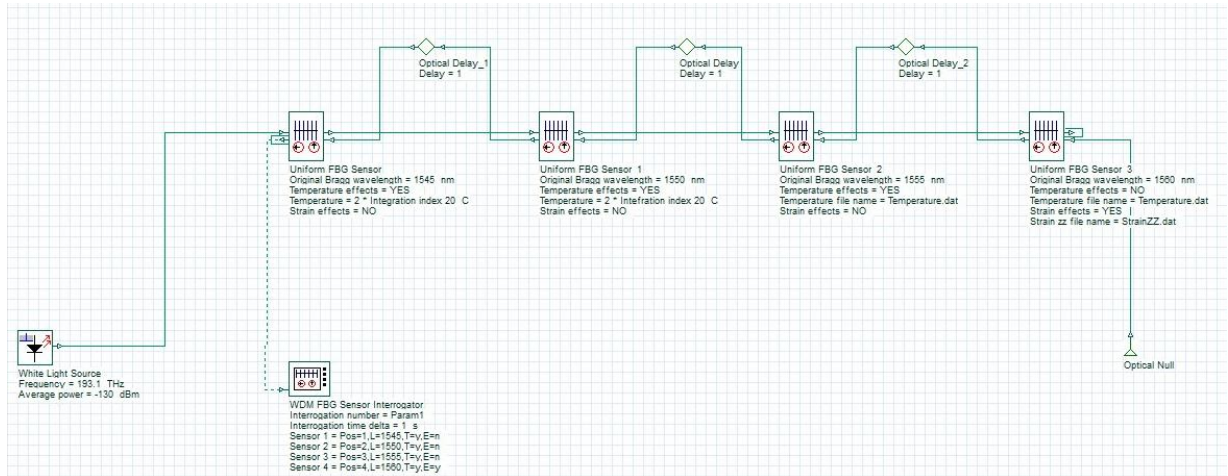
$$Q(\lambda) = \sqrt{|K^2| - |\Delta\beta^2|}$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_{TE} + \alpha_{TO})\Delta T$$

3.2 Optisystem жүйесінде ТБТ моделін құру

Толқын ұзындығының өтуі немесе шағылысуы мүмкін және біз оларды осында көрсетеміз негізгі тендеу, сондықтан рефлексия және беріліс, байланыс күшіне, сондай-ақ фазалардың сәйкес келмеуіне және негізгі арақатынасқа байланысты - міне, осы өрісте алынған нәрсе, ол брэг рейтингінің толқын

ұзындығы деформация мен температураға байланысты қалай өзгеретінін көрсетеді, және бұл байланыс коэффициенттері бар екенін көреміз, сондықтан осы байланыс коэффициенттерін біле отыра, содан кейін деформация немесе температураның өзгеруі толқын ұзындығының өзгеруін өлшеуге мүмкіндік береді, сондықтан біз бұл деформацияның немесе температураның өзгеруінің жүйеде қаншалықты күшті болғанын Optisystem жүйесінде қарастырамын.

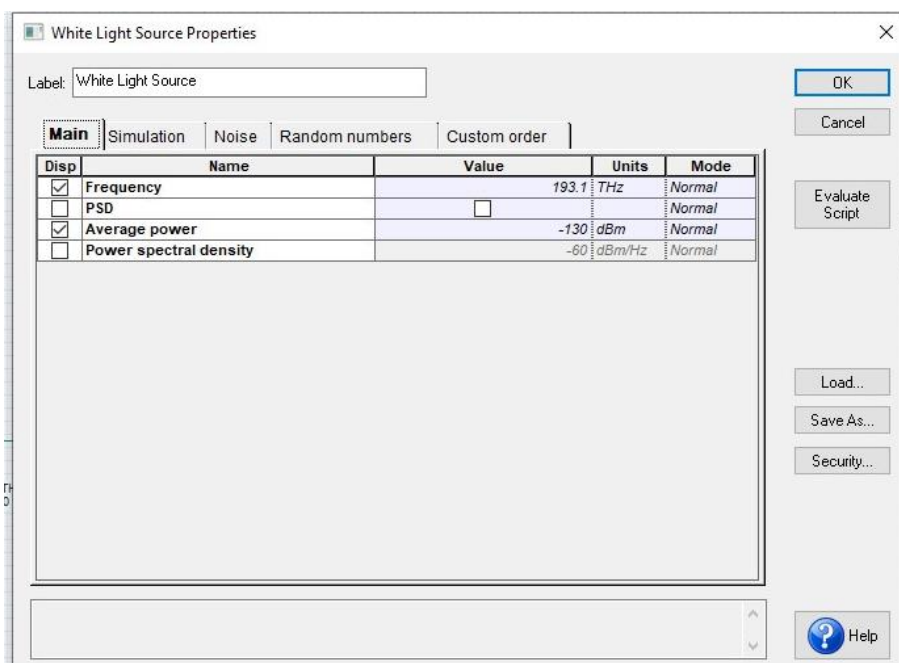


3.9-сурет – ТБТ және сұралым жүйесі

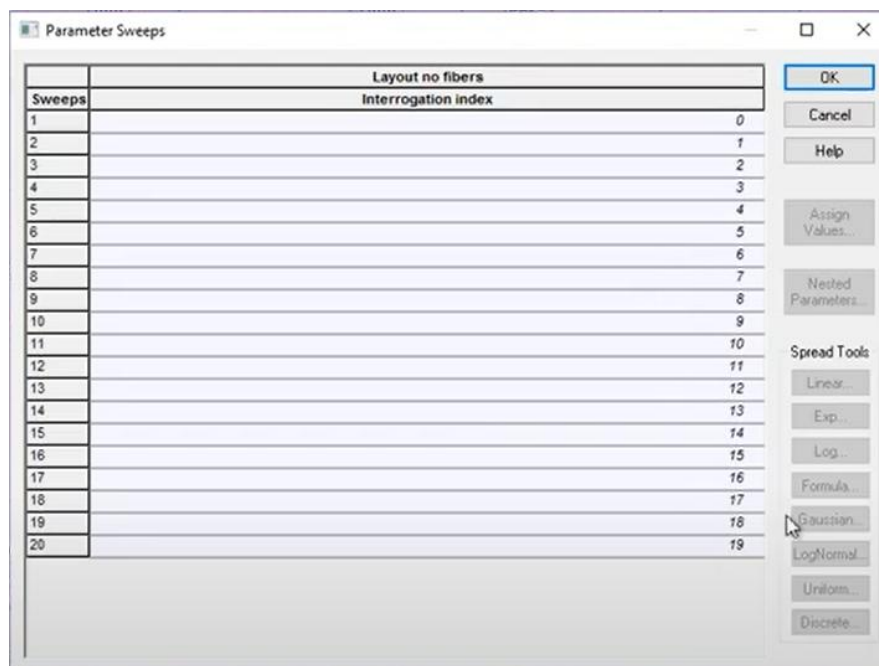
Бұл зерттеуде бізде төрт түрлі торлы сенсор бар, біз жасаған алғашқы екеуі, тек температураны өлшейтін етіп орнаттық, мұнда температураның әсері бар деп, үшінші және төртінші сенсорлар үшін минутына қалай жұмыс істейтінін түсіндіремін, олар іс жүзінде бірдей позицияда орналасқан. Біз көбінесе брэгтің толқын ұзындығының өзгеруін қолданамыз, байқағанымыздай, егер ол деформацияға да, температураға да әсер етсе, мәселе мынада, сіз бұл туралы екі белгісіз теңдеу деп ойлауыңыз мүмкін, сондықтан екеуін де шеше алу үшін екі толқын ұзындығының өзгеруіне ие болуымыз керек. Зерттеушілер әдетте деформацияны да, температураны да өлшегісі келсе, олар екі торды бір жерге қойып, біреуін аздап бос қалдырады. Деформацияның әсерін сезініңіз, және, шын мәнінде, бұл сенсор температура сенсорына айналады, содан кейін осы температураны бірінші бағалаудан алғаннан кейін, оны екінші бағалау үшін кіріс ретінде пайдалануға болады. Сондықтан бұл сенсор тек температураны өлшейді, содан кейін температураны алғаннан кейін оны кіріс ретінде қолдана аламыз, содан кейін бұл кернеуді өлшей алады, осылайша сіз олардың екеуінде де бар екенін байқайсыз. Оптикалық режимде жұмыс жасағанда температура мен деформациялар әдетте әр секунд сайын болады, мүмкін, әр миллисекундта. Көбінесе сауалнама үшін оптикалық спектр анализаторын және біздің интеграторды пайдаланады - бұл біздің спектр анализаторымыздың модификациясы, ол спектр анализаторының барлық функцияларын орындайды, сонымен қатар штамм мен кернеуді есептеу үшін айтатын қосымша есептеулерімізді орындайды, бірақ менің ойымша, егер кімде-кім сұраушыға қол жеткізе алмаса, бірақ оларда спектр анализаторлары болса, олар оны қолданады және сұралымның әр кезеңінде олар жиіліктерді өлшейді, содан кейін кернеу

немесе штамм үшін осы мәндерді қолдана отырып, сырттан есептеулер жүргізуге тура келеді, сондықтан есептеулерді нақты орындау үшін біріктіріледі.

Осыдан температураны алғаннан кейін, оны кіріс ретінде пайдалана аламыз, содан кейін бұл кернеуді өлшей алады, осылайша олардың екеуі де бір қалыпта екенін байқаймыз. Температура мен деформацияны өлшеу әдетте әр секунд сайын, мүмкін әр миллисекундта болады, бірақ біз білесіз, оптикалық режимде болғанда егер бізге наносекундтардың уақыт бойынша бөлінуі қажет болса, онда әдетте бізде сұрау салушы бар және ол не істейді, әр секунд сайын ол өтетін оптикалық сигналдар ағынын жібереді. Жүйе оралады, содан кейін бір секундтан кейін ол басқа ағынды жібереді, сол арқылы өтеді және қайта оралады.

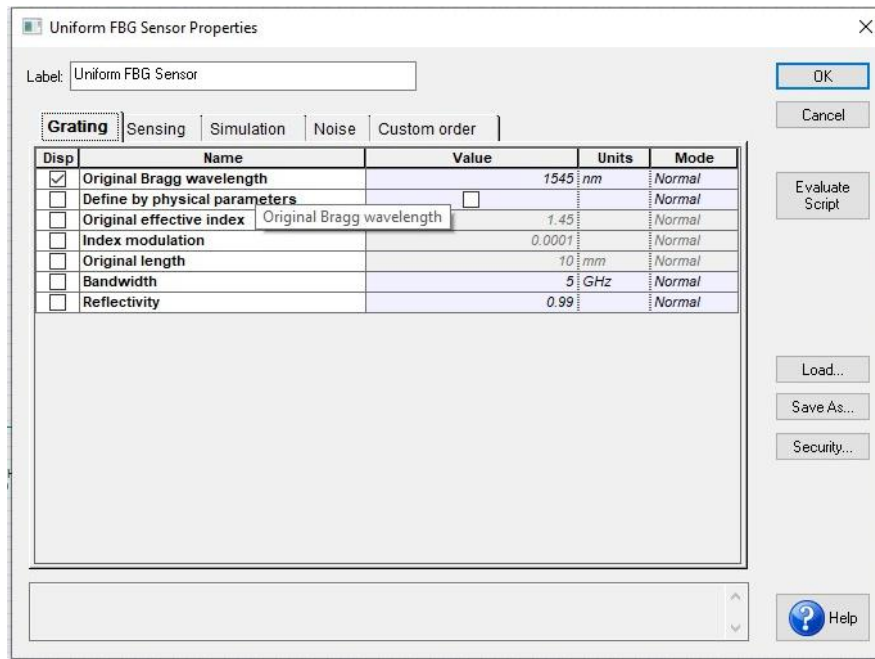


3.10-сурет – Ақ жарық көзі параметрі

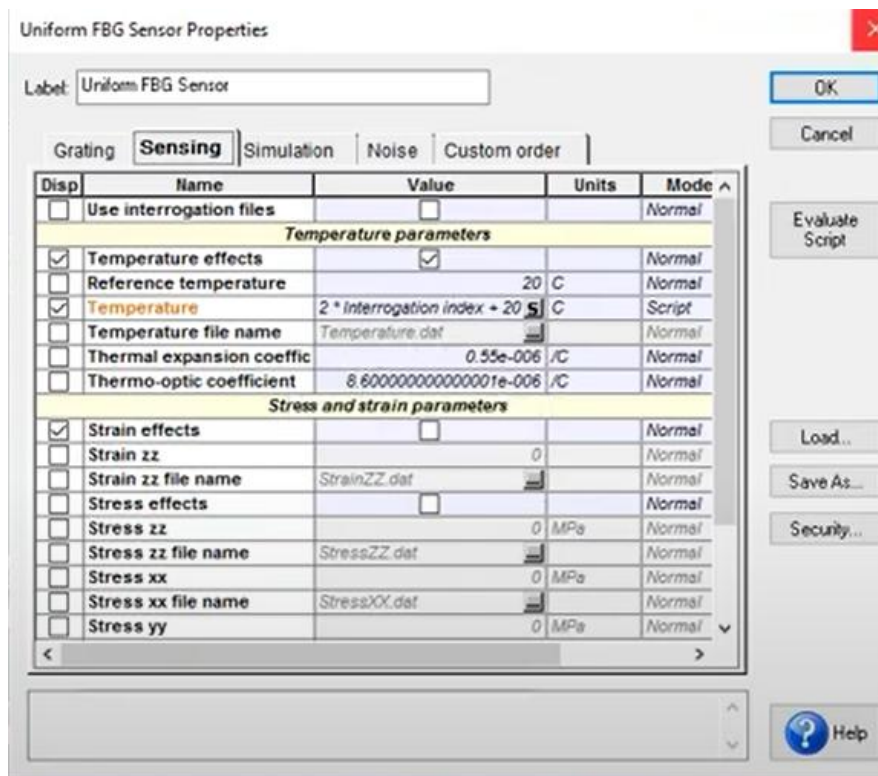


3.11-сурет – Ақ жарық көзінің параметрлерін сканерлеу

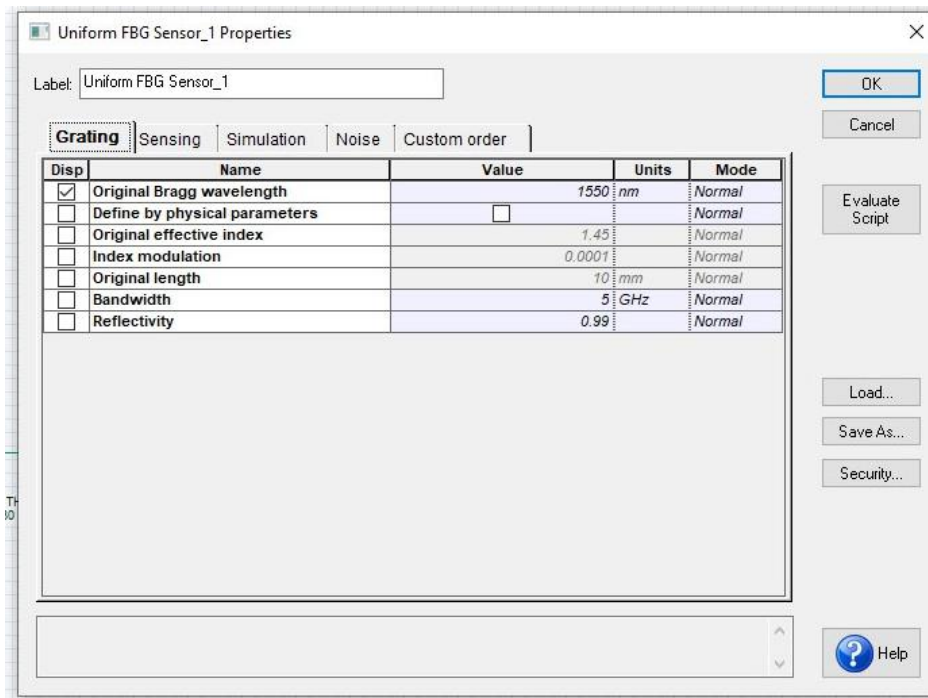
Біздің анализаторымызда бұл жерде ашқан нәрсе – бұл брэгг сенсоры, онда жазылған брэггтің бастапқы толқын ұзындығы 14 немесе 1545 нанометр сондықтан бұл сенсор ол 1545-ке орнатылды. Бұл теңдеу бойынша теңдеудің төменгі жағында λ_B болады. Біз мұны іс жүзінде үзіліс сүзгісі болатындай етіп орнаттық, оны физикалық параметрлермен немесе шағылысудың өткізу қабілеттілігінің кейбір тиімді параметрлерімен анықтай аламыз. Осы жерде өлшеу параметрлеріне кірсек, температураның температураға әсерін тексерістен, температура сенсоры ретінде пайдаланылғанын көреміз. Температура, бұл екі рет жауап алу индексі плюс 20 ретінде жазылады. Сонымен, ол 20 градустан басталады және бізде сауалнама индексі деп аталатын сценарий бар, сауалнама индексі 0-ден 19-ға дейін қадаммен жүреді. Сонымен, бұл нені білдіреді, егер сіз осында оралсақ, сауалнама индексі 0-ден басталады, сондықтан ол 20 градустан басталады, содан кейін ол келесідей болады: сауалнама индексі 1-ден 19-ға дейін артады, сондықтан ол 58 градус болады. Екінші сенсор біріншіге өте ұқсас, ол температураны өлшеуге арналған, бірақ, брэггтің бастапқы толқын ұзындығы 1550 нм құрайды.



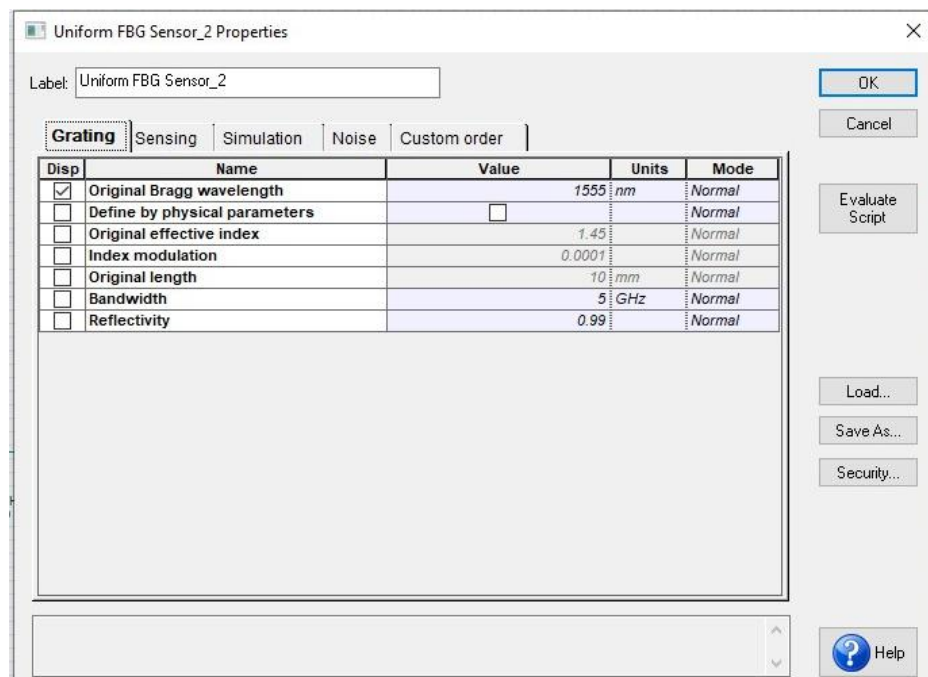
3.12-сурет – Біртекті ТБТ датчигі параметрі



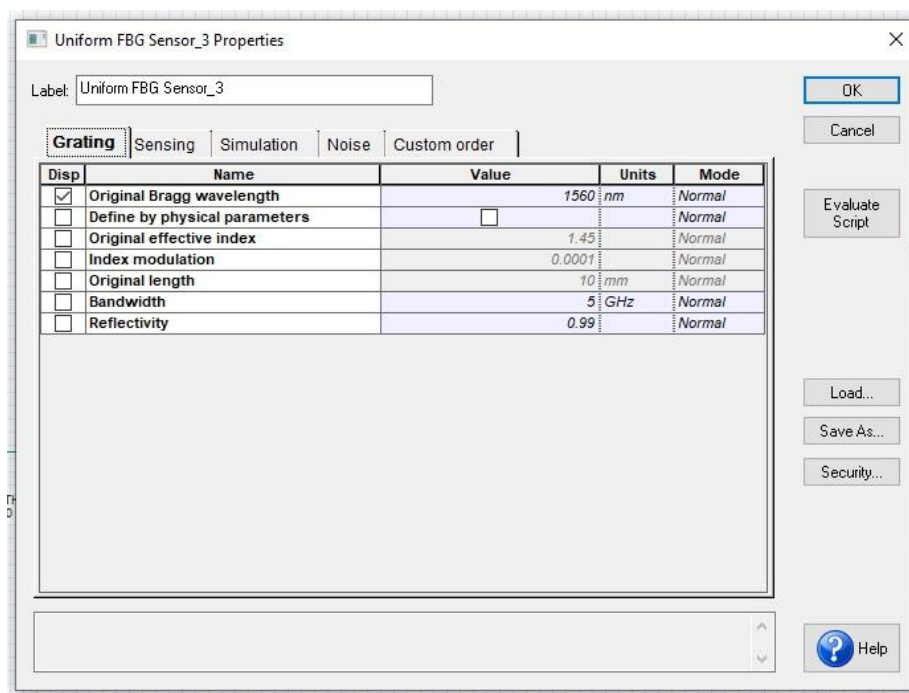
3.13-сурет – Біртекті ТБТ датчигі параметрі



3.14-сурет – Біртекті ТБТ датчигі 1 параметрі



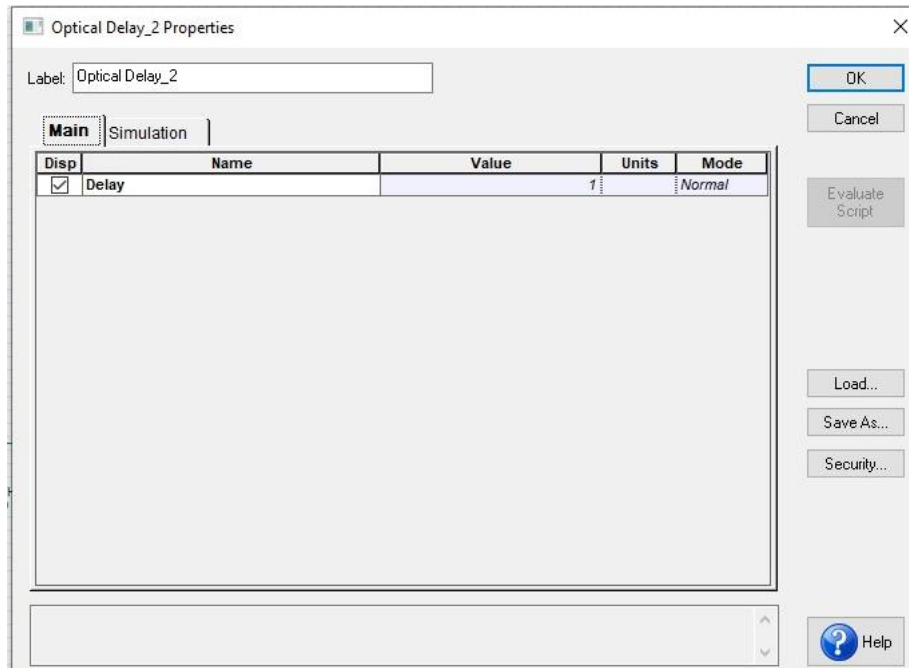
3.15-сурет – Біртекті ТБТ датчигі 2 параметрі



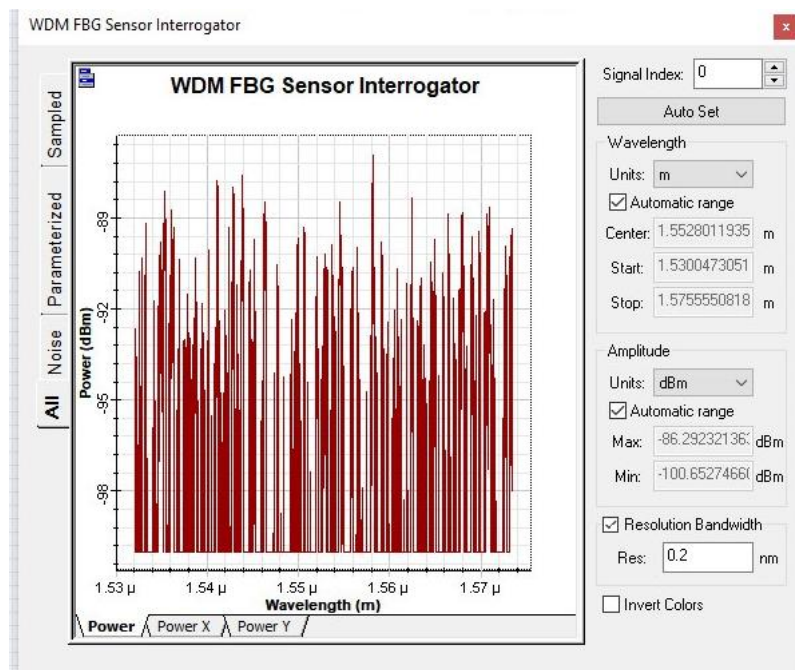
3.16-сурет – Біртекті ТБТ датчигі 3 параметрі

Мұндай жүйелерде әр сенсордың өзіндік бастапқы толқын ұзындығы болуы керек, өйткені егер әр сенсордағы ығысуды өлшегіміз келсек, олардың барлығы бірдей толқын ұзындығында болса, сигнал олардың бәрінен өтіп жатқанын байқаймыз, сонымен жүйе түсіне алмайтын еді, қандай сенсор іс жүзінде жылжиды, сондықтан олардың барлығын брэггтің әртүрлі толқын ұзындығында жасауымыз қажет, сол себепті екіншісі 1550 нм. Үшіншісі – 1555 нм белгісінде екенін көреміз. Егер дәл қазір зондтауға қайта оралсақ, демонстрация ретінде осы индексті осы сауалнама индексіне индекстеудің орнына, temperature.dat сыртқы файлды жүктедім. Бұл жай ғана файл, онда әр түрлі температураны білдіретін 19 сан бар, егер сізде сынақ үшін пайдаланғыңыз келетін кейбір эксперименттік температура өлшеулері болса, оларды орнына қолдана аламыз, соңында төртінші, бұл үлкен айырмашылығы бар, ол – 1560 нм. Брэгг толқын ұзындығы қазір оның температурасы бар екенін және оның кернеуі бар екенін көреміз, оның орнына кернеу параметрлерін қолдана аламыз, ішінде кернеу іштей өзгертеді, сондықтан оның температурасы бар, ол алдыңғы файлмен бірдей температуралық файлды қолданады, олар бірдей позицияда орналасқан, сондықтан олар бірдей температураны сезінуі керек, бірақ қазір бізде деформацияның әсері бар және бұл zz деформация файлы.dat-бұл жай ғана бірнеше деформациясы бар деректер файлы. Міне, барлық сенсорлар, сенсор бір, екі, үш, төрт, бір, екі және екіншісі өз позицияларында, бір және екі, қараңыз, мен олардың толқын ұзындығын да енгіздім 1545 1550, сондай-ақ олардың температурасы жоқ, бұл дегеніміз, жоқ үш және төрт жүктеме жасушалары бір қалыпта, олардың толқын ұзындығы бар, үшінші сенсор – бұл жай температура, ал төртінші сенсор – бұл температура мен деформация. Мұнда онда спектрлік максимумдарды қолдану туралы жазылған опция бар. Сондай-ақ, минимумдарға арналған опция бар, оны неге бір секундта өзгерте аламыз, егер қазір екі рет басатын болсақ, бұл біздің оптикалық спектрдің

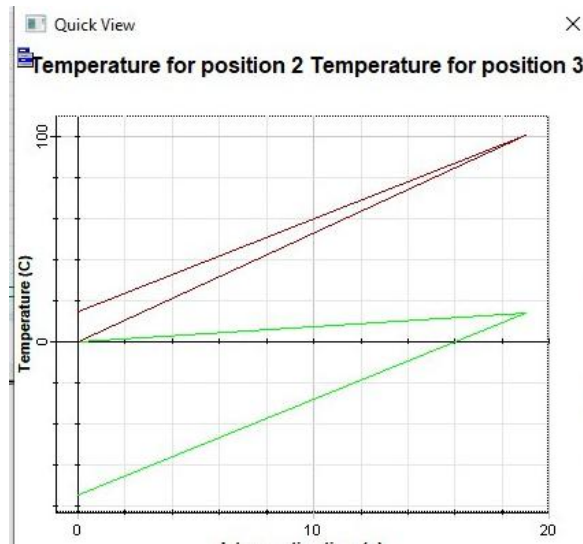
анализаторымен бірдей болады, сондықтан мұнда барлық сигналдар өтті. Сонымен, бұл шағылысу коэффициентін өлшеу, біздің шағылысқан сигналдарымыз.



3.17-сурет – Оптикалық кідіріс блогы параметрі



3.18-сурет – WDM FBG датчиктерді сұрау құрылғысы



3.19-сурет – Датчик сұралымы бойынша температура өзгерісі

Үшінші позицияға арналған кернеу, кернеудің қалай өзгеретінін көре аламыз, температураның алғашқы екеуінде менде сызықтық үлкейту болды, содан кейін соңғы екеуінде ол қайтадан пайда болды, енді оның түзу емес екенін байқаймыз. Датчик температура мен деформацияның әсеріне төтеп бере алады, бірақ содан кейін байланыс параметрлер әрқайсысында әр түрлі болуы керек.

Қорытындылай келсек, модельдеу құралын нақты өмірде орналастырылған ТБТ торының нақты параметрлерін синтездеу үшін пайдалануға болады. Мұны сенсорлық жүйені орнату және сынау кезеңінде жасауға болады. Содан кейін ТБТ өлшенетін үздіксіз оптикалық сигналдың орталық толқын ұзындығын және синтезделген ТБТ параметрлерінің нәтижелерін салыстыру арқылы нақты зондтау жүйесін талдау сатысында қолданыла алады. OptiSystem бағдарламасында ТБТ деформацияға төзімділігін, әртүрлі толқын ұзындығында температурасының өзгерісін байқадық.

4 Талшықты – оптикалық датчиктердің ерекшеліктері және қолданыстағы маңыздылығы

4.1 Энергияны сақтау жүйелері масштабында қолдануды анықтау

Литий-ионды аккумуляторлар құнының едәуір төмендеуі жақында электромобильдер мен стационарлық энергияны сақтау өнімдерінің көбеюіне әкелді. Қазіргі уақытта талшықты-оптикалық зондтау кең көлемді литий-ионды аккумуляторларда қолдану практикалық болып табылады, мұнда зерттеу жүйесінің құнын батарея элементтерінің немесе модульдердің қосалқы компоненттерін өлшеу үшін көптеген жеке орындарға бөлуге болады. Қолданудың кең спектрі коммерциялық тұрғыдан өміршең бола алады, өйткені арзан талшықты-оптикалық сенсорлар алдағы жылдары коммерцияландырылады. Біз талқылайтын үш ықтимал қолдану-жолаушылар электромобильдері, ауыр жүк машиналары және аккумуляторлық батареялар.

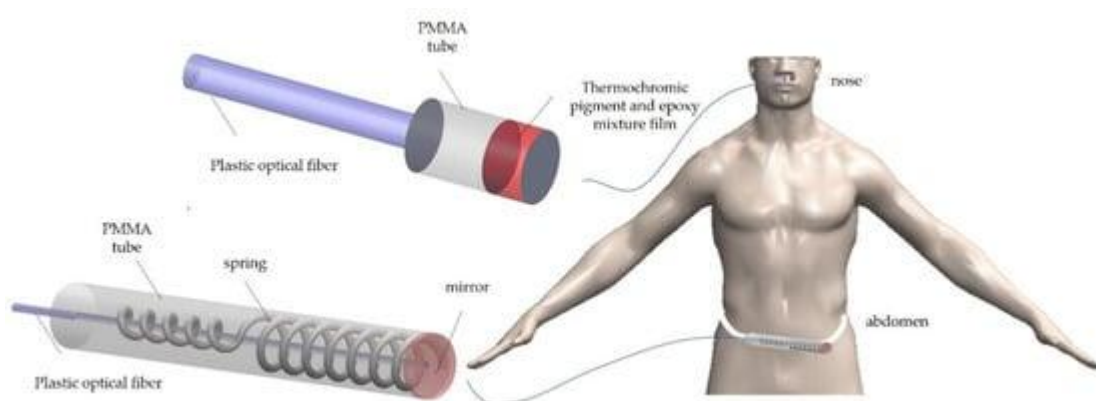
Жолаушылар электромобильдері. Жолаушылар электромобильдерінің әлемдік сатылымы соңғы 10 жыл ішінде тұрақты өсіп келеді және 2030 жылға қарай жаңа автомобильдер сатылымының 30% - дан асады деп күтілуде, бұл осы жылы сатылған 30 миллионнан астам электромобильдерді құрайды. Өсім көптеген факторларға байланысты, оның ішінде шығындардың төмендеуі, зарядтау инфрақұрылымына қол жетімділік және шығарындылар стандарттары сияқты реттеу сияқты қабылдау кедергілерінің төмендеуі. Жеңіл автомобильдерге арналған батарея мөлшері автомобильдің көлеміне және қуат қорына байланысты өзгереді. 2020 жылы АҚШ-та қол жетімді электромобильдердің модельдері 24-100 кВт / сағ электр қуатынан өзгерді. Сыйымдылығы 15-тен 40 Ач-қа дейінгі EV-класты кең форматты литий-ионды аккумуляторлар зертханалық масштабта зондтауға талшықты-оптикалық тәсілді қолдану арқылы зерттелді.

Ауыр электр жүк көліктері. Электр жүк нарығы да тез өсуде: 2019 жылы 6000 жүк көлігі сатылды. Нарық шығындардың төмендеуіне байланысты да, Калифорния әуе ресурстары кеңесінің нөлдік шығарындылары бар жүк көліктеріне мандаты сияқты ережелерге байланысты кеңейеді деп күтілуде. Электр жүк көліктері жеңіл жүк көліктерінен ауыр жүк көліктеріне дейін әр түрлі болуы мүмкін. Нарықтағы ең үлкен электр жүк көліктері үшін аккумулятордың мөлшері шамамен 300 кВт / сағ-тан 1 МВт / сағ-қа дейін өзгереді.

Коммуналдық ауқымдағы аккумулятор жүйелері. Желідегі генерация көздерінің құрамы әртараптандырылып, жаңартылатын бола бастаған сайын, коммуналдық масштабтағы аккумуляторлық энергия сақтау жүйелерін қолдану және орнату тез өсуде, сонымен қатар жеке бөлімдердің мөлшері өсуде. Соңғы бес жылда әлемдегі ең ірі жеке аккумуляторлық қондырғылардың ауқымы 1 МВт-сағ-тан 100 МВт-сағ-қа дейін өсті [34].

4.2 Талшықты-оптикалық температура датчиктері және олардың биомедициналық қолданылуы

Wook et al. [35] инвазивті емес талшықты-оптикалық тыныс алу сенсорларының екі түрін ұсынды (9-сурет), олар магниттік-резонанстық бейнені алу кезінде тыныс алу сигналын өлшей алады. Бұл сенсорлар MRI жүйесіндегі тыныс алуды бақылау үшін пластикалық оптикалық талшықтың ұшына қолданылатын термохромды материалға негізделген. Хабарланатын датчиктер бар екі түрлі қолдану; біреуі мұрын қуысы бар сенсор болды, ол ауа ағынының температурасының өзгеруін термохромды пигментпен өлшей алады, ал екіншісі іш қуысына бекітілген сенсор болды, ол полиметилметакрилат түтіктерінен, айналардан және серіппелерден тұратын сезімтал бөліктің көмегімен іштің айналасын өлшей алады. Олар МРТ кеңсесінде пациенттің тыныс алу қозғалысына байланысты оптикалық талшықтар арқылы МРТ басқару бөлмесіндегі детекторларға бағытталған модуляцияланған жарықты өлшеді; тыныс алудың талшықты-оптикалық сенсорларының тыныс алу сигналдары ВІОРАС жүйесінің сигналдарымен салыстырылады. Авторлар тыныс алу сигналдарын МРТ кескінін нашарлатпай алуға болатындығын растады. Шағылысқан жарықтың қарқындылығы іштің қозғалысына сәйкес пластикалық оптикалық талшықтың айна мен дистальды ұшы арасындағы қашықтықтың өзгеруімен өзгерді.



4.1-сурет – Мұрын қуысы мен іш қуысы бар талшықты-оптикалық сенсор құрылымдарының схемалық сызбасы

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыс жалпылама түрде талшықты – оптикалық температуралық датчигін зерттеуге арналды.

Бұл жұмыста талшықты – оптикалық температура датчигінің толық жұмыс принципімен танысамыз және датчиктің жоғары температура жұмыс жасауын және OptiSystem, Matlab бағдарламаларында қажетті зерттеулер жүргізіліп нәтижелері алынды. Берілген параметрлері бойынша есептеулер жүргізіліп графиктер мен анализдері талданды.

Автоматтандырылған бақылау және басқару жүйелерінің қарқынды дамуына байланысты өнеркәсіптің барлық салаларында физикалық шамалардың датчиктері — температура, қысым, үдеу, қозғалыс, ток қажеттілігі артады. Аталған талаптарды талшықты-оптикалық датчиктер барынша қанағаттандырады. Жарық және оптикалық талшық қасиеттерінің арқасында талшықты-оптикалық термометрлер жоғары уақыт және кеңістіктік рұқсат етілген және өте жоғары дәлдікпен электромагниттік бөгеуілдер кезінде температураны өлшеуге қабілетті. Қазіргі таңда температураны өлшеу саласында бірқатар жабдықтар белгілі және мұндай жүйелерді жетілдіру өлшеу техникасындағы перспективалық бағыт болып табылады. Талшықты-оптикалық датчиктерге мынандай талаптар қойылады: өлшеудің жоғары дәлдігі мен сенімділігі; - сигналдар қашықтыққа тәуелді емес; жоғары ұзақ мерзімді тұрақтылық; жақсы коррозияға төзімділік; сенсорларды өте жоғары температурада қолдануға болады; орнатудың қарапайымдылығы. Қойылған талаптардың ішінде тиімдісі – жоғары температурада берілген нормадан астам өлшеу жүргізу.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Мруз, О.; Ковальский, А.; Погорзельская, Ю.; Шпотюк, О.; Вакив, М.; Буткевич, Б.; Масіак, J. Термоэлектрические процессы деградации в термисторах NTC для защиты электронных схем от скоростного тока. *Микроэлектрон. Релиаб.* **2001**, *41*, 773–777.
2. Мулла, Р.; Dunnill, C.W. Одноматериальные термопары из графитовых следов: Изготовление чрезвычайно простых и недорогих тепловых датчиков. *Углеродные тенденции* **2021**, *4*, 100077.
3. Кумар, В.; Верма, Дж.; Маан, А.С.; Akhtar, J. Epitaxial 4H-SiC на основе диодных датчиков температуры Шоттки в сверхнизком диапазоне тока. *Вакуум* **2020**, *182*, 109590.
4. Кумар, В.; Маан, А.С.; Ахтар, Д. Неоднородности высоты барьера, вызванные аномалией тепловой чувствительности диодного датчика температуры Ni/4H-SiC Шоттки. *Я. Вак. Наук Технол.* **2014**, *32*, 041203.
5. Эм, Л.Ф.Д.; Киссинджер, Т.; Джеймс, С.В.; Чехура, Э.; Верзелетти, А.; Tatum, R.P. Высокочувствительное измерение давления с помощью волоконно-оптических датчиков, установленных на композитной диафрагме. *Opt. Express* **2021**, *29*, 4105–4123.
6. Датта, П.; Матиас, И.; Арамбуру, К.; Бакас, А.; Лопес-Амо, М.; Otón, J.M. Конический волоконно-оптический датчик температуры. *Микров. Опт. Технол. Летт.* **1996**, *11*, 93–95.
7. Аллсоп, Т.; Флореани, Ф.; Енджеевский, К.П.; Маркес, П.В.С.; Ромеро, Р.; Уэбб, Д.Д.; Беннион И. Спектральные характеристики конического СУГ прибора как чувствительного элемента для показателя преломления и температуры. *Д. Лайтвейв Технол.* **2006**, *24*, 870–878.
8. Ху, Д.Д.Д.; Лим, Дж.Л.; Цзян, М.; Ван, Ю.Х.; Луан, Ф.; Шум, П.П.; Вэй, Х.Ф.; Tong, W.J. Длиннопериодическая решетка каскадируется на модальный интерферометр фотонного кристаллического волокна для одновременного измерения температуры и показателя преломления. *Опт. Летт.* **2012**, *37*, 2283–2285.
9. Гузовский, Б.; Лакомский, М.; Цивинский, М. Бесконтактные датчики на основе оптических волокон с шаровой линзой. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2016**, *104*, 0120311.
10. Ян, Ю.; Тянь, Д.; Чэнь, К.; Чжоу, Х.; Гонг, З.; Ю, К. Волоконно-оптический датчик смещения с использованием метода спектральной демодуляции. *Д. Лайтвейв Технол.* **2018**, *36*, 3666–3671.
11. Ву, Дж.; Мяо, Ю.; Сонг, Б.; Лин, В.; Чжан, К.; Чжан, Х.; Лю, Б.; Yao, J. Одновременное измерение смещения и температуры на основе тонкосердечника волоконно-модального интерферометра. *Опт. Коммун.* **2015**, *340*, 136–140.
12. Гузовский, Б.; Лакомский, М. Реализация волоконно-оптических датчиков перемещения. *Опт. Волокно Технол.* **2018**, *41*, 34–39.

13. Хоу, М.; Ван, Ю.; Лю, С.; Го, Дж.; Ли, З.; Лу, Р. Датчик давления с повышенной чувствительностью с полым фотонным кристаллическим волокном. *Д. Лайтвейв Технол.* **2014**, 32, 4035–4039.
14. Киссинджер, Т.; Коррейя, Р.; Чарретт, Т.О.Х.; Джеймс, С.В.; Tatum, R.P. Интерферометрия сегментов волокон для динамических измерений деформации. *Д. Лайт. Технол.* **2016**, 34, 4620–4626.
15. Колли В.Р.; Басавапрасад; Бахаддур, И.; Талабаттула, С. Высокочувствительный фотонный кристалл на основе датчика давления на основе интерферометра Маха-Цендера. *Res. Opt.* **2021**, 5, 100118.
16. Anderegg, P.; Brönnimann, R.; Meier, U. Reliability of long-term monitoring data. *J. Civ. Struct. Health Monit.* **2014**, 4, 69–75.
17. American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Strand for Prestressed Concrete*; ASTM A416/A416M-18; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
18. Burns, N.H.; Helwig, T.; Tsujimoto, T. Effective prestress force in continuous post-tensioned beams with unbonded tendons. *ACI Struct. J.* **1991**, 88, 84–90.
19. Lundqvist, P.; Nilsson, L.O. Evaluation of prestress losses in nuclear reactor containments. *Nucl. Eng. Des.* **2011**, 241, 168–176.
20. Cho, K.H.; Park, S.Y.; Cho, J.R.; Kim, S.T.; Park, Y.H. Estimation of prestress force distribution in the multi-strand system of prestressed concrete structures. *Sensors* **2015**, 15, 14079–14092.
21. Washer, G.A.; Green, R.E.; Pond, R.B., Jr. Velocity constants for ultrasonic stress measurement in prestressing tendons. *Res. Nondestruct. Eval.* **2002**, 14, 81–94.
22. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/opticalengineering/volume-58/issue-7/072007/Review-on-fiber-optic-sensing-in-health-monitoring-of-power/10.1117/1.OE.58.7.072007.full?SSO=1>
23. Волоконные Брэгговские решетки. [электронный ресурс]. Дата обращения: 15.03.2020 URL: http://sf.ifmo.ru/ru/projects/bragg_gratings
24. M. Kreuzer. Strain measurement with fiber Bragg grating sensors. HBM, Xingli Wang, Zhen Chen, Wanjing Wang, Yuping Xu, Qiang Li, Chunyi Xie, Jichao Wang, Zhongshi Yang, Guang-Nan Luo. Fibre Bragg grating sensors for fusion diagnostics: Temperature monitoring of a tungsten mono-block mock-up under high heat flux. Journal: Fusion Engineering and Design, Volume 150, January 2020, Article 111378
25. Carlo Edoardo Campanella, Antonello Cuccovillo, Clarissa Campanella, Abdulkadir Yurt, Vittorio M. N. Passaro. Fibre Bragg Grating based strain sensors: Review of Technology and Applications. Published: 15 September 2018.
26. «Сейфуллин окулары – 16: Жана формациядағы жастар ғылыми – Қазақстанның болашағы» атты халықаралық ғылыми-теориялық конференциясының материалдары = Материалы Международной научно-теоретической конференции «Сейфуллинские чтения – 16: Молодежная наука новой формации – будущее Казахстана». - 2020. - Т. I, Ч. 3 - С. 137-140

27. Hill, K.O.; Fuji, Y.; Johnson, D.C.; Kawasaki, B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.* **1978**, *32*, 647–649
28. Joe, H.E.; Yun, H.; Jo, S.H.; Jun, M.B.G.; Min, B.K. Review on optical fiber sensors for environmental monitoring. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* **2018**, *5*, 173–191.
29. Высокотемпературный датчик [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.isensor.ru/index.php/production/tochechnyedatchiki/sensors/90-produktsiya/tochechnye-volonno-opticheskie-datchiki/147-astro-a514> (дата обращения: 31.08.2017).
30. Biswas D.R. *Opt. Eng.* – 1991. – № 30 (6)
31. Результаты записи волоконных брэгговских решеток на кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах разных поколений / А.В. Бурдин, А.А. Васильцев, В.А. Бурдин [и др.] // *Инфокоммуникационные технологии.* – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 129–137.
32. Моделирование волоконно-оптических сенсоров температуры на основе брэгговской решетки / W.Waldemar, К.Х.Жунисов, Н.К. Смайлов [и др.] // *Велес.* – 2016. – № 4-2 (34). – С. 71–76.
33. Управление резонансной длиной волны волоконных брэгговских решеток с использованием резистивного покрытия на основе однослойных углеродных нано трубок / Ю.Г.Гладуш, О.И. Медведков, С.А. Васильев [и др.] // *Квантовая электроника.* – 2016. – Т. 46, № 10. – С. 919–923.
34. Electric Vehicles: Setting a Course for 2030. Available online: <https://www2.deloitte.com/uk/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html> (accessed on 17 January 2021).
35. Wook, Y.J.; Jang, K.W.; Seo, J.K.; Heo, J.Y.; Moon, J.S.; Park, J.Y.; Lee, B.S. Development of respiration sensors using plastic optical fiber for respiratory monitoring inside MRI System. *J. Opt. Soc. Korea* **2010**, *14*, 235–239.

СЫН - ШІКІР
диссертациялық жұмыс

Мырзахан Әмина Болатханқызы
7M06201- Телекоммуникация

Тақырыбына: **Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын зерттеу және модельдеу**

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Мырзахан Әмина диссертациялық жұмыста Брэгг торларына негізделген оптикалық талшықтың модельдеу және жалпылама сипаттамасы мен өлшеу жүйелері жасалған зерттеулерге негізделе отырып, қарастырылды. Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде талшықты- оптикалық температура датчигінің параметрлік сипаттамалары және жұмыс принциптері теориялық тұрғыдан зерттелді.

Екінші бөлімде талшықты-оптикалық температура датчигінің OptiSystem, Matlab Simulink графикалық және математикалық модельдеу ортасында зерттелді. Датчиктің толық ішкі құрылымдары, жоғары температурада жұмыс істеу принциптары мен графиктері алынды.

Үшінші бөлімде талшықты - оптикалық датчиктердің ерекшеліктері және қолданыстағы маңыздылығы көрсетілді. Диссертациялық жұмыс тапсырмасында қойылған барлық тапсырмалар толықтай орындалды.

Бұл диссертациялық жұмыс жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғары дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер ақпаратты өңдеп тарату технологиялардағы ғылыми бағытқа жауап береді.

Жұмыс бағасы

Жалпы, диссертациялық жұмыс “өте жақсы” (А-, 93%) деген бағаға, ал магистрант Мырзахан Әмина Болатханқызы 7M06201 – Телекоммуникация мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензент

PhD докторы,
ҚазТБУ оқу-әдістемелік
жұмыс жөніндегі проректоры

Жаһан Д.С. Жамангарин

«31» 05 2023 ж.



Подпись заверяю
Отдел управления
ll

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ
ШҚІРІ**

диссертациялық жұмыс

Мырзахан Әмина Болатханқызы

7M06201- Телекоммуникация

Тақырыбына: **Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын зерттеу және модельдеу**

Мырзахан Әмина диссертациялық жұмыста жалпылама түрде талшықты – оптикалық температуралық датчигін зерттеуге арнады. Бұл жұмыста талшықты – оптикалық температура датчигінің толық жұмыс принципімен және OptiSystem, Matlab бағдарламаларында қажетті зерттеулер жүргізіліп нәтижелері алынды.

Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде талшықты- оптикалық температура датчигінің параметрлік сипаттамалары және жұмыс принциптері теориялық тұрғыдан зерттелді.

Екінші бөлімде талшықты-оптикалық температура датчигінің OptiSystem, Matlab Simulink графикалық және математикалық модельдеу ортасында зерттелді. Датчиктің толық ішкі құрылымдары, жоғары температурада жұмыс істеу принциптары мен графиктері алынды.

Үшінші бөлімде талшықты - оптикалық датчиктердің ерекшеліктері және қолданыстағы маңыздылығы көрсетілді. Диссертациялық жұмыс тапсырмасында қойылған барлық тапсырмалар толықтай орындалды.

Магистрант Мырзахан Әмина диссертациялық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Диссертациялық жұмыс «93/А/өте жақсы» деп бағаланды, ал магистрант Мырзахан Әмина 7M06201-«Телекоммуникация» мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші
ЭТЖҒТ каф. PhD докторы,
қауымдастырылған профессор

Н.Қ.Смайлов

« 30 » 05 2023ж.



**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: Мырзахан Әмина

Тақырыбы: Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын зерттеу және модельдеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.1

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.6

Дәйексөз (35): 5.2

Әріптерді ауыстыру: 1

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 0

Ақ белгілер: 0

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:

6.06.2023
Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мырзахан Әмина

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын зерттеу және модельдеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 4.1

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 1

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

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:

6.06.2023

Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мырзахан Әмина

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Бір жиілікті оптикалық лазерлерді жасау технологиясын зерттеу және модельдеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 4.1

Коэффициент Подобия 2: 0.6

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 1

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

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:

6.06.2023

Дата

проверяющий эксперт