ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Бүркітбаев ат.Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Шакенова Жанарым Тураровна

«Брэгг торлары негізінде талшықты- оптикалық температура датчигін зерттеу»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5В071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Бүркітбаев ат. Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

қорғауға жіберілді

Кафедра меңгерушісі _____И.Сыргабаев «____» ____2020 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Брэгг торлары негізінде талшықты- оптикалық температура датчигін зерттеу»

5В071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Орындаған:	Ж.Т. Шакенова
Пікір беруші	Ғылыми жетекші
ф-м.ғ.к., доценті	PhD докторы
АЭжБУ	Сениорлектор
К.Х.Жунусов	<u> Н. Старов</u> Н.К. Смайлов
«_20_»052020 ж.	«_20_»052020 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

5В071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

БЕКІТЕМІН

<u>ЭТжҒТ кафедрамеңгерушісі техн.ғыл. канд</u> ____И. Сыргабаев «____»___2020ж.

Дипломдық жұмыс орындауға ТАПСЫРМА

Білім алушы Шакенова Жанарым Тураровна

Тақырыбы: Брэгг торлары негізінде талшықты- оптикалық температура датчигін зерттеу.

Университет ректорының <u>"27 "01 2020 ж. №362-б бұйрығымен бекітілген</u> Аяқталған жобаны тапсыру мерзімі "_22_"__05__2020ж.

Дипломдық жобаның бастапқы берілістері: <u>Оптикалық-талшықтың</u> температураға тәуелділігінің параметрлерін зерттеу арқылы температура датчиктерінің бірнеше түрлерін салыстырмалы түрде қарастырып сезімтал элемент ретінде торларды пайдалану және оңтайлы спектральді сипаттамаларын өңдеу және модельдеу.

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Датчиктердің сезімтал элемент ретінде пайдалануы. Брэгг торына негізделген талшықты- оптикалық температура датчиктерінің спектральді сипаттамасын қарастыру.

б) Талшықты- оптикалық температура датчиктері үшін температураны өлшеудің таңдаулы әдістерінің теориялық негізделуі.

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс) Сызбалық материалдар слайдпен көрсетілген

дипломдық жұмысты дайындау КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Fылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Талшықты- оптикалық температура датчиктерінің спектральді сипаттамасы	13.01.2020	Жоқ
Брэгг торларының негізгі параметрлерді өлшеу әдістері мен техникасы	10.02.2020	Жоқ
Техникалық есептеулер	10.02.2020	Жоқ

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған колтанбалары

Колтацоалары			
Бөлімдер атауы	Кеңесшілер	Қол	Қолы
	(аты, әкесінің аты, тегі,	қойылған	
	ғылыми дәрежесі, атағы)	күні	
Норма	ЭТжҒТ кафедрасының PhD	22.05.2020	- Co D
бақылау	докторы Смайлов Н. К.	22.03.2020 H. Curoleg	

Ғылыми жетекшісі _	(колы)	<u>P</u> g	Н. К. Смайлов
Тапсырманы орында	уға алған білім алушы	MJ	Ж. Т. Шакенова

Күні

"_22_" __05___ 2020ж.

АҢДАТПА

Температураны өлшеу энергетикалық объектілердің қауіпсіздігін қамтамасыз ету мен бақылаудың маңызды параметрлерінің бірі болып табылады. Жарық және оптикалық талшық қасиеттерінің арқасында талшықты-оптикалық термометрлер жоғары уақыт және кеңістіктік рұқсат етілген және өте жоғары дәлдікпен күшті электромагниттік бөгеуілдер жағдайында Температураны өлшеуге қабілетті. Қазіргі таңда температураны өлшеу саласында бірқатар эзірлемелер белгілі және мұндай жүйелерді жетілдіру өлшеу техникасындағы перспективалық бағыт болып табылады. Талшықты-оптикалық датчиктерге мынадай талаптар қойылады: - өлшеудің жоғары дәлдігі мен сенімділігі; конструкцияның қарапайымдылығы мен технологиялылығы; - салмақ және құрылғы формасы эргономикасы; - металл элементтердің болмауы; - сенсордың төмен инерциясы; - төмен құны. Жоғарыда аталғандардың ішіндегі ең басты талап-металл элементтердің болмауы.

АННОТАЦИЯ

Измерение температуры является одним из важных параметров обеспечения и контроля безопасности энергетических объектов. Благодаря свойствам светового и оптического волокна волоконно-оптические термометры способны измерять температуру в условиях сильных электромагнитных помех с высокой точностью и разрешением времени и пространства. В настоящее время известен ряд разработок 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 измерения; - простота и технологичность конструкции; - эргономика веса и формы устройства; - отсутствие металлических элементов; - низкая инерция сенсора; - низкая стоимость. Самое требование вышеперечисленных-отсутствие металлических ИЗ главное элементов.

ANNOTATION

Temperature measurement is one of the important parameters for ensuring and monitoring the safety of energy facilities. Due to the properties of light and optical fiber, fiber-optic thermometers are able to measure temperature in conditions of strong electromagnetic interference with high accuracy and resolution of time and space. Currently, a number of developments in the field of temperature measurement are known, and the improvement of such systems is a promising direction in measuring technology. Fiber-optic sensors have the following requirements: - high accuracy and reliability of measurement; - simplicity and manufacturability of the design; ergonomics of the weight and shape of the device; - absence of metal elements; - low inertia of the sensor; - low cost. The most important requirement of the above is the absence of metal elements.

МАЗМҰНЫ

Кірісп	le	9
1	БТ датчиктер туралы еңбектерге шолу	
1.1	Зерттеу жұмысының өзектілігі мен бағыттары 12	
1.2	ТБ торының толық сипаттамасы	
1.3	Брэгг торын құрастырып жасау үшін керекті материалдар мен	22
	технологияларды қарастыру	
2	ОТБ торына негізделген датчиктерді, торға жазу әдісінің	23
	технологияларын зерттеу	
2.1	Фазалық маска тәсілі негізінде талшыққа Брэгг торын жазу	23
2.2	Талшықтық Брэгг торын интерферометрлік тәсілмен және	25
	қадамдау тәсілі негізінде жазу	
2.3	Талшықты Брэгг торының жазылуының арнайы тәсілі	26
3	Құрастырылып жасалған ТБТ датчиктерінің спектрлі	28
	сипаттамаларының температуралық тәуелділік заңдылығын	
	анықтау үшін арналған тәжірибелік зертхана ұйымдастыру	
3.1	ТБ шағылыстыруындағы интерферометриялық датчик	28
3.2	Маха-Цендер мен Майкельсон интерферометрі негізіндегі	31
	датчиктер	
3.3	ТБ торы датчигінің спектрлі сипаттамаларының температуралық	34
	тәуелділігінің заңдылығын анықтау	
3.4	Математикалық моделді компьютерлік бағдарламалардада жасау	42
3.5	Брэгг торы датчигінің моделін құру	43
Қорыт	гынды	51
Пайда	аланылған әдебиеттер тізімі	52

КІРІСПЕ

Қазіргі уақытта талшықты-оптикалық байланыс желілерін қолдану кеңейіп келе жатқандықтан, сыртқы ортаның қысымына және қоршаған орта температурасына тәуелділікті анықтау - желінің жұмысын басқаратын қосалқы құрылғылар мен құрылғылардың маңызы артып келеді. Талшықтық Брэгг торы (ТБТ) бар температура датчиктері үлкен қашықтықта мұнай мен газ құбырларындағы температура мен қысымды өлшеу, негізгі талшықтыоптикалық байланыс желісі орналасқан ортадағы температураны анықтау үшін, күшті электромагниттік сәулеленуі бар орталарда қолданылады.

Талшықты-оптикалық сенсорларға қойылатын негізгі талаптар:

- өлшеу дәлдігі, дәлдік сенімділігі;

- жаңа технологияларға негізделген құрылғының қарапайымдылығы;
- масса мен пішіннің қарапайымдылығы және ыңғайлылығы;
- металл элементтерінің минималды мөлшері;

- өзіндік құнының төмен болуы.

Жоғарыда көрсетілген талаптардың ішіндегі ең маңыздысы металл элементтерінің жоқ болуы. Белсенді элементтер жок болғандықтан (транзисторлар, конденсаторлар, резисторлар, логикалық элементтер, индуктивті катушкалар) кез-келген өндіріс аймағында пассивті датчиктерді әуе кемелері мен кемелердің сыртқы және ішкі қабаттары арасындағы ылғалдылық пен қысымға қарамастан, адамдар қолы жетпейтін жерде орнатуға болады. Сондай-ақ, ол құбырдың әр нүктесіндегі қысым мен температураның өзгеруін анықтауға, құбырдың ұзындығына қарамастан кез-келген сұйықтықты орнатуға мүмкіндік береді.

Казіргі уақытта талшықты-оптикалық сенсорлар пассивті элементтер арасында кеңінен қолданылады. Көптеген талшықты-оптикалық сенсорлар жарық шашырау құбылысына негізделген. Мысалы, талшық бойымен Мандельштам-Бруллиэн мәжбүрлі шашырау талшығына негізделген сенсор оптикалық талшықтан жүздеген немесе мыңдаған шақырым қашықтықта орын алатын жағдайды анықтай алатынымен ерекше. Оптикалық талшықтың негізгі сызықтарындағы ақауларды МБМШ әсеріне негізделген шағылыстырғыштармен анықтайды. Бірақ, бұл сенсор осы ортаның температурасы мен қысымының өзгеруін ғана анықтайды. Брэгг торына негізделген сенсор ерекшелігі - температура немесе қысымның өзгеруі туралы нақты мәліметті нақты анықтауға мүмкіндік жасайды.

Брэгг торына негізделген сенсордың температураға тәуелділігі басқа физикалық құбылысқа негізделген температура сенсорларының тәуелділігіне қарағанда түзу сызықты болғандықтан, ТБТ көмегімен анықталған температураны анықтау дәлірек болады. Сол себепті жұмыстың негізгі мақсаты-ТБТ датчиктерінің температураға тәуелділігін анықтаудың жаңа әдісін ұсыну және осы сенсорлардың математикалық моделін құру. Әрбір сенсор әр түрлі температуралық диапазондарды және басқа сыртқы әсерлерді ескеретін етіп жасалынғандықтан, Брэгг торына негізделген барлық сенсорларға жарамды әмбебап үлгіні жасау мүмкін емес.

Бұл мәселені шешу көптеген ғылыми жұмыстардың нәтижесінде анықталды және қазіргі уақытта кеңінен қолданылады. Белгілі бір мақсатқа сай Брэгт торын модельдеу керек және оны құру кезінде тордың параметрлерін ескеру керек. Сол үшін ұсынылған модельді қолдана отырып, бұл мәселені шешудің ең жақсы әдісі қарастырылады. Сонымен қатар, біз ұсынған жаңа әдіс нәтижесінде кері шағылысқан жарықтың спектріне екінші және үшінші гармоникалардың әсерін едәуір төмендету процесі ғылыми жұмыс үшін тұрақты деп санаймыз. Мәселені шешу матрицалық әдіспен алынған температураға байланысты толқын ұзындығының ығысу функциясын шешу және ең объективті сызықтық қатынасты анықтау болып табылады.

ТБТ-дің кері шашырау спектрі жұқа болғандықтан, ол талшықтыоптикалық деректерді анықтауға арналған құрылғы ретінде талшықты лазерлерде қолданылады. Брэгг желілеріне негізделген талшықтық-оптикалық ақпараттарды пайдаланған кезде өлшенген шамалар (температура немесе сыртқы күштердің қысымы) анықтаушы факторлар ретінде Брэгг толқын ұзындығының (талшықпен берілетін жарық толқыны) ығысуына негізделген. Тіркеу жүйесі толқын ұзындығының кері Брэгг толқын ұзындығы жылжуын «электрлік сигналға» айналдырады. Бұл атаулар «электрлік сигнал» және «оптикалық сигнал» ұғымдарын ажырату үшін талшықты-оптикалық байланыс саласында жазылған барлық ғылыми еңбектерде кеңінен қолданылады. Шын мәнінде, табиғатта екі сигнал да тек жиілігі мен толқын ұзындығымен ерекшеленетін электромагниттік толқындар екенін атап өткен жөн. Бір талшықта бірнеше Брэгг торын жасауға болады, олардың әрқайсысы тек өзінің толқын ұзындығына жауап береді, сондықтан әртүрлі толқын ұзындығы бар тиісті тексеру сигналдарын көптеген мақсаттарда қолдануға болады. Бұл жағдайда біз бір нүктелі мәліметтер идентификаторының орнына толқын ұзындығына мультиплекстелген жазу жүйесін аламыз.

Жұмыстың мақсаты – Брэгг сенсорының моделін жасау, дизайн кезінде сенсордың негізгі сипаттамаларын зерттеу және оны тәжірибелік нәтижелермен салыстыру.

Мақсатқа жету үшін келесі негізгі мәселелерді шешу керек:

- температураны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің қазіргі жағдайын талдау;

- металл мен жартылай өткізгіш элементтерсіз температураны өлшеу үшін арналған талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымын талдау, оларды модельдеу;

- тиімді сыну көрсеткіші мен Брэгг торының периодының шамасына байланысты Брэгг торының технологиялық негізінде жұмыс істейтін сенсордың температураға тәуелділік заңын анықтау;

- осы заңдылықтарды анықтау үшін температуралық диапазонда сенсордың спектрлік сипаттамаларын бекіту үшін эксперименттік зертхананы ұйымдастыру;

- жұмыс нәтижесінде алынған теориялық және тәжірибелік нәтижелерге талдау жасау.

- Брэгг торы технологиясының негізінде талшықты-оптикалық сенсорлардың спектрлік және температуралық сипаттамаларын зерттеу. Себебі, барлық ғылыми-зерттеу еңбектерінде бұл мүлдем қарастырылмаған.

Жұмыс барысында Брэгг торының маңызды сипаттамалары қарастырылды, сонымен қатар, Брэгг торын сипаттайтын параметрлер жайында мәліметтер келтірілді. Брэгг торының конструкциялык ерекшеліктері анықталды, олардың өзгеруі (мысалы, аподизация коэффициенті) қажетті енгізу параметрлерінің диапазоны мен тұрақты мәндерін колдана отырып, математикалық үлгіні құру кезінде ескерілмеді. Брэгг торын құруға және модельдеуге байланысты жұмыстарға әдеби шолу жасалынды. Дамыған Брэгг торының сипаттамаларын, сондай-ақ нәтижелердің сипаттамасын анықтау үшін зертханалық жұмысты ұйымдастыру мәселелері қарастырылды. Шыққан нәтижелер негізінде Брэгг торының моделі жасалды - торлы модель математикалық модель негізінде жұптасқан режимдер теориясына негізделді, зертханалык нәтижелерге сай компьютерлік есептеулер жургізілді. Сызықтық параметрлік қатынастар анықталды.

1 БТ датчиктер туралы еңбектерге шолу

1.1 Зерттеу жұмысының өзектілігі мен бағыттары

Талшықтық Брэгг торы сипаттамаларын зерттеумен байланысты көп ғылыми еңбек бар. Жүзден астам ғылыми еңбектердің сараптамасы жасалды. Зерттелетін ғылыми жұмысты негізгі тақырыптар мен бағыттар бойынша бірнеше үлкен топтарға бөлуге болады:

- Брэгг торын құру кезіндегі мәселелерді шешу (әдістерін қарастыру);

- Брэгг торынан шыққан сигналдың сипаттамаларын зерттеу және теориялық модельдің нәтижелерін практика нәтижелерімен салыстыру арқылы Брэгг торын модельдеу;

- ТБТ қолдану аясын кеңейту мақсатында зерттеу жүргізу.

Зерттеудің негізгі міндеттерінің бірі шағылысқан жарықтың толқын ұзындығы мен өлшенген температураның арасындағы сызықтық функция түрін анықтау, әрбір жеке талшық үшін сызықтық функцияның эмпирикалық коэффициентін анықтау болып табылады. Бұл процесті іске асыру үшін ТБТ мәні кері есептеу арқылы өзгертіледі. Температуралық диапазонды алдын-ала

$$\lambda_{\min} \le \lambda_i \le \lambda_{\max} \tag{1.1}$$

$$T_{min} \le T_i \le T_{max} \tag{1.2}$$

анықтап, ультракүлгін сәулелер көмегімен бір модалық оптикалық-талшықтың өзегін күйдіру көмегімен сыну көрсеткіші модуляциясын алу тәсілі ашылғаннан соң, талшықты Брэгт торын алу көп талқыланатын мәселеге айналды. Брэгт талшықты-оптикалық торды дамытудың негізгі әдістері және қасиеттерін зерттеген ғылыми еңбектерде өріске ұшырамас бұрын талшық бетінің жанама үйкелісі арқылы тор құрудың қажетті әдістері қарастырылды. Содан кейін тор жіңішкерген аймақты қарқынды сәулелендірді. Бұл әдіс іштен тор жасау әдісі деп аталады. Осы әдіспен алынған тор кемшіліктері көп, өйткені кері шағылысудың коэффициенті 95% құрайды, ал сигнал жоғалуы жарты дБ дейін жетті. Бір ультра күлгін сәуле көзінен кем дегенде екі сәулелену жолын қайта қосып, интерференция құбылысын қалыптастыру үшін бір модалы оптикалықталшықтың көмегімен жарықтың толқын ұзындығына тең периодты Брэгт торын құруға болады. Бұл тордың ерекшелігі мынада: сыртқы орта әсерінен жарық толқынының ұзындығы талшық бойымен қозғалатын, артқа шағылысатын немесе тор арқылы өтетін жарық бөліктерінде өзгереді.

Бұл дипломдық жұмыста Брэгг торының сенсорының сипаттамасын зерттейміз, Брэгг торын модельдеп, оны тәжірибе нәтижелерімен салыстырамыз. Брэгг торының датчигін модельдеу кезінде нақты жағдайда оны жасаушылар мен пайдаланушылар арасындағы виртуалды байланыс құралы ретінде қолдануға болатын арнайы бағдарламалық өнімді әзірлеу қажет. Зерттелетін Брэгг торының қолдану жағдайларын ескеріп, температуралық диапазондар қолданылатын диапазонға сәйкес толқын ұзындығын дәл есептеу үшін Брэгг торының негізгі спектрлік сипаттамасының әдістерін бекіту керек.

G. Thursby., D.C. Betz., B. Culshaw зерттеулерінде [1] Брэгт торын бір мезетте сыртқы қысым мен ультрадыбыстың мульти сенсоры ретінде пайдалану ұсынылады. Зерттеудің нәтижелеріне сәйкес сыртқы механикалық әсерлерді қысым және ультрадыбыстың түріне сенсор түрінде қолдану кезінде сәуленің Брэгт торынан кері шағылысқан және өткен толқынның спектрлік сипаттамаларының қысым және ультрадыбыс параметрлеріне тәуелділіктің заңдылығы алынды (сурет 1.1).



1.1 Сурет – Қысым және температуралық тәуелділікті салыстыру графигі

Yan Xu, Xia Xiao зерттеулерінде температура және қысымды бір мезетте тіркеуге арналған датчик ретінде Брэгг торының математикалық моделін ұсынады [2]:

$$dP_{i} = \left(\frac{\partial P_{i}}{\partial T_{kl}}\right)_{E,\theta} dT_{kl} + \left(\frac{\partial P_{i}}{\partial E_{j}}\right)_{T,\theta} dE_{j} + \left(\frac{\partial P_{i}}{\partial \theta}\right)_{T,E} d\theta$$
(1.3)

$$P_i = p_{ijkl}^{\theta} T_{kl} + \varepsilon_0 \chi_{ij}^{T,\theta} E_j + p_i^T \Delta \theta$$
(1.4)

мұндағы $\chi_{ij}^{T,\theta}$ - кристалл тор поляризациясы, p_{ijkl}^{θ} - оптикалы майысқақтық эффекті коэффициенті, p_i^T - пироэлектрлі коэффициент.

К. Kesavan, A.K. Farvaze Ahmed, B. Arun Sundaram зерттеулерінде [3] құрылыс материалындағы (көпірлер мен ғимараттар, т.б.) микроқысымдар және үлкен қысым өзгерісін Брэгг торының сенсорымен өлшеу әдісі ұсынылған. Зерттеу жұмысының нәтижесінде төмендегі заңдылықтар анықталды (сурет 1.2).



1.2 Сурет – Микроқысымды нанометр және Брэгг торымен өлшеу нәтижелерін салыстыру

Микроқысымның нанометрмен өлшенген микросхемалар нәтижелері Брэгт торының параметрлерін өзгертіп және сәйкестікті арттыра отырып, эталон ретінде жағалау торының сенсорын калибрлеуге ұшырайды. Алынған сенсорды пайдалана отырып, микроқысымның температураға тәуелділігінің графигін алады (сурет 1.3).



1.3 Сурет– Брэгг торын қолданып микроқысым мен температура арасындағы байланысты анықтау

Васильев С.А., Королев И.Г., Медведков О.И., Курков А.С., Божков А.С., Дианов Е.М. ғылыми зерттеулерінде Брэгг торының негізінде жасалған

датчиктің негізгі қасиеттері және торларды жазу технологиясы туралы ғылыми еңбектерге шолу жасалды [4]. Зерттеудің нәтижелері талшықты Брэгт торының сыну көрсеткішінің модуляциясының түрлеріне, тордың жұмыс істеу принциптеріне, ұзақ мерзімді тордың қасиеттеріне, тор жазудың негізгі түрлеріне, тор жазу үшін сәулелену көздерінің түрлеріне және торды орташа – оптикалық талшықтың фотосезудтық қасиеттеріне, соның ішінде германосиликатты жарық өткізгіштердің қасиеттеріне қатысты деректерді қамтиды.

Қысымның температуралы градиентін зерттеу үшін арналған Micchael C. Keetnnedy B. ғылыми жұмысында [5] микроқысым мен температураны өлшеуге арналған Брэгг торы сенсоры математикалық моделін құрып, оның температуралық тәуелділік графигін анықтайды.

Соңғы уақытта Брэгг торын пайдалану кеңеюіне байланысты оны қолданудың жаңа тәсілдері мен технологиялары ұсынылды. Сонымен қатар, көптеген жұмыстар Брэгг торына негізделген бір талшықтан тұратын сенсорлар тобын жазу технологиясына негізделген датчиктерден деректерді бір нүктелі басқарудың модельдерін ұсынады.

Nzhuguma James, А.Дикевичтің ғылыми еңбектерінде мұнай және газ құбырларындағы температураның өзгеруін анықтау үшін Брэгг торының сенсорын қолдану моделін жасады [6, 7]. Байланысқан модалар әдісін математикалық модель ретінде қолдана отырып, олар қысым мен температураның келесі заңдылықтарға тәуелділігін көрсете алды:

$$\Delta \lambda_{B/S} = \lambda_B (1 - P_{eff}) \varepsilon_z \tag{1.5}$$

мұнда λ_B -Брэгг толқынның ұзындығы, ε_z – талшықтың бойымен бағытталған кернеу, P_{eff} - тиімді оптикалық қысым тұрақтысы. Тиімді оптикалық қысымның тұрақтысы төмендегідей болады:

$$P_{eff} = \frac{n_{eff}^2}{2} \left[P_{12} - v(P_{11} + P_{12}) \right]$$
(1.6)

мұнда P_{11} және P_{12} оптикалық-талшық қысымы тензоры мүшелері, n_{eff} – тиімді сыну көрсеткіші модуляциясы.

$$\Delta\lambda_{B/T} = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \tag{1.7}$$

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \tag{1.8}$$

$$\xi = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \tag{1.9}$$

В.Д. Борковтың зерттеуінде сыртқы электр өрісінің әсерінен Брэгг торында жарық сигналдарын түрлендіруге негізделген сенсорды математикалық модельдеуді қамтамасыз етті [8]. Бұл еңбегінде Джонс матрицасын қолдана отырып, модалардың өзара әрекеттесуі нәтижесінде кері шағылысу коэффициентіне қатысты келесі теңдеуді аламыз:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{m*z}{2}\right) - i\frac{\Delta\beta}{m}\sin\left(\frac{m*z}{2}\right) & -\frac{2*\theta}{m}\sin\left(\frac{m*z}{2}\right) \\ \frac{2*\theta}{m}\sin\left(\frac{m*z}{2}\right) & \cos\left(\frac{m*z}{2}\right) + i\frac{\Delta\beta}{m}\sin\left(\frac{m*z}{2}\right) \end{bmatrix}$$
(1.10)

мұнда өзіндік толқын арасындағы нормаланған фазалар айырмасы:

$$m = \sqrt{(\Delta\beta)^2 + (2*\theta)^2} \tag{1.11}$$

Қос сәулелі сынудың сызықтық параметрі:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} E_i \tag{1.12}$$

Садықов И.Р., Сатеев Т.С., Морозов О.Г ғылыми жұмысының [9] мақсаты Брэгг торында орналасқан датчиктерді пайдаланып рефрактометриялық әдіспен Брэгг торы орналасқан сұйық ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруін анықтау юолып есептелінеді. Ол үшін π - жартылай шеңберлі фазалық ығысуы бар ТБТ негізінде рефрактометриялық сенсордың физикалық және математикалық моделі ұсынылды. Фаза π -ығысуымен болатын ТБТ рефрактометриялық сенсорының теңдеулер жүйесі былайша көрсетілген:

$$\begin{cases} \lambda_{B1} = \lambda_{BT} \left(\alpha + \frac{1}{n_{\varphi \varphi \varphi}} \frac{\partial n_{\varphi \varphi \varphi T}}{\partial T} \right) T \\ \lambda_{B2} = \lambda_{BK} \left(\alpha + \frac{1}{n_{\varphi \varphi \varphi}} \frac{\partial n_{\varphi \varphi \varphi K}}{\partial T} \right) T + 2n_{\varphi \varphi \varphi K} \Lambda \end{cases}$$
(1.13)

мұнда $\lambda_B = 2n_{ij}\Lambda$ - Брэгт толқын ұзындығы, $\alpha = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$ - кварцтың жылулық созылу коэффициенті, $n_{ij}\Lambda_{j}$ және $n_{ij}\Lambda_{j}$ - таза және жазылған эффективті сыну көрсеткіштері модуляциясы, $\xi = \left(\frac{\partial n_{ij}\Lambda_{j}}{\partial T}\right)$ – термооптикалық коэффициент. n_{opta} - ортаның сыну көрсеткіші талшық өзегіндегі сыну көрсеткіші және Брэгт торы жазылған тұсының сыну көрсеткіші арқылы анықталады:

$$n_{\rm opta} = n_{\theta} \sqrt{1 - \frac{1 - n_{\theta}^2 n_{\Im \phi \phi \pi}^2}{\frac{u^2}{V^2}}}$$
(1.14)

Брэгт торына негізделген сенсорды зерттеу бойынша ғылыми жұмыстардың көп бөлігі Брэгг торының ерекшеліктеріне, оны құру кезінде өзгеретін негізгі параметрлер сипаттамаларына, қысым мен температураға тәуелділік заңдарына арналған. Ғылыми әдебиеттерді шолу нәтижесінде Брэгт торына негізделген сенсорлық модельдеу тақырыбында ғылыми жұмыстар өте аз. Брэгг торының математикалық моделі сыртқы әсерлердің түріне байланысты әр түрлі болғанымен, модельдің өзі әмбебап бола алмайды, яғни сенсорлық модель әр қолданба үшін жеке жасалуы керек екенін есте ұстаған жөн. Зерттеу нәтижелері мен әзірленген модельдің нәтижелерін салыстырғаннан соң, жұмыстың жаңалығы ретінде – тиімді сыну көрсеткішінің модуляциясының температуралық тәуелділігі және тор кезеңіндегі температураға тәуелділік графигі алынды. Мұндай есептеулерде ғылыми жұмыстардың жоқтығын ескере отырып, біз жұмыстың жаңалығын растай аламыз.

1.2 ТБ торының толық сипаттамасы

Брэгг торы жарық тасымалдайтын оптикалық-талшықтың өзекшесінде сыну көрсеткішінің периодтық өзгеруі нәтижесінде Брэгг-Вульф шарты орындалуы арқылы жарықтың шашырауы іске асатын жасанды тор. Ол дифракциялы тордың бір түрі болып есептелінеді.

А.М. Прохоров Брэгт-Вульф шартымен кристалдағы серпінді шашырауы әсерінен түскен сәуле дифракциясының интенсивтілігінің ең жоғарғы мәндерінің туындауы мүмкін бағыттарды анықтаған [10]. Егер шартты түрде кристалдарды бір-бірінен *d* қашықтық бойынша орналасқан атомдық жазықтықтар жиынтығы ретінде қарастырсақ (сурет 1.4), онда сәуле дифракциясын осы жазықтықтардан шағылысу ретінде қарастыра аламыз.



1.4 Сурет – Брэг-Вульф шарты

Бұл кезде интенсивтіліктердің ең жоғарғы мәндері (дифракциялық максимум) Брэгг-Вульф шарты орындалатындай болғанда ғана – түскен сәуле бағытына 2ϑ бұрыш жасайды, барлық атомдық жазықтықтарда шағылысу көмегімен және бір фазада бір-бірін күшейту көмегімен пайда болады. Көрші жазықтықтарда шағылған екі сәуленің арасында жол айырымы $2d \sin \vartheta$, толқын ұзындығы λ еселік мәніне тең болуы керек.

$$2d\sin\vartheta = m\lambda \tag{1.15}$$

мұндағы *т* - шағылысудың реті.

Әрбір талшықты-оптикалық желінің химиялық құрамы мен кристалдық торлары әртүрлі болғандықтан, осы талшықтан жасалған ТБТ сенсорының температураға тәуелділігі де әртүрлі болып келеді. Сондықтан шағылысқан сигнал спектрінің аподизациясын анықтау және ТБТ температурасына тәуелділігін растау маңызды болып табылады.

Брэгг торын құру міндеті қазір бірнеше әдістерді қамтуы мүмкін. Брэгг торы ультра күлгін лазермен фотосезімтал бір талшықты сәулелендіру арқылы жасалады. Интерференцияланатын сәуленің әсерінен талшықты ядродағы кристалдық тордың атомдарындағы жоғары энергиялы сәулеленудің сыну Бұл кезең апаттық сәуленің кедергі көрсеткіші қайтымсыз өзгереді. параметрлерін бақылау арқылы кеңістіктік (талшықтар бойымен) таралу кезеңімен анықталады. Нәтижесінде талшық бойында құрылымдық аймақ қалыптасады, онда уақыт өте келе сыну көрсеткіші өзгереді. Бұл аймақ Брэгг торы деп аталады. Тордың әр жолағы талшықтың бойымен таралған жарықтың аз мөлшерін кері шағылыстырады. Кері шағылысған жарықтың спектрін өзгерту арқылы осы ортаның температурасын анықтауға болады. Тор периоды ұзындығынан 2 есе үлкен толқын ұзындығындай болатын жарық кері шағылысады, содан кейін фазасы бойынша бір-бірін күшейтіп, талшықпен таралған жарықтың шамамен 1-5% жарықты кері шашырататын болады (сурет 1.5).



1.5 Сурет – Брэгг торынан өткен сәуле және кері шағылған сәуле мәндерінің сыртқы температураға тәуелділігі сенсор ретінде қолдануы

Жарықтың кері таралуы тек Брэгг шартын ғана қанағаттандырады, ал кері коэффициенттері мен кері шашырау шарты шашырау Брэгг торы қолданылуының соңына дейін тұрақты болып тұруы керек. Брэгг талшықты торын құрастырғанда осы шарттарды ескеру қажет. Тиісінше, тек осы толқын ұзындығының жарығы кері шағылысады, ал қалған жарық үшін талшықтағы тор мөлдір болып қалады. Сонымен қатар, кері шашырау шарттары және коэффициенттері сыртқы орта әсерінен өзгереді (қысым мен температура). Телекоммуникациялар саласында бұл өзгеріс теріс әсер етеді, сондықтан осы эсерлерден болған өзгерістер өтелуі керек және бұл әсер сыртқы ортаның әсерін пассивті талшықты-оптикалық детектор ретінде анықтауға мүмкіндік берді. Карапайым шағылыстырғыш торлардан басқа, ТБТ ұсақ түйіршікті сүзгілері, сонымен қатар келесі бағыттар ТБТ пайдаланудың негізгі бағыттары болып табылады:

- телекоммуникациялық жүйелерге арналған оптикалық жиіліктік мультиплексорлар;

- ауыспалы және тұрақты жіңішке жолақты сүзгілер;

- талшықты-оптикалық байланыс жүйелеріндегі дисперсиялық компенсатор;

- талшықты және жиілік-селективті тармақталудан түскен сәулені бақылауға арналған құрылғылар;

- сыртқы шағылыстырғыш ретінде Брэгг торы бар диодтар;

- Эрбийлі талшықты күшейткіш (EDFA):

Брэгг торына негізделген сенсордың басты ерекшелігі, ол мультиплексті пассивті талшықты-оптикалық деректерді анықтайды, температура функциясын зерттеп, өзара байланысты анықтайды:

$$\lambda = f(T) \tag{1.16}$$

Брэгг торы арқылы шағылған немесе өткен электромагнитті толқын импульсының ең жоғары мәніндегі толқынның ұзындығы - λ сыртқы орта температуралық әсеріне – T тәуелділігінің аналитикалық түрі мен нақты байланысы практика түрінде түзу сызықты болуы керек:

$$\lambda = k * T + b \tag{1.17}$$

мұндағы b және

$$k = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$$
(1.18)

коэффициенттер мәні толқын ұзындығының диапазоны мен температура өзгерісі диапазоны арасында коэффициенттің мәнін табу және сенсорды пайдалану барысында үнемі тұрақты шама болуы тиіс. Өз кезегінде бұл 2 шамалардың арасындағы байланысты анықтау үшін Брэгг сенсорын жасау кезіндегі негізгі параметрлерді өлшеу мен олардың температураға тәуелдігін білу қажет.

Othonos A. жұмысында сыну көрсеткішінің ауытқуы Брэгт жағдайында талшық бойымен таралатын жұқа спектрлік жарық диапазонының кері шағылуын көрсетеді [11].

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \cdot \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \Rightarrow \lambda = 2n_{eff}\Lambda \tag{1.19}$$

мұндағы λ - жарықтың вакуумдағы толқын ұзындығы, Λ - тор периоды және n_{eff} – жарықтың тиімді сыну көрсеткіші.

Оптикалық талшық өзегі арқылы таралатын жарықтың сыну коэффициенті әр торда көрінеді. Егер Брэгт шарты қанағаттандырылмаса, онда фаза бойынша тордың әр жағына жарық түспейді, нәтижесінде ол сөнеді. Брэгт жағдайын қанағаттандыратын толқындарға арналған Kashyap R. зерттеуінде сыну сызықтары тордың екі жағына қосылып, талшық бойымен қарама-қарсы бағытта таралады [12]. n_0 орташа сыну көрсеткіші болатын бір модалы талшықтың өзегінде қалыптасқан Брэгт торын қарастырамыз. Сыну көрсеткішінің модуляциясын (1.6-сурет) период талшық бойымен өзгеретін етіп жазуға болады:



1.6 Сурет – Талшықтың өзегіне жазылған сыну көрсеткіші модуляциясының Брэгг торын құрауы

Мұнда Λ - тор периоды, n₁ және n₂ - сыну көрсеткішінің минимум және максимум мәндері, L - тор ұзындығы, n₀ – тор екі шетіндегі талшық өзегінің сыну көрсеткіші, δn₋ δn₀ мен n₀ арақашықтығы, δn₀ - n₁ және n₂ орташа мәні.

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \tag{1.20}$$

 Δn - Брэгг торының сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы, z – талшық осі бойындағы арақашықтық, Λ - тор периоды. Байланысқан мода теориясы көмегімен Брэгг торынан кері шағылған спектр функциясын төмендегідей есептеуге болады:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + \sin^2 \cosh^2(sl)}$$
(1.21)

мұндағы Ω –байланыс коэффициенті, $R(\lambda, l) - l$ тор ұзындығы және λ толқын ұзындығының функциясы ретінде тор шағылуы, $\Delta k = k - \pi/\lambda -$ толқындық вектордың өзгерісі, мұнда $k = 2\pi n 0/\lambda -$ таралу тұрақтысы, $s2 = \Omega 2 - \Delta k2$. Сыну көрсеткішінің модуляция функциясымен байланыс коэффициенті:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta h \eta(V)}{\lambda} \tag{1.22}$$

мұндағы $\eta(V) \approx 1-1/V2$, $(V \ge 2,4)$ – талшық өзегінің мода интенсивтілігінің пайызын анықтайтын функция.

 $\Delta k = 0$, сондықтан (1.3) өрнек келесі түрге түрленеді:

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l) \tag{1.23}$$

ТБТ шағылысу коэффициенті жоғарылаған сайын, талшықты Брэгт торындағы модуляциялық сыну көрсеткіші жоғарылайды. (1.1) теңдеуінен көрініп тұрғандай, ТБТ резонансты толқын ұзындығы жарық өзегінің сыну көрсеткішіне және сыну көрсеткішінің модуляция периодына байланысты болады. ТБР негізгі параметрінің бірі Δn сыну көрсеткішінің модуляциясы болып табылады. Төмен формуланы әлсіз шағылған ТБТ сыну көрсеткішінің модуляциясының амплитудасын бағалау үшін қолдануға болады:

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi l} \tanh^{-1} \left(\sqrt{r_{\text{max}}} \right)$$
(1.24)

мұндағы r_{max} — Брэгг резонансты торынының орталық толқын ұзындығындағы шағылу коэффициенті. Мысалы, Брэгг резонансы 1550 нм, шағылу коэффициенті 10%, ұзындығы 15 мм тор ТБТ үшін Δn сыну көрсеткішінің модуляциясы (1.25) формула бойынша шамамен 1,077×10-5 тең болады.

Жартылай биіктікте ТБР спектр жолағы келесі түрде болады [11, с. 8]:

$$\Delta \lambda = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}$$
(1.25)

мұндағы N – тордың штрихтер саны. α параметрі бар, тек күштішағылдыратын тор үшін 1-ге тең (100% ТБР шағылдыруы), ал әлсізшағылдыратын тор үшін шамамен 0,5 болады.

1.3 Брэгг торын құрастырып жасау үшін керекті материалдар мен технологияларды қарастыру

Брэгг торын жасауға керекті материалдар мен технологиялар жайлы қысқаша мәліметтерді С.А. Варжелдьдің әдістемелік құралынан [13] көруге болады.

Германий-силикатты фоторефрактивтілікті құбылысы дегеніміз сәулеленудің әсерінен сыну көрсеткішінің өзгерісі. Васильев С.А., Королев И.Г., Медведков О.И., Курков А.С., Божков А.С., Дианов Е.М. ғылыми зерттеулерінде шыныдағы шағылу кезінде болатын үрддістерді сипаттау үшін «фото сезімталдық» мағынасын пайдаланады, сонда оның сыну көрсеткіші ғана өзгермейді, басқа материалдық қасиеттері өзгереді [14].

Yuen M.J. еңбектерінде германий-силикатты шыныда жұтылуында 185, 242, 325 нм орналасқан УҚ диапазон спектрінің 3 максимум мәні бар [15].

GeO₂ мен GeO химиялық жалғануы сай келетін Ge⁺⁴ мен Ge⁺² қышқылдануының 2 тұрақты жағдайы бар. 185 нм-ге жұтылудың ең жоғарғы мәні GeO₂ байланысты, 242 мен 325 нм жұтылу ең жоғарғы мәні GeO байланысты. Алайда, 242 нм жұтылу ең жоғарғы мәні синглет-синглетті ауысуға сай болады, бұл уақытта 325 нм жұтылу ең жоғарғы мәні триплет-синглетті ауысуға сай болады. Синглет-синглетті ауысу триплет-синглетпен салыстырғанда 3 ретке «рұқсат етілді». Осылай, 325 нм жұтылудың жолағы GeO триплет-синглет ауысымымен қоздырылады, ал 242 нм жұтылу жолағы GeO синглет-синглет ауысымымен қоздырылады деп айта аламыз.

Jackson J.M., Weeks R.A., Wells M.E., Kinser D.L., Kordas G. еңбектерінде 5 эВ жұтылу шамасы, суыту жылдамдығы, сығу температурасы, оттегінің парциалдық қысымы сияқты бірнеше шартқа тәуелді [16].

2 ОТБ торына негізделген датчиктерді, торға жазу әдісінің технологияларын зерттеу

Дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты талшықты Брэгг торын құрастырудың технологиялары мен тәсілдерін зерттеу, сонымен қатар құрастыру параметрлерінің заңдылықтарын қарастыру. Брэгг торы моделін құрғанда қажет болатын параметрдің спектрлік заңдылықтары және бір-бірімен байланысы қарастырылады. Becker M., Lindner E., Bruckner S. еңбектерінде Брэгг торын құрастыруға қатысты құрастыру процестері – жазу үшін қолданылатын лазердің түрі, жазу әдістері, толқын ұзындығы, сәулеленуге ұшырайтын оптикалық талшық түріне және қолданушыға керекті тор түрлері бойынша жіктеледі [17].

ТБТ қолданылатын лазер импульстік, үздіксіз, толқын ұзындығы жоғары-ИҚ (инфрақызыл) сәуледен ультракүлгін диапазонға дейін бола алады. Сәуле көздерінің соншалықты көп түрі болуы кеңістіктік және уақыттық когеренттілікті анықтап, ТБТ түрін жазу тәсілін таңдауға мүмкіндік тудырады. ТБТ жазу тәсілінің ішінде кезектесетін фазалы маска әдісі (ФМӘ) мен интерферометрлі әдісті (ИӘ) ерекше атап өте аламыз.

Hill K.O., Kawasaki B.S., Fujii Y. зерттеулерін қазіргі уақытта әлемнің көптеген зерттеу ұйымдары және құрастыру мекемелері [18, 19] кең пайдаланады. 1978 жылы Канада зерттеу институтында тұрақты сыну коэффициенті бар ТБТ негізгі құрамы SiO₂ болатын талшық өзегіне GeO₂ легирлеуші қоспа ретінде қолданып жасалды.

Талшықты өзекшедегі сыну көрсеткішінің модуляциясы толқын ұзындығы 488 нм аргон-ионды лазерден сәулені екіге ауыстырып қосу жолымен, содан кейін оны интерфренциялық құбылыстың толқынына жолықтырумен құрастырылды.

Бұл әдіспен алынған сыну көрсеткіші жарық жүретін жолда резонанстық кері шағылыстырушы ретінде Брэгттің шартына сай қандай жиілікте болса, сол жиілікте кері шағылыстыратын қасиеттері бар. [19, с. 17].

1984 жылы Meltz G., Glenn W.H., Morey W.W. [20] ультракүлгін сәулелерді интерференциялық суреттер көмегімен талшықты сәулелендіріп сыну көрсеткіші торларын алу мүмкіндігін жариялаған.

Осы уақыттан кейін талшықты Брэгг торын зерттеу жұмысы белсенді дамыды және қазіргі уақытта кері шағылу ені -0.01-10 нм, ал тиімділігі 0.1-99.9% болатын Брэгг торларын әзірлейтін тәсілдер кеңінен пайдалана бастады.

2.1 Фазалық маска тәсілі негізінде талшыққа Брэгг торын жазу

Бір импульстік эксимерлік лазермен фазалық маска тәсілін қолданып талшыққа Брэгг торын жазу тәсілі көп импульстік жазуға керекті дірілден сақтайтын діңгектерден қымбат болатын сұлбасыз жазуға мүмкіндік жасайды.

Фазалық маска тәсілімен ТБТ жазудың құрылымдық сұлбасы 2.1-суретте келтірілген.



2.1 Сурет – Брэгг торын ФМ әдісімен жазу

Цилиндрлі линза екі остің бірінен шыққан сәуленің көзін фокусқа жинап, қажетті энергиямен қамтамасыз етеді. Сәуле көзі фазалық маскадан өткеннен кейін +1 мен -1 мәндеріне дифракцияланады.

+1 мен -1 тәртібімен түскен интерференциялы сурет оптикалық талшық өзегіне сыну көрсеткіші кезектесіп өзгеретін тор жазады.

Варжель С.В., Асеев В.А., Куликов А.В. зерттеулерінде бұл тәсіл фазалық маска периоды тұрақты болғандықтан талшықтық Брэгг торынан кері шағылған толқын ұзындығын өзгертуге мүмкіндік жасамайды. Сонымен бірге, бұл тәсіл талшықты созу процесі кезінде де пайдалануға мүмкіндік бермейді. Себебі ол кезде қозғалатын жарық жолдың жанында оптикалы элементтердің болмауы тиіс [21].

Сонымен бірге, ультракүлгін сәулені пайдаланып торды жазар кезде талшықтың сыртқы қорғаныс бетін алып тастау керек. Бұл үрдіс талшықтың стандартты қорғаныс қабаты ультракүлгін сәулені өткізбейтін болғандықтан қажет. Бірақ қорғаныс қабатын алу үрдісі уақытты созады және оптикалық талшықтың беріктігін төмендетеді.

2.2 Талшықтық Брэгг торын интерферометрлік тәсілмен және қадамдау тәсілі негізінде жазу

Тальбот интерферометрінде Брэг торын жазу оптикалық талшықты жасау кезінде ұйымдастыра алады, себебі бұл тәсілде қозғалып бара жатқан талшық жанында оптикалық элемент болмайды (сурет 2.2).



2.2 Сурет – Коллоидтың интерференциялық тәсіл бойынша Брэгг торын жазу

Сұлбадан сәулелер арасындағы бұрышты өзгерте отырып, сәйкес толқын ұзындығын көрсететін Брэгг торының сыну кезеңін, сәйкесінше, шағылысу кезеңін таңдауға болатындығын көруге болады. Сондықтан бұл әдісті кез-келген жарық толқынын көрсететін Брэгг торларының кең спектрін жазу үшін қолдануға болады. Сонымен қатар, бұл әдіс фазалық маскадан нөлдік дифракция ретін толығымен алып тастауға мүмкіндік береді және бір нүктелік лазердің кедергісінде лазердің кеңістіктік когерентті таралуына байланысты интерференциялық үлгінің қосымша қасиетіне тәуелді емес.

Васильев С.А., Медведков О.И. жұмыстарында Лойд интерферометр арқылы жүзеге асатын ТБТ интерферометр сұлбасы 2.3 суретте көрсетілген [22].

Берілген сұлба кемшілігі оптикалы сәулеленудің кеңістіктік когеренттікке жоғары талап қоюында болып табылады, себебі жарық шоғырының әр түрлі нүктелерінен шыққан сәуле интерференцияланады.

Қазіргі таңда пайдаланатын жазылу әдісінің тағы біреуі - ол қадамдау. Lai Y., Sugden K., Zhou K. зерттеулеріндегі әдіс ерекшелігі фазалық маска қолдануды керек етпейді [23]. Бұл әдіс тордың әр штрихтарында профиль жасауға және бағытталған сыну көрсеткішінің амплитудалық таралуына мүмкіндік жасайды, сонымен бірге тордың ұзындығымен периодты өзгерте аламыз, яғни ФМ қолданбай ұзындық бойымен период арқылы чирп жасауға болады. Чирп деген – сыну көрсеткіші жиілігінің өзгерісі. Қадамдау тәсілі арқылы ТБТ жазылудың құрылымдық сұлбасы 2.3-суретте келтірілген.



2.3 Сурет – Қадамдау әдісі ТБТ жазылу тәсілінің сұлбасы

Сонымен қатар бұл әдіс бірқатар кемшіліктерге ие: оптикалық талшық бойынша фокусталған сәулеленуді дәлме-дәл механикалық келтіру қажеттілігі, тор сынуының көрсеткіші жеке импульстермен жазыла алмауы.

2.3 Талшықты Брэгг торының жазылуының арнайы тәсілі

Талшықтық Брэгт торының бір текті спектрлерінде орны тордың ұзындығы арқылы анықталатын максимумдар бақыланды [22, с. 26]. Fröhlich H.G., Kashyap R. Брэгт торы аподизациясы жанындағы максимумдарды басты, DWDM жүйелерде оптикалы арналардың жақын болуы рұқсат етіледі, олардың арасындағы қабаттасу бөгеуілдің неғұрлым азаюынан болады. Тор аподизациясы дегеніміз торда бақыланатын сыну коэффициенті модуляциясының амплитудасы өзгеруі [24] болып табылады. Сонымен бірге, талшықты Брэгт торы бақыланатын сыну кэффициенті Гаусс жанама қисығын қолдану негізгі резонанстан жанында ұзын толқын максимумын алып тастауға мүмкіндік жасайды.

Ероньян М.А., Кондратьев Ю.Н., Комаров А.В. зерттеулерінде қазіргі уақытқа сай талшықты Брэгг торының әдістері кез-келген параметрде дифракциялық құрылымдық ұзақ экспозицияда болуға мүмкіндік береді [26, 26]. Талшықтың фоторефрактілігін жоғарылату үшін GeO₂ концентрациясын анизатропты көрсеткішке байланысты 12, 16, 18 мол. % жоғарылатқан болатын. Оптикалық талшықты созу үшін диоксидты германий қоспасын (GeO₂) дайындау тәсілі уақыт бойынша өзгермейтін фотосезімталдық коэффициентін ұстап тұруға қарапайым және тиімді әдіс болып есептеледі.

Брэгт торлары жазбасына технология бойынша эллипстік азайтушы қабықша бар екі сәулелік сынушы ОТ пайдаланды [25, с. 29; 26, с. 30].

2.4 суретте бірінші типтегі КrF эксимерлік лазерінің фазалық маска тәсілдері арқылы жазылған жеке импульсінің Брэгт торының шағылу спектрі көрсетілді. Берілген тор эллипсті созылу қабаты бар қос сәулелі сынатын 18 мол. %. қоспасы бар GeO₂ оптикалы талшықты пайдалану арқылы жазылды. Шағылу коэффициенті шамамен 2% құрайды, шағылудың максимум 0,1 нм. Анизотропты талшықтың әрқайсысына белгіленген осьтер үшін сыну көрсеткішінің тиімділігі әртүрлі болғандықтан, толқын ұзындығы әртүрлі болады.



2.4 Сурет – І типтегі ТБТ шағылу спектрінің жеке импульспен жазылуы

КrF эксимерлік сәулемен қос сәулелі сыну оптикалы талшықтың экспозициялық ұзақтықта интерферометрлік әдіспен жазылған бірінші типте Брэгт шағылу спектрі келтірілген. Берілген тор эллипсті созылмалы қабаты бар қос сәулелі 12 мол. %. қоспасы бар GeO₂ оптикалы талшықты пайдалану арқылы жазылды. Экспозицияның уақыты 1 сағатты құрайды. Шағылу коэффициенті шамамен 42%, шағылудың ең жоғары кеңдігі 0,5 нм құрайды.

3 Құрастырылып жасалған ТБТ датчиктерінің спектрлі сипаттамаларының температуралық тәуелділік заңдылығын анықтау үшін арналған тәжірибелік зертхана ұйымдастыру

3.1 ТБ шағылыстыруындағы интерферометриялық датчик

ТБТ массивінің негізінде фазалық интерферометриялық датчиктің сезімтал элементі өзіндік құнның төмендеуіне әкелетін ОТ болып табылады. Деформация және акустикалық тербелістер әсер еткенде екі көршілес Брэгг тор арасындағы сигнал фазаларының айырмашылығы өзгереді. Интерферометриялық датчиктер сыртқы фактор әсерінен талшықтың ұзындығын өзгерткен кезде жоғары сезімталдыққа ие болады. Фабри-Перо интерферометрінің негізінде датчиктерді дайындау тәсілдері – өңделген кварцтан талшықтың ұшына айнаның жіңішке қабатын тұндыруға дейін бірнеше құрастырудан тұрады. Температураның екі датчигі төменде көрсетіледі. 3.1 а-суретте кергі жарық өткізгіште болады. 3.16суретте тек қашықтыққа әсер ететін кергінің сұлбасы көрсетілген.



3.1 Сурет – Интерферометр базасын өзгертуге арналған кеңейтуді пайдаланатын температура сенсоры

Фабри-Перо интерферометрі негізінде температура сенсоры көрсетілген. Сенсорлар интегралдық сұлба технологиясын қолдану арқылы жасалды. Әдетте, сенсордың өлшемі 0,5*0,5*0,2 мм құрайды.

Интерферометрлі сенсорларда сигналдың деңгейін есептегіш ретінде 1 фотодиод пайдаланады; алайда сенсордың тиімділігі шектеулі болып келеді. Мысалға төзімділігі жоғары юолып келетін Фабри-Перо интерферометрлік аспаптарда нақты есептеу жүйесі шу деңгейін азайтып, интерферометрдің жылжу циклдерінде режим сызықтылығымен қамтамасыз ететін көптеген фотодиод және дисперстік оптикалардан құралады (сурет 3.2).



3.2 Сурет – Температураны өлшеуге арналған Фабри-Перо сенсоры

Фотодиод жиынынан тұратын есептегіш 3.3-суретте көрсетілген. Сенсорлардан келетін сигнал оптикалық спектрді есептеуді қамтамасыздандыратын фотодиодтар матрицасына келіп түседі. 3.3б-суретте а нұсқасының қарапайым түрі көрсетілген, онда тек екі қабылдағыш қана бар, әрқайсысына оптикалық спектр жартысы түседі.



3.3 Сурет – Сенсордың есептегіш құрылғысы: а) детектор матрицасы;
 б)дихроилік сүзгі мен фотодиодтар жұбы

Сенсордың оптикалы қасиеттері және көздерін таңдағанда құрылғы сызықтық режимде есептеу жүргізеді.

Фабри-Перо бір модалы датчиктерінде лазерлік көздер пайдаланылады, интерферометр талшықтың өзінде орналасады. Лазерлік көздер әртүрлі және көп модалы интерферометриялық датчиктерде мүмкін емес конструктивті орындауларда өте ыңғайлы болады. 3.4 суретте бірмодалы талшықта орналқан интерферометр көрсетілген. Ол оптикалы талшықта жұқа шаң қабаты ретінде айналарда орналасады және френель шағылысуын қолданады. Rivas L.M., Janer C., Carballar A. зерттеулерінде ішкі талшықты интерферометрде температураны өлшеуге Хоккер сипаттаған эффектілер қолданады [27].



3.4 Сурет – Температураның талшықты сенсорының бір модалы интерферометрі

Фабри-Перо интерферометрі Мах-Цендер иетерферометрінен ерекшеленеді. Фабри-Перо интерферометрі үшін температураға байланысты интерферометрдің тиісті ұзындығы керек. Резонатордың ұзындығы лазердің когеренттік сәулеленуінің ұзындығынан асады. Фабри-Перо интерферометрлердің сенсорларында беріктігі жоғары, олардың сызықсыз болуы үшін арнайы есептеу әдістерін қолданады.

Майкельсон интерферометрінің негізінде температураның жоғары ток өлшеу жүйесінде бір не бірнеше фотоқабылдағыш құрылғыда интерференциялық сызықтар ығысуының әртүрлі сұлбалары қолданылады. Мұндай жүйеге (сурет 3.5) қозғалтқыштар қойыла алады.



3.5 Сурет – Фабри-Перо принципімен жұмыс істейтін талшықты-оптикалық өлшеу құрылғысы

3.2 Маха-Цендер мен Майкельсон интерферометрі негізіндегі датчиктер

Мұндай құрылғыларда интерферометр негізінде кіші ұзындықтағы когерентті лазерлік көздер ұсынылады.

Lonzaga J.B., Avanesyan S.M., Лазарев В.А., Карасик В.Е. зерттеулерінде кейбір кезде мұндай пайдалы өлшегішті механикалық кернеу және температура сияқты екі параметрді бір мезетте өлшеуге мүмкіндік жасайтын поляризациялы арнайы талшықтық жүйеге қосады [28, 29].

Интерферометр негізінде көп модалық талшықты-оптикалық өлшеуіштер ОТС салыстырғанда аз сезімталдыққа ие. Әдетте өнеркәсіптік жағдайларда жоғары сезімталдық қажет емес.

Мах-Цендер және Майкельсонның интерферометрлерінің негізіндегі сенсорлар электромагниттік кедергілерге әсер етпейтін оптикалық сигналдың қасиеттерінің арқасында сезімтал және өте дәл сенсор болып есептеледі.

Интерферометрде жүргізілген сигнал әр түрлі қашықтықтағы екі сигналға бөлінеді. Осыдан кейін сигналдар қосылады, бұл ретте сигналдардың салыстырмалық фазалық ығысуын былай есептейміз:

$$\varphi = n_1(kz - n_2kz_2) \tag{3.1}$$

Егер 2 жарық сигналы бір ортада таралса, онда

$$\varphi = n_1 k(z_1 - z_2) = nk\delta \tag{3.2}$$

$$d\phi = kd(nz) = k(ndz + zdn) = kn[\left(n\frac{dz}{z}\right) + dn]$$
(3.3)

мұнда *dz/z* шамасы - талшық деформациясы. *ndz* ұзындықтың өзгерісіне сай, ал *zdn* сыну көрсеткішінің өзгерісіне сай келеді.

(1.24) теңдеуден температураның сигналға әсер етуін төмендегі теңдеу арқылы шығаруға болады:

$$\frac{d\varphi}{dT} = k\left(n\frac{dz}{dT} + z\frac{dn}{dT}\right) = kz\left(\frac{n}{z}\frac{dz}{dT} + \frac{dn}{dT}\right)$$
(3.4)

Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. зерттеулерінде типтік кварцтық талшық $dz/(zdT)=5 \times 10^{-7} K^{-1} dn/dT=10^{-5} K^{-1}$ фазаның оптикалы ығысуында $d\varphi \sim 100$ рад⁻¹ K^{-1} сыну көрсеткішіне ие болады [30]. Удд Э. диаметрі нейлон қабатты кварцтық талшықта фазаның ығысуы оптикалық талшықта температура өзгеруінен болады [31].

Фазалық жылжулар бір-бірімен салыстырғанда интерферометр жолы ұзындығының өзгеруіне байланысты температуралық флуктуациямен байланысты сыну көрсеткіштерінің дәл өзгеруі болады. Өлшенетін параметрлер оптикалық сәуле шығару жолының ұзындығын өзгертетіндей болуы тиіс. Бұл фазалық жылжулар интерферометрдің кез келген түрі арқылы интерференциялық әдіспен өлшенеді. Сезімтал элемент кейбір төсемдерде оптикалық толқын өткізгіш ретінде орналасады. Оптикалықталшықтық сенсорлардың көпшілігі 3.7-суретте көрсетілгендей Мах-Цендер интерферометрін қолданады.

Майкельсон интерферометрі сұлбасы 3.6-суретте бейнеленген.



3.6 Сурет – Мах-Цендер интерферометрі

Интерферометриялық типті датчиктерді әзірлеушілер проблемасытемпературалық дрейфтің көмегімен оптикалық жолдардың айырмашылығы тұрақты және баяу өзгеретін шамаларды өлшеу үшін күрделі болып табылуы. дрейфтің артық. Мұндай уақытша көлемі 0,1-ден Осыған орай интерферометриялық датчиктер 10 Гц жиілікте өлшеуді жүргізу үшін жарамды. Екінші мәселе 2π периодымен қайталанатын толқын ұзындығын өлшеу. Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. еңбектерінде ОТС конструкциясын орнату және косымша сигналды өңдеу күрделі (сурет 3.7) [32].



3.7 Сурет – Майкельсон интерферометрі (дәстүрлі және талшықты-оптикалық форма)

3.6 суретте қарапайым жағдайда ФИС негізінде талшықтық-оптикалық өлшеу кешенінің әрекет ету принципі көрсетілген. Сенсордың әрбір БТ1 және БТ2 Брэгг торы 2 Брэгг толқынының бірдей ұзындығында импульстік лазерден келетін импульсті шағылыстырады. Сонымен қатар, торлар арасында орнатылған талшықта шағылысқан импульстер арасындағы уақыт өлшемі сенсордың сезімтал элементінде жарықтың екі есе таралу уақытына тең. Шағылысқан импульстер қарымталаушы интерферометрге (ҚИ) түседі, ол әрқайсысын екі еселейтін болады.

Сыртқы әсер нәтижесінде датчиктің сезімтал элементінің уақыт ішіндегі деформациясының өзгеруі интерферлейтін импульстің фаза айырымының өзгерісіне әкеледі. Соңғысы фотоқабылдағышпен (ФП) токтың шамасының өзгеруіне түрленеді.

Интерференциялы импульстердің арасында $\varphi_0 = \pi/2$ фазасының ығысуы фоторедакторлардың максималды жұмыс жасауын қамтамасыздандырады, ал интерферлеуші импульс қарқындылығының теңдестігі фотоқабылдағыш шығысындағы сигналдың максимал амплитудасын алуға мүмкіндік тудырады.

Бір талшықта массивтік датчикті жасау үшін уақытша және спектралды тығыздалу қолданылады.

Сыну көрсеткішінің модуляциясына және жүрекшенің тиімді сыну көрсеткіші Брэгг торының толқынды резонанстық ұзындығына байланысты. Өз кезегінде, бұл параметр сыртқы тербелістер мен температураның деформациясына байланысты.

3.3 ТБ торы датчигінің спектрлі сипаттамаларының температуралық тәуелділігінің заңдылығын анықтау

Брэгт торының температуралық сезімталдығы Брэгт торы периоды және эффективті сыну көрсеткіші арқылы анықталады [33]. Бұл сыртқы температура мен қысым әсеріне байланысты болады. Мұндай тәуелділік негізінде Брэгт торына негізделген датчикті зерттеу ұйымдастырылатын болады. Зерттеу құрылғысы толқын ұзындығының Брэгт торынан өткен температурадан және кері шағылысқан жарықтың тәуелділігін өлшеуге арналған. Тәжірибелі құрылғылар бойынша өлшеу кезінде толқынды жол арқылы өтетін және кері шағылған жарықтың спектралды сипаттамалары ғана тіркеледі. Температураның бір мәнінде алынған спектрлік сипаттамалардың бірнеше мың нүктелері тіркеледі және ол төменде суретте келтірілген графикалық заңдылық бойынша болады.



3.8 Сурет – Белгілі бір температура үшін тордан өткен жарықтың спектрлік сипаттамасы

3.8-суретте көрсетілгендей компьютерлік спектрлік сипаттамаларды өңдеу арқылы бұл функцияның шекті нүктесін бір температураның толқын ұзындығы ретінде жазуға болады. Бұл процесті температураның барлық нүктелері үшін қайталай отырып, біз толқын ұзындығы мен температура арасындағы сызықтық суретті анықтай аламыз (3.9-сурет).



3.9 Сурет – Тордан өткен жарықтың спектрлік сипаттамасындағы максимум нүктелерінің температураға тәуелділік графигі

Pioter Kisala, Wojcic W., Smailov N. зерттеулеріндегі мәліметтер және модельден алынған мәліметтердің арасындағы байланыс арқылы құралған модельдің датчик туралы қаншалықты нақты параметрлер беретіндігін анықтай аламыз [34].

Сонымен қатар, оптикалық талшық бойымен белгілі бір параметрлер алдын-ала қойылған Брэгг торының жазумен сенсордың температуралық тәуелділігінің заңдылықтарын анықтау үшін өлшеулерді өткіземіз. Өлшеуді жүргізу үшін қажетті құралдар: Брэгг торының датчигі, жарық көзі, талдағышосциллографтар, термометр, камера-зонд, қыздыру элементтері. Төмендегідей техникалық параметрлері бар кіріс сигналы түрінде қарапайым жарық көздері мен қорек көздері қолданылды:

Толқын ұзындығы 400 нм – 1800 нм, 1530.8 нм - 1567.6 нм; Қуатының деңгейі:

- 45дБм аз емес (толқын ұзындығы 830нм және 1310нм);

- 60 дБм аз емес (толқын ұзындығы 1550 нм);

- 60d дБм аз емес (толқын ұзындығы 400 нм және1100 нм);

- 70 дБм аз емес (толқын ұзындығы 700 нм және 1700 нм);

Шамдар: галогенді шам

Коршаған орта жағдайы: жұмыс температурасы бір камерада +18 және +140 °С, екіншіде +5 до +40 °С.

Салыстырмалы ылғалдылық 70% көп емес.

Зондтау температурасы автоматты реттелетін электр жылытқышымен қамтамасыз етіледі. Егер температура диапазоны едәуір диапазонды талап етпесе, камераны кәдімгі қатты қағаз немесе пластмасса қораптармен ұйымдастыруға және температураны ыстық ауа үрлегішпен қамтамасыз етуге

болады. Барлық жағдайларда температураның өзгеру параметрлері автономды температуралық датчиктермен өлшенеді және бекітіледі (сурет. 3.10).



3.10 Сурет – Зерттеу құрылғысының жалпы сұлбасы

Алайда, басқа сенсорлармен температуралық өзгерістерді автономды өлшеуге байланысты зерттеулердің объективтілігі дұрыс температуралық датчиктің деректерді қаншалықты дұрыс беретіндігіне тікелей байланысты. Сондықтан, бұл термометрді температуралық калибрлеу алдын ала тексеріледі Сонымен қатар, егер температуралық диапазон үлкен болмаса, өлшеу процестері Брэгт торы орналасқан толық жабық камераның герметикалығына байланысты және мұндай қателіктердің жылу энергиясының сыртқа ағуы сияқты өлшеу жұмыстарына кедергі келтірмеуін қамтамасыз етеді. Зондты пайдалану арқылы төменгі температуралы диапазондарда өлшеуді сұйық азотты қамтамасыз ету арқылы жүргізуге болады. Зондты пайдалану температураның 0С-ден 150С-ке дейін төмендеуінде және температураның 150С-тен 0С-ке дейін көтерілуінде өлшеуді жеке жүргізуге мүмкіндік жасайды.

Зертханалық жағдайда сенсордың негізгі қасиеттері зерттеледі және пайдаланушының талаптарына сай келмейді, онда математикалық модельдің көмегімен белгілі бір диапазон арасында жоғарыда аталған параметрлердің мәндерін өзгертетін жаңа сенсордың моделі жасалады. Математикалық модель ұсынған жаңа параметрлердің көмегімен сенсордың жаңа түрі жазылады. Егер бұл процесс екі-үш қадамнан кейін пайдаланушының талаптарына сәйкес келетін сенсор салынған болса, онда таңдалған математикалық модель дұрыс деп саналады (сурет 3.11, 3.12).



3.11 Сурет – Брэгг торы сенсорының параметрлерін өлшеу стенді



3.12 Сурет – Толық Брэгг торы сенсорының параметрлерін өлшеу стенді

Зерттеуге арналған зонд түріндегі камера жақсы жылу тасымалдау қабілетіне ие болуы үшін, ол металдан жасалады, Брэгг торы орналасқан кезде талшық еркін орналастырылған және қысым сияқты сыртқы әсердің болмауы қамтамасыз етілген. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық зонд ортасында құбырлардың орналасуын қамтамасыз ету үшін құбыр ішіндегі металл шариктермен толтырылған, нәтижесінде Брэгг торы зонд қабырғасына жанаспай еркін орналастырылады (3.13 сурет).



3.13 Сурет – Брэгг торы орналасқан зондтың көлденең қимасы



3.14 Сурет – Брэгт торы орналасқан зондтың салыстырмалы бейнесі



3.15 Сурет – Брэгг торының еркін камерасыз тұрғандағы талшықтармен байланысы

Практикалық жұмыста Брэгг торына негізделген сенсорлардың бірнеше түрлерінің спектралды сипаттамасы алынды. Спектрлік сипаттаманы алуға сәуле көзі ретінде бірнеше галогенді ақ жарықты шам пайдаланды, өйткені әрбір галогенді шамның сәулелену ауқымы әртүрлі. Әрбір сәулелену көзіне және өткізу терезесіне сәйкес келетін диапазондарға (850 нм, 1310 нм, 1550 нм) байланысты температуралық тәуелділік сипаттамалары алынды. Бірнеше ондаған өлшемдердің ең жақсы өлшем нәтижелерінің мәндері математикалық модель құру үшін сенсорды пайдалануға бағытталған.

Әр сенсор әр түрлі температуралық диапазондарда әр түрлі нәтижелер береді, сондай-ақ таңдалған талшықтың химиялық қасиеттеріне байланысты жарық диапазондарына байланысты, пайдаланушы үшін қажетті датчиктің қажетті температуралық диапазондарына сәйкес келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазонын таңдау күрделілігі шешілмеген. Әрбір датчик үшін жеке зертханалық өлшеулер және математикалық есептер қажет. Осылайша, әмбебап математикалық модель құру мүмкін болмаса, әрбір пайдаланушы үшін математикалық модель қажет.

Wojcic W., Смайлов Н.К., Жунусов К.Х., Утепбергенов И.Т., Оразымбетова А.К. жүргізген жұмыстардың нәтижесінде + 18[°] С-ден 135[°] С-ге дейінгі температуралық диапазонда әрбір қадамы 5[°] С болған өлшеудің спектрлік сипаттамасы үздік болғандықтан, осы нәтиже математикалық модель құруға пайдаланылды. Алынған нәтижелер негізінде 3.9-суретте көрсетілген кері шағылған жарықтың толқын ұзындығы температуралық тәуелділігінің графигі құрастырылды.

$$K_T = \frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{\Delta T} \tag{3.5}$$

Қисықтық бұрыш коэффиценті 0,01075нм/1⁰ С тең болады. Зерттеу беріктілігі: әр температуралық нүктедегі ақпараттың тұрақтылығы 14,2 сағ /К тең [35-36].

18 және 135-градус аралығындағы зерттеу жұмыстарының нәтижелері төмендегі суреттерде көрсетілген (сурет 3.16).



3.16 Сурет – 18 градуста температураның өзгеруі



3.17 Сурет – 30, 35,40,45 градустардағы температураның өзгеруі: қызыл түспен белгіленген - 30° , b- 35° , s- 40° , d- 45°



3.18 Сурет – 70, 75,80,85 градустардағы температураның өзгеруі: жасыл түспен белгіленген -70°, b-75°, s-80°, d-85°



3.19 Сурет – 35[°] бастап 135[°] дейінгі әрбір 10[°] аралығында алынған спектрлік сипаттамалардың температуралық тәуелділігі

$\lambda_{\mathrm{B}}[\mathrm{HM}]$	T [⁰ C]
1527,830	18
1528,022	30
1528,022	35
1528,117	40
1528,143	45
1528,242	50
1528,243	55
1528,300	60
1528,369	65
1528,420	70
1528,490	75
1528,527	80
1528,582	85
1528,608	90
1528,675	95
1528,733	100
1528,778	105
1528,820	110
1528,877	115
1528,955	120
1529,005	125
1529,093	130
1529,097	135

3.1 Кесте – Толқын ұзындығы мен температураның арасындағы байланыс



3.20 Сурет – Кестенің негізінде жасалған график

3.20-суреттегі график негізінде алынған температуралық диапазонға Брэгг торын датчик ретінде толық қолдануға болатындығын атау аламыз. Алынған нәтижелерді қолдана отырып, бұл дтчиктіг негізгі параметрлері тор ұзындығы – L, тор периоды – Λ , тиімді сыну көрсеткіші – n_{eff} , тиісінше тордағы период саны – $x = \frac{L}{\Lambda}$, сыну көрсеткіші модуляциясының орташа мәні – $\delta \overline{n}_{eff}$, тордың аподизация коэффициенті – α , сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы – n және басқа да шамалардың температураға тәуелділігін анықтауға арналған математикалық модель құрастырылады. Мукhailo М.К., Vitalii Y.I., Yosyp Y.R. жұмыстарында аталған параметрлердің екеуі негізгі параметр болып саналады, қалғанының температуралық әсері минималды деп есептеледі [37].

3.4 Математикалық моделді компьютерлік бағдарламалардада жасау

Брэгт торы сенсорының негізгі мақсаты – электромагниттік толқыннан шашыраған, сонымен қатар тордан өткен импульстың ең жоғары мәндері сыртқы температуралық әсерге сай өзінің мәндерін түзу сызықтық заңдылықпен өзгертуі керек:

$$\lambda_B = K_T * T + b \tag{3.6}$$

Утепбергенов И.Т., Смайлов Н.К., Оспанова Н.А зертханалық өлшеулерден алынған 3.9-суреттегі графиктің мәндерін қолданып, (3.1) теңдеудегі K_T және *b* мәндерін анықтау үшін минималды орташа квадраттық қателік тәсілін пайдалануға болады [38].

3.5 Брэгг торы датчигінің моделін құру

Толқын ұзындығы λ_B тордың тиімді сыну көрсеткіші және тордың периодына тәуелді өзгеріп отырады:

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda\tag{3.7}$$

Осы ғылыми жұмыста көрсетілген параметрлердің қандай да бір басқа параметрлерге тәуелділігі кеңінен талқыланды. Сонымен қатар, бұл модельдің негізгі мақсаты – Брэгг торының құрастырушылары мен датчигінің пайдаланушылары арасында байланыс орнату болып табылады. Сондықтан модельді құру үшін датчик әзірлеушілері арасындағы негізгі параметрлердің мәнін анықтау қажет:

- тиімді сыну көрсеткіші;
- тор периоды;
- тор ұзындығы;
- аподизация коэффициенті;
- тағы басқа кіріс параметрлері.

Бұдан басқа, модельді әзірлеу кезінде температуралық диапазонның қажетті мәндері болуы қажет (3.21 сурет).



3.21 Сурет – Брэгг торы сенсорының моделінде лямда мен температура байланысы

Брэгг сенсорының негізгі концепциясын құру үшін толқын ұзындығына байланысты екі параметрдің температурасының өзгеру заңдылықтарын тікелей анықтау мақсатында келесі дифференциалдық теңдеуді теңдеу ұсынылады:

$$\frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) + \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right)$$
(3.8)

Бұл жұмыстың негізгі мақсаты теңдеудің оң жағына екі мүшенің өзгеруінің дұрыстығын анықтау болып табылады:

$$n_{eff} = f(T) \tag{3.9}$$

$$\Lambda = f(T) \tag{3.10}$$

Функциялардың аналитикалық формасы алдыңғы ғылыми еңбектерде қарастырылмағандықтан, модельдеу жұмысы олардың арасындағы қатынастар келесі заңдылықтарға ие болуы мүмкін деген болжамның негізінде басталады:

$$n_{eff} = C_1 * T^{\alpha} \tag{3.11}$$

$$\Lambda = \mathcal{C}_2 * T^\beta \tag{3.12}$$

Бұл заңдылықтарды анықтау үшін торға түскен сәулелер мен кері шағылысқан сәулелердің өзара әрекеттесу заңдылықтарын ескеру керек.

Біз келесі мәндермен модель құрудың алғышарттарын қабылдаймыз:

$$\Lambda_{min} = 0.521$$
 мкм, $\Lambda_i = 0.1 * 10^{-4}$ мкм, $\Lambda_{max} = 0.547$ мкм
 $n_{eff_{min}} = 1.375, n_{eff_i} = 0.0005, n_{eff_{max}} = 1.475$
 $\lambda_0 = 1528$ нм, $L = 1$ см, $\overline{\delta n} = 0.0001$
 $\lambda_{min} = 1500$ нм, $\lambda_i = 0.01 *$ нм, $\lambda_{max} = 1550.5$ нм

(3.11) және (3.12) теңдеуінде C_1 , C_2 , α және β анықтау үшін

$$\ln(n_{eff}) = \ln(C_1) + \alpha * \ln(T)$$
(3.13)

$$\ln(\Lambda) = \ln(\mathcal{C}_2) + \beta * \ln(T) \tag{3.14}$$

Теңдеуді тағы түзу түріне келтіреміз:

$$Y = A + B * X$$

А және В шамаларын анықтау үшін ең аз квадраттар әдісін қолданамыз. Нәтижесінде ғылыми жұмыстың негізгі мақсаты болып табылатын тәуелділіктерді анықтай аламыз.

Егер тор бойымен электромагниттік толқындардың әсерінен сыну көрсеткішінің тор бойымен модуляциясы келесі формулалар арқылы анықталады деп болжасақ,

$$\left\{\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y, z) + \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right\} E(x, y, z) = 0$$
(3.15)

мұнда ∇_t^2 - Лапласиан операторы, онда сыну көрсеткішінің өзгерісі төмендегідей болады:

$$n^{2} = \bar{n}^{2}(x, y) + \overline{\delta n}_{eff} \left\{ 1 + \exp\left(-\alpha (z + \frac{L}{2})^{2}\right\} * \cos\left[\frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi(z)\right]$$
(3.16)

$$E(x, y, z) = R(z)E_1(x, y)\exp(-i\beta z) + S(z)E_2(x, y)\exp(i\beta z)$$
(3.17)



3.22 Сурет – Торға кірген, тордан шыққан, тордан кейінгі шағылысудан қайтқан және тордың өзінен тікелей шағылған стокс сәулелерінің өзара әсерлесуі

Waldemar Wojcik., Жунусов К.Х., Смайлов Н.К. зерттеулерінде 3.2 - суреттегі сұлбада көрсетілген бойынша торға енген интенсивтілік мәні – R(-L/2), тордан шыққан сәуле – R(+L/2), шағылысудан қайтқан сәуле – S(+L/2) және тордың өзінен шағылған стокс сәулесі – S(-L/2) өзара әсерлеседі. Бұл әсерлесудің нәтижесінде R(z) және шағылысқан S(z) сәулелерінің тор бойы z өсі бойымен өзгеруінің теңдеуін қарастырған ғылыми зерттеулерге [39] сүйеніп, байланысқан модалар әдісін ала аламыз:

$$\frac{dR(z)}{dz} = i\sigma(z)R(z) + ik(z)S(z)$$
(3.18)

$$\frac{dS(z)}{dz} = -i\sigma(z)S(z) - ik(z)R(z), \qquad (3.19)$$

мұндағы

$$R(z) = A(z) \exp[i(\delta z - \varphi/2)]$$
(3.20)

$$S(z) = B(z) \exp\left[-i(\delta z + \varphi/2)\right]$$
(3.21)

$$\sigma = 2\pi n_{eff} \left\{ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right\} + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n}_{eff} - \frac{\phi}{2}$$
(3.22)

с - сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеру коэффициенті,

k - кері шағылысу коэффициенті.

Кіріс пен шағылысқан сәулелердің максималды толқын ұзындығын анықтау үшін Брэгг тор датчигін модельдеудің бірнеше әдісі қолданылды. (3.3) теңдеуді шешу үшін [40] ғылыми жұмысында Рунге-Кутта әдістері қолданылды, [41] олар өздерінің ғылыми жұмыстарында матрицалық әдістерді қолданды.

Бұл әдістерді қолдану себебі: енгізу параметрлері мен дәлелдер арасында байланыс аналитикалық теңдеумен анықталмайды. Сол себепті, матрицалық әдісті және эксперименттік жұмыстың нәтижелерін пайдаланып, Matlab бағдарламасында Брэгг сенсорлық моделі жасалды:

$$A^{-}(z) = \frac{-ik \sinh[\gamma_{B}(z - L/2)]}{i\sigma \sinh(\gamma_{B}L) + \gamma_{B} \cosh(\gamma_{B}L)}$$
(3.23)

$$A^{+}(z) = \frac{\gamma_{B} \cosh[\gamma_{B}(z - L/2)] - i\sigma \sinh[\gamma_{B}(z - L/2)]}{i\sigma \sinh(\gamma_{B}L) + \gamma_{B} \cosh(\gamma_{B}L)}$$
(3.24)

мұнда

$$\gamma_{B} = \begin{cases} \sqrt{k^{2} - \sigma^{2}}, k^{2} > \sigma^{2} \text{ үшін,} \\ \sqrt{\sigma^{2} - k^{2}}, k^{2} < \sigma^{2} \text{ үшін.} \end{cases}$$
(3.25)

Тордың ішінде 2 бағытта шағылыстыру коэффициенті:

$$r(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\sigma^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh^2(\gamma_B L)}$$
(3.26)

$$t(\lambda) = \frac{\gamma_B^2}{\sigma^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh^2(\gamma_B L)}$$
(3.27)

Жоғарыда көрсетілген коэффициенттерді қолдана отырып, матрицаның элементтерін анықтауға болады. Бұл үшін тәжірибелік жұмыстардың нәтижелеріне сүйене отырып, сонымен қатар матрицалық әдісті қолдана отырып, Брэгг торының сенсорының кіріс параметрлерін қолдана отырып, нақты құрылғылармен тор арқылы өтетін кіріс және шығыс сигналдарының амплитудасын анықтауға болады. Нәтижелердің температураға тәуелділігі келесі матрицалық әдіспен көрсетілуі мүмкін:

$$\begin{bmatrix} R(-L) \\ S(-L) \end{bmatrix} = T^1 \begin{bmatrix} R(+L) \\ S(+L) \end{bmatrix}$$
(3.28)

Шектік жағдайда температураның мәнін өрнектейік:

$$\begin{bmatrix} 1\\ S(-L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12}\\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(+L)\\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.29)

Бұл формула бірнеше температура мәндері тордың оң жағынан келетін шағылысқан жарыққа қарамастан, торға түсетін кіріс сигналының мәніне сәйкес келетіндігін көрсетеді. Бұл есептеуді жеңілдету үшін кіріс сигналдың мәніне сәйкес бастапқы температураның мәніне кері пропорционалды болады:

$$R(+L) = \frac{1}{M_{11}} \tag{3.30}$$

Қалған мәндерді алғашқы мәнді нормалау көмегімен температуралық заңдылықты кері байланыстыру түрінде анықтаймыз:

$$S(-L) = \frac{M_{21}}{M_{11}} \tag{3.31}$$

Жалпы кіріс пен шығыс сигналдары температураның барлық мәніне сәйкес болу матрицасы мынадай түрге келеді:

$$\begin{bmatrix} R(-L) \\ S(-L) \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} R(+L) \\ S(+L) \end{bmatrix}$$
(3.32)

$$[M] = \prod_{j=1}^{N} [M^j]$$
(3.33)

Матрицаның нақты түрін төмендегі өрнекпен анықтаймыз:

$$M_{i} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{B}\Delta z) - i\frac{\sigma}{\gamma_{B}}\sinh(\gamma_{B}\Delta z) & -i\frac{k}{\gamma_{B}}\sinh(\gamma_{B}\Delta z) \\ i\frac{k}{\gamma_{B}}\sinh(\gamma_{B}\Delta z) & \cosh(\gamma_{B}\Delta z) + i\frac{\sigma}{\gamma_{B}}\sinh(\gamma_{B}\Delta z) \end{bmatrix}$$
(3.34)

(3.26)-(3.30) және (3.37) теңдеулері нәтижесі 3.23-суретте көрсетілген.



3.23 Сурет – Брэгг торының моделі

Кіріс параметрінің кейбіреуін тұрақты етіп, температураға сай келетін толқын ұзындығы өлшемін анықтаудың нәтижесінде Брэгг торы үлгісі құрылды. Тұрақты параметр қатарына: Λ – тордың периодты мәнін, n_{eff} – тиімді сыну көрсеткіші мәнін, тәжірибедегі әр температурадағы өзгеріс мәндерін кері есептеу арқылы алып, екі параметрдің температураға тәуелділік графигін аламыз (сурет 3.24).



3.24 Сурет – Брэгг торы моделінен алынған тиімді сыну көрсеткіші және температура арасындағы тәуелділік

Тиімді сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі графигінен олардың арасында байланыс теріс дәрежелі заңдылықта азаятынын көреміз (3.25 сурет).



3.25 Сурет – Брэгт торы моделінен алынған Брэгт торы периоды және температура арасындағы тәуелділік

Ал тор периоды және температура арасындағы байланыс экспоненциалды артатындығы байқалды (3.26 сурет).



$$\Lambda = b * T^{\beta} \tag{3.36}$$

3.26 Сурет – Брэгг толқын ұзындығы және температура арасындағы тәуелділік

Үшінші бөлімдегі негізгі тұжырымдамалар Scopus базасындағы «Jet Intl jurnal of electronics and telecommunications» халықаралық журналында [34], «Magyar Tudomanyos Journal (Budapest, Hungary). The journal is registered and published in Hungary» ғылыми журналында [41], «XXI ғасырда Ғылымның дамуы» атты Харьков қаласындағы конференцияда, Сәтбаев оқулары «Білім және ғылым тәжірибе» атты II халықаралық конференцияда баяндалып жарияланды [35-40].

қорытынды

Брэгг торына негізделген Дипломдық жұмыста температуралық датчиктерді зерттеу және үлгілеуді ұйымдастыруда Брэгг торын үлгілеудің маңыздылығы қарастырылды. Басқа оптоталшықты датчиктерден Брэгг торының ерекшеліктері мен артықшылықтары туралы мәліметтер келтірілген. Брэгг торының негізгі сипаттамалары, оны әзірлеу кезінде қолданылатын негізгі параметрлердің сипаттамалары зерттелді. Сонымен қатар, оптикалық талшыққа негізделген сенсорлардың физикалық және химиялық қасиеттеріне қатысты деректер қарастырылды. Лазерлердің Брэгг – фазалық бетперде торларын және интерферометриялық айналарды құру ерекшеліктері туралы деректер келтірілген.

Кіріспеде бекітілген негізгі жұмыстың мақсаты және қойылған міндеттерге қатысты барлық процестер орындалды. Атап айтқанда, тақырыпқа көтерілген мәселелерге тікелей қатысы бар ғылыми еңбектерге әдеби шолу жасалды, Брэгг торын пайдалана отырып, қоғамда түрлі құбылыстарды тіркеу үшін датчиктерді құру және пайдалану бойынша еңбектер анықталды. Атап айтқанда – бөлме жарықтығын анықтайтын, күштік электр кабельдерінің температуралық өзгерістерін тіркейтін Брэгг торларын пайдалана отырып, сұйықтықтың сынуын (сұйықтықтың мөлдірлігін) анықтайтын сенсорларды жасау бойынша ғылыми жұмыстарға шолу жүргізілді.

Брэгт торына негізделген сенсордың температуралық тәуелділігінің заңдылықтарын анықтау үшін зертханалық өлшеулер ұйымдастырылды, алынған нәтижелер бойынша математикалық модельдер таңдап алынды, компьютерлік есептер жүргізілді. Бұл модельдің негізгі функциясы тор әзірлеушілер мен пайдаланушылар арасындағы байланыстырушы түйін болып табылатындықтан, дәл математикалық есептеулер мен параматрлардың сәйкестігі бірінші орынға қойылды.

Жұмыстың негізгі мақсатына жету үшін Брэгг торы сенсорының моделін құру, модельді құру кезінде сенсордың негізгі сипаттамаларын зерттеу процестері орындалды. Жұмыс мақсатына сүйене отырып, бірнеше негізгі міндеттерді орындау қажеттілігі анықталды.:

- температураны өлшеу үшін талшықты-оптикалық датчиктердің қазіргі жағдайына талдау жүргізілді;

-металл және жартылай өткізгіш элементтері жоқ температураны өлшеу үшін талшықты-оптикалық датчиктер құрылымын талдау және моделдеу жүргізілді;

- жұмыс нәтижесінде алынған практикалық және теориялық нәтижелер талданды.

Алынған практикалық нәтижелерді пайдалана отырып, ұсынылған математикалық модельдің нәтижелері Matlab бағдарламалық платформасында есептелген және салыстырылған.

1 Thursby G.., Culshaw B.., Betz D.C. Multifunctional fibre optic sensors monitoring strain and ultrasoundg.1-Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, 204 George St, Glasgow G1 1XW, UK, 2daimlerchrysler AG, Vehicle Concepts, 71059 Sindelfingen (документ15) Thermodynamic Modeling and Analysis of an Optical Electric-Field Sensor. -Germany Received in final form, 2008, june - 4.

2 Xia Xiao, Yan Xu. Zexing Dong State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, 1037 Luoyu Road, Wuhan 430074. - China, 2015 //xuyan919@hust.edu.cn (Y.X.); dzexing@163.com (Z.D.).

3 Indian Academy of Sciences Performance assessment of indigenously developed FBG strain sensors under short-term and long-term loadings K Kesavan1,?, b arun sundaram1, A k farvaze ahmed1, s parivallal1, pbiswas2, S bandyopadhyay2, k ravisankar1 and umesh tiwari31CSIR-Structural Engineering Research Centre, Council of Scientific and IndustrialResearch, Chennai 600 113, India 2 Central Glass and Ceramic Research Institute, Council of Scientific and IndustrialResearch, Kolkata 700 032, India3Central Scientific Instruments Organization, Council of Scientific and IndustrialResearch // Chandigarh 160 030. K kesavan1,?, ((документ14) Sa.dhana. -2015. - Vol. 40, part 2. - P. 577-590 // kesavankannan@yahoo.comMS received 31 January 2012; revised 5 August 2014; accepted 6 November 2014)

4 Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. - 2005. - №12. - С. 35.

5 Michael C., Kennedy B.Sc. Strain and Strain Gradient Measurement Using Fibre Bragg Grating Sensors: doctor of Philosophy. - Dublin City University, 1999. -P. 1-14.

6 Дикевич А.А. Разработка и исследование волоконно-оптических датчиков влажности газов: автореф. ... канд.техн. наук: 05.27.06. - М., 2009. - С. 20-44.

7 Njuguma James. Modelling and Simulation of Fiber Bragg Grating Characterization for Oil and Gas Sensing Applications Solomon Udoh // Radhakrishna PrabhuInstitute for Innovation, Design and Sustainability Robert Gordon University Aberdeen // r.prabhu@rgu.ac.uk 2014 First International Conference on Systems Informatics. Modelling and Simulation.

8 Бурков В.Д. Математическое Моделирование Волоконно - Оптический Датчик Напряженности Электрического Поля / ред. проф. каф. Проектирования и технологии Пр-Ва Приборов Мгул, д-р техн. наук, А.М. Мамедов, ст. науч. сотр. Ирэ Ран, В.Т. Потапов, проф. Ирэ Ран, д-р тех. наук, Т.В. Потапов, ст. науч. сотр. Ирэ Ран, канд. физ.-мат. наук, М.Е. Удалов, доц. каф. проектирования и технологии пр-ва приборов МГУЛ, канд. техн. наук. - Мытищи, 2008. - 31с. 9 Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С., Степущенко О.А., Кокурина О.Е., Арбузова Е.Ю. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // Электронный журнал "Труды МАИ". - 2012. - №61 // www.mai.ru/science/trudy

10 Физика энциклопедиясы / ред. А.М. Прохоров. - М.: Советская энциклопедия, 1983. - 59 с.

11 Othonos A. Fiber Bragg gratings // Rev. Sci. Instrum. - 1997. - Vol. 68, № 12. - P. 4309-4341.

12 Kashyap R. Fiber Bragg Gratings. - San Diego: Academic Press, 1999. - 478 p.

13 Варжель С.В. Волоконные брэгтовские решетки: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015.

14 Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. - 2005. - Т. 35, № 12. - С. 1085-1103.

15 Yuen M.J. Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses // Appl. Opt. - 1982. - Vol. 21, №1. - P. 136-140.

16 Jackson J.M., Wells M.E., Kordas G., Kinser D.L., Weeks R.A., Magruder R.H.Preparation effects on the UV optical properties of GeO2 glasses // J. Appl. Phys. - 1985. - Vol. 58, №6. - P. 2308-2311.

17 Becker M., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Unger S., Kobelke J., Schuster K., Bartelt H. Fiber Bragg Grating Inscription with UV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference for Fiber Laser Applications // Proc. of SPIE. -Poland, 2010. - 775015-1.

18 Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Appl. Phys. Lett. - 1978. - Vol. 32, № 10. - P. 647-649.

19 Kawasaki B.S., Hill K.O., Johnson D.C., Fujii Y. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers // Opt. Lett. - 1978. - Vol. 3, №2. - P. 66-68; 2010. - Vol. 7750. - P. 775015-1.

20 Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Opt. Lett. - 1989. - Vol. 14, №15. - P. 823-825.

21 Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., Брунов В.С., Калько В.Г., Артеев В.А. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - Т. 75, № 5. - С. 27-30.

22 Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М.Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. - 2005. - Т. 35, № 12. - С. 1085-1103.

23 Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennon I. Point-by-point inscription of submicrometer period fiber Bragg gratings // OSA/CLEO/QELS. – 2008.

24 Frhlich H.G., Kashyap R. Two methods of apodisation of fibre-Bragg // Optics Communications. - 1998. - Vol. 157. - P. 273-281.

25 Пат. 2155359 РФ. Способ изготовления волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения / Ероньян М.А.; опубл. 2000.

26 Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н., Ромашова Е.И., Серков М.М., Хохлов А.В. Тонкие анизотропные одномодовые волоконные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. - 2000. - Т. 67, №10. - С. 104-105.

27 66 Rivas L.M., Carballar A., Janer C. Growth of Second-Order Fiber Gratings based on a New Photosensitivity Model // Proc. of SPIE. - 2005. - Vol. 5970. - P. 597009-1.

28 Lonzaga J.B., Avanesyan S.M., Langford S.C., Dickinson J.T. Color center formation in soda-lime glass with femtosecond laser pulses // J. Appl. Phys. - 2003. - Vol. 94, №7. - P. 4332-4340.

29 Карасик В.Е., Лазарев В.А., Неверова Н.А. Измерительное устройство контроля деформации и температуры на основе нано размерных волоконнооптических датчиков // Научно-технический вестник Санкт Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. - 2008. - №58. - С. 51-58.

30 Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля: учебное пособие - СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. - 83 с.

31 Удд Э. Волоконно-оптические датчики. - М.: Техносфера, 2008. - 520 с.

32 Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики: учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 79 с.

33. Жунусов К.Х., Касимов А.О., Смайлов Н.К. Исследование методов затухания волоконно - оптической линии связи "Рол и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана" Международных Сатпаевских Чтений. - Алматы, 2015. - Т. 4. - С. 174-177.

34 Pioter Kisala, Wojcic W., Smailov N., KalizhanovaA., Damian H. Elongation determination using finite element and boundary element metho // Dintl journal of electronics and telecommunications. - 2015. - Vol. 61, №4. - P. 389-394 // doi: 10.2478/eletel-2015-0051

35 Wojcic W., Жунусов К.Х., Смайлов Н.К. Қазіргі замандағы талшықтыоптикалық байланыс желілері мен брэг торының температураға тәуелділігін анықтау // "Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар: білім, ғылым, тәжірибе" атты II Халықаралық ғылыми-тәжірбиелік конференсияның еңбектері. - Алматы, 2015. - Т. 2. - Б. 306-309.

36 Утепбергенов И.Т., Оразымбетова А.К., Смайлов Н.К. Длительность импульса, вводимого под углом к оси, от температурного воздействия на МОВ // Вестник ПГУ. Энергетическая серия. - Павлодар, 1997. - №4. - С. 97-101.

37 Mykhailo M.K., Yosyp Y.R., Vitalii Y.I., Ivan I.M., Ihor P.S., Sandor K., Pawe? K., Zhailaubayev Y., Smailov N. Temperature behaviour of optical parameters in (AG3ASS3)0.3(AS2S3)0.7 // Thin films Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 20159816. - Optical Fibers and Their Applications, 2015. - P. 98160 // doi:10.1117/12.2229336.

38 Утепбергенов И.Т., Оспанова Н.А., Смайлов Н.К. Алгоритм пойска неисправностей на восп // Вестник ПГУ Энергетическая серия. - Павлодар, 1997. - №4. - С. 102-108.

39 Waldemar Wojcik., Жунисов К.Х., Смайлов Н.К., Жетписбаев К.У., Медетов Б.Ж. Моделирование волоконно-оптических сенсоров температуры на основе брэгговской решетки "Весенние научные чтения" // Международная мульти дисциплинарная конференция. - Киев, 2016. - С. 102-109.

40 Wojcic W., Kalizhanova A., Kashaganova G., Smailov N. Elongation determination using finite element and boundary element method // Совместный выпуск По материалам международной научной конференции Вычислительные технологии // Вестник КазНУ им. Аль-фараби Серия математика, механика и информатика. - Алматы, 2015. - Т. 20, №3(86), ч. 2. - С. 145-151.

41 Ibrayev A.T., Zhunussov K., Smailov N., Tleumuratova K.T. Study of temperature sensors based on bragg grating Magyar Tudomanyos Journal (Budapest, Hungary) The journal is registered and published in Hungary // The journal publishes scientific studies, reports and reports about achievements in different scientific fields. - $2017. - N_{2}4. - P. 62-67.$

БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

ТБТ – талшықты Брэгт торы;

МБМШ – Мандельштам-Бриллюэн мәжбүрлі шашырауы;

ФМӘ – фазалық маска әдісі;

ИӘ – интерферрометрлік әдіс;

ОТ – оптикалық талшық;

УК – ультра күлгін;

ДИК-дифференциалды интерферционды контраст;

m – шағылысу реті;

Т – тәуелділік функциясының аналитикалық түрі;

Λ – тордың периоды;

λ – жарықтың вакуумдағы толқын ұзындығы;

n_{eff} – жарықтың талшықтағы эффективті сыну көрсеткіші;

n₁ және n₂ – сыну көрсеткішінің минимум және максимум мәндері;

n₀ – тордың екі шетіндегі талшық өзегінің сыну көрсеткіші;

 $\delta n_0 - n_1$ және n_2 орта мәні;

 $\delta n - \delta n_0$ мен n_0 қашықтығы;

∆л − Брэгг торындағы сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы;

z – талшық осі бойындағы қашықтық;

 $R(\lambda, l) - l$ тор ұзындығы;

 Ω – байланыс коэффициенті;

 Δk – толқындық вектордың өзгеруі;

k – таралу тұрақтысы;

 $\eta(V)$ – талшық өзегінің негізгі мода интенсивтілігінің процентін анықтайтын функция;

N – тордағы штрихтар саны;

 $\chi_{ii}^{T,\theta}$ – кристалл тордың поляризациясы;

 $p_{ijkl}^{\vec{ heta}}$ – оптикалық майысқақтық эффектісінің коэффициенті;

 p_i^{T} – пироэлектрлік коэффициент;

 λ_B – Брэгг толқын ұзындығы;

 ε_z – талшық бойымен бағытталған кернеу;

P_{eff} – эффективті оптикалық қысым тұрақтысы;

*P*₁₁ және *P*₁₂ оптикалық талшық қысымы тензорының мүшелері;

 $n_{
m э \phi \phi \tau}$ — және $n_{
m э \phi \phi \pi}$ таза және жазылған эффективті сыну көрсеткіштері модуляциясы;

ҚИ – қарымталаушы интерферометр.