

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

Қолдыбай Ақерке Сағадатқызы

«Телекоммуникациялық желілерде талшықты-оптикалық Брэгг торын  
зерттеу»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

5B071900 – 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. Сырғабаев

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 ж.

### ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Телекоммуникациялық желілерде талшықты-оптикалық Брэгг торын зерттеу»

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

Пікір беруші

ф-м.ғ.к., доценті

АЭЖБУ

\_\_\_\_\_ К.Х.Жунусов

« 22 » \_\_\_\_ 05 \_\_\_\_ 2020 ж.

А.С. Қолдыбай

Ғылыми жетекші

PhD докторы

Сениор-лектор

\_\_\_\_\_ Н.К.Смайлов

« 22 » \_\_\_\_ 05 \_\_\_\_ 2020 ж.

Алматы 2020

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

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

**БЕКІТЕМІН**  
ЭТжҒТ кафедрa меңгерушісі  
\_\_\_\_\_ И. Сырғабаев  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Қолдыбай Ақерке Сағадатқызы

Тақырыбы: Телекоммуникациялық желілерде талшықты-оптикалық Брэгг торын зерттеу

Университет ректорының “27” 01 2020 ж. № 762-б бұйрығымен бекітілген  
Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі “22” \_\_ мамыр \_\_ 2020ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері: Оптикалық талшық құрылымының ерекшеліктері мен телекоммуникация саласында байланыс желілер мен жүйелердегі оптикалық талшықтарды құрастыру және пайдалануын зерттеу

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- a) *Fiber Bragg grating талшықты-оптикалық Брэгг торын зерттеу*
- b) *Қазақстанда талшықты-оптикалық магистральді байланысының параметрлерін есептеу*
- c) *Талшықты-оптикаға негізделген сенсорлардың түрлеріне тоқталу және толықын ұзындықтарына байланысты есептеулер жүргізу*
- d) *Талшықты-оптикалық температура датчиктері үшін температураны өлшеудің таңдаулы әдістерінің теориялық негізделуі.*

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс)

Сызбалық материалдар слайдпен көрсетілген

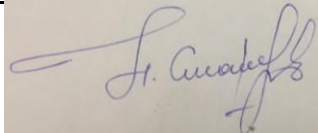
Ұсынылатын негізгі әдебиет

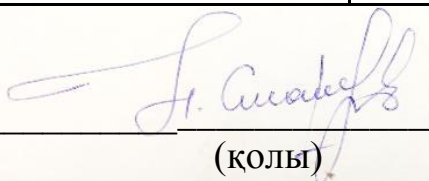
дипломдық жұмысты дайындау

## КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Телекоммуникациялық жүйелерде оптикалық талшықты әзірлеу және пайдалану	13.01.2020	Орындалды
Брэгг торының талшықты- оптикалық желілеріне негізделген дисперсиялық моделін әдістермен зерттеу	10.02.2020	Орындалды
Талшықты-оптикалық магистраль байланысының параметрлерін есептеу	10.03.2020	Орындалды

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен  
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған  
**қолтаңбалары**

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма бақылау	ЭТЖҒТ каф. PhD докторы Смайлов Н.К.	22.05.2020	

Ғылыми жетекшісі  \_\_\_\_\_ Смайлов Н.К.  
(қолы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  \_\_\_\_\_ Қолдыбай А.Қ.

Күні “\_22\_” \_\_\_\_\_ 05 \_\_\_\_\_ 2020ж.

## АҢДАТПА

Талшықты-оптикалық технологияларды әзірлеу және оларды өлшеу жүйелеріне енгізу басқа өлшеу жүйелерінің алдында бірқатар артықшылықтарды береді. Бұрын электрондық прототиптер белгілі болды. Талшықты - оптикалық температура датчиктері соңғы уақытта ғылым мен техниканың әр түрлі салаларында, атап айтқанда температураны анықтау нүктесі үлкен қашықтықта немесе температураны орнату қауіпті немесе күрделі міндет болып табылатын кезде үлкен практикалық қолдану тапты. Талшықты - оптикалық температура датчиктері электромагнит шашырау қауіпі бар ортадағы температура мен қысымды өлшеу үшін, мұнай және газ құбырларында, сондай-ақ негізгі талшықты желілердің өту нүктелерінде температураны анықтау үшін кеңінен қолданылады.

## АННОТАЦИЯ

Разработка волоконно-оптических технологий и их внедрение в измерительные системы дают ряд преимуществ перед другими измерительными системами. Ранее были известны электронные прототипы. В результате волоконно - оптические датчики температуры в последнее время нашли большое практическое применение в самых разнообразных областях науки и техники, в частности, когда точка определения температуры находится на большом расстоянии или когда установка температуры является опасной или сложной задачей. Волоконно-оптические датчики температуры широко применяются для измерения температуры и давления во взрывоопасных средах с интенсивным электромагнитным излучением, в нефтяных и газовых трубах, а также для определения температуры в точках прохождения основных волоконных сетей.

## ANNOTATION

Development of fiber-optic technologies and their implementation in measurement systems provide a number of advantages over other measurement systems. Previously, electronic prototypes were known. Recently, fiber-optic temperature sensors have found great practical applications in various fields of science and technology, in particular, when the point of determining the temperature at a long distance or setting the temperature is a dangerous or difficult task. Fiber-optic temperature sensors are widely used for measuring temperature and pressure in the electromagnetic environment, determining the temperature in oil and gas pipes, as well as at the points where the main fiber-optic lines pass.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Қазіргі заман техникасындағы температураның талшықты-оптикалық сенсорлары	11
1.1 БТна негізделген сенсорын (датчиктерін) тәжірибе жүзінде қолдану аймағы	11
1.2 Талшықты – оптикалық БТ сенсорларының (датчиктерінің) сипаттамаларына қойылатын жалпы стандарттар	13
1.3 Фабри-Перо интерферометрі негізіндегі сенсорлар	16
1.4 Мах-Цендер мен Майкельсон интерферометрлері негізіндегі сенсорлар	20
1.5 Дифракциялық сенсорлар	21
1.6 Көлемді дифракциялық БТ негізінде температураның талшықты-оптикалық сенсорлары	23
1.7 Жартылай өткізгіш сезімтал элементті температура сенсоры	25
2 Брэгг торларының негізгі параметрлерін есептеу техникасы мен әдістері	26
2.1 ТБТ-ның спектральды сипаттамасын есептеу әдістемесі	26
2.2 Брэгг толқын ұзындығын есептеу	27
2.3 ТБТ-ны дайындау әдістері	28
2.4 Талшықты Брэгг торларының жазбасын фазалық маска арқылы орнату	30
2.5 ТБТжазбасының тізбектілігі	32
2.6 Брэгг торларының математикалық сипатталуы	34
2.7 Температураның талшықты-оптикалық датчигі	36
3 БТ негізіндегі температура сенсоры, оларды жүзеге асыру, бағалау, спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы	39
3.1 Талшықты БТна негізделген датчигінің сипаттамасы	41
Қорытынды	50
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	



## КІРІСПЕ

Соңғы жылдарда технологиялардың күннен күнге даму қарқыны барынша биік қол жетімді болғандықтан байланыс саласы ол телекоммуникацияда саласында қолданыса түскен бұл талшықты-оптикалық БТн зерттеу тақырыбын зерттеу үшін алдымызға мынадай стандарттарды ұсынуға болады.

Қоғамның әлеуметтік-экономикалық және мәдени дамуы үшін қол жетімді инновациялық және ақпараттық-коммуникациялық инфрақұрылым мен ақпараттық ортаны құру.

Тиісінше, өзара байланысқан ақпараттық, компьютерлік және телекоммуникациялық технологиялар кешенінің сенімді және сапалы жұмысын қамтамасыз ету қажет. Телекоммуникацияның орта және алыс қашықтығына мәліметтерді жеткізудің заманауи негізгі ортасы оптикалық талшық болып табылады. Ақпараттарды таратудың өзіндік бірегей қасиеттерінің, бөгетке және қорғауға төзімділігінің, сондай-ақ салыстырмалы қолжетімді бағасының арқасында, ескіруге өте жақсы беріктігі мен төзімділігі сияқты қасиеттеріне байланысты, ол өмірдің көптеген салаларда қолданылады. Дегенмен, талшықты БТна негізделген оптикалық талшық арқылы тез және шығынсыз деректерді алмастыруда бірқатар қиындықтарға тап болады. Оларға жататындар: өшу, сіну, сызықты және бейсызықты шашырау және дисперсияға жататын талшықты өткізу жолағын ұлғайту мүмкіндігін шектеу.

Оптикалық талшықты қолдану мәселелерін қарастыру барысында осы ғылымға бір шама үлес қосқан ғалымдарды атап өткім келеді: және Мизрахи, Варжель С. В., Васильев С. А., Колдунов М. Ф., Войцех В., Ероньян М. А., Яворский М., Кнайп Х. және Маргулис В., Фокайн М., Пауль Ж және т.б.

Дегенмен, телекоммуникация жүйесінде пайдаланылатын БТна негізделген талшықты тордың жобалау ерекшеліктерімен тікелей байланысты, оларға сипаттамаларының ықтимал шегіне жетпегендігі және аяғына дейін шешілмегенді белгілі болып отыр.

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, талшықты Брэгг тор негізінде таратудың қозғалысы мен орта қасиеттерінің принциптерін ескере отырып, оптикалық сигналды басқару арқылы тарату мен коммутация мүмкіндіктерін жақсарту және арттыруға арналған осы жұмыстың тақырыбы өзекті болып табылады.

Дипломдық жұмыстың мақсаты - талшықты оптикалық Брэгг торларының жіберу тәртіптерін және құрылымдық қасиеттерін оңтайландыруды зерттеу негізінде опто талшықты коммуникациялық жүйелердің қолдану сипаттамаларын арттыру.

- дисперсия өтемін қамтамасыз ететін, тиісті тор параметрлерінің таңдауы негізінде Брэгг торларын үлгілеу әдісі ұсынылған;

- талшықты БТ негізінде дисперсия теңгермелерінің сипаттамаларына талшықты Брэгг торларының аподизация параметрлерінің әсері табылды;

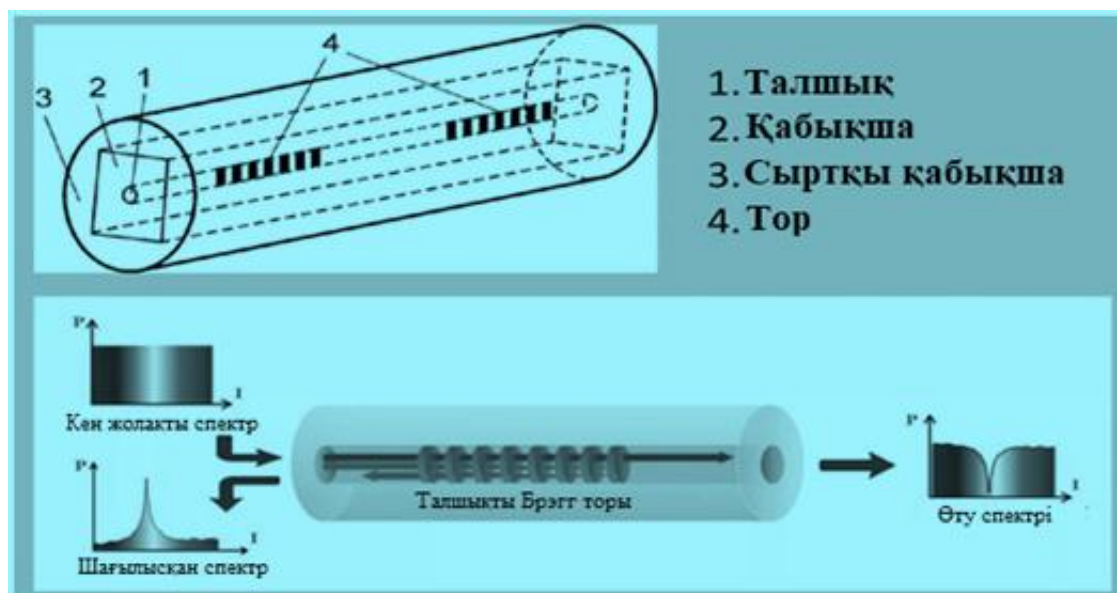
- олардың құрылымдық сипаттамаларын оңтайландыру негізінде талшықты Брэгг тор коммутациялық жылдамдығын арттыру әдісін жетілдіру мүмкіндігін көрсету.

# 1 Қазіргі техникасындағы талшықты-оптикалық температура тәуелді датчик

## 1.1 БТна негізделген датчиктер

Оптикалық талшықтарды әртүрлі ортаның химиялық және физикалық параметрлерін есептеуде қолдану 1970-жылдардың соңынан басталды. Сол уақыттан бері оптикалық толқын арнасын әртүрлі өнеркәсіп салаларында қолдана отырып, көптеген ғылыми зерттеулер мен өңдеу жұмыстары жасалды. Сол уақыттың өзінде өндірістік процестерді әртүрлі талшықты оптикалық құрылғылар көмегімен басқарудың тиімділігі қарастырылған болатын. АҚШ пен Еуропада көптеген өндірушілер (1980-жылдардың соңында) талшықты-оптикалық сенсорлардың (ТОС) әртүрлі үлгілерін көптеп шығара бастады [1].

ТОС-ты қолдану үлкен сезімталдықпен ерекшеленетіндіктен, кең оптикалық аймақты қамтитын жұмыс істеуге қабілетті, жаппай өндіру кезінде өзіндік құны төмен және әдеттегі электрлік датчиктермен салыстырғанда сенімділігі үлкен болуы арқылы ерекше мәнге ие болды. Алдымен мұндай ТОС - лар үлкен деңгейдегі электромагниттік бөгет немесе жарылыс қаупі туындаған кезде электрлік датчиктер дұрыс жұмыс істей алмағандықтан, коррозиялық заттардың үлкен температурасының әсерінен агрессивтік сыртқы ортада пайдаланылды. Температураның сенсорын тәжірибе жүзінде қолданудың таралу аймағы баяу балқитын әйнекті талшықтарға негізделген температура сенсоры кезінде металл сым темірлі жалғау ұзақ уақыт пайдаланғанда электр датчиктері өзінің дәлдік сипаттамасын жоғалтып жарамсыз болып қалатын, үлкен температураның әсеріне ұшырағанда, электронды тензосенсорлармен немесе сыйымды сенсорлармен салыстырғанда, артықшылығы бар. ТОС - ның екінші артықшылығы – бұл сигналдарды электронды өңдеудің блогы мен сенсорлары арасында үлкен ара қашықтықтарында оптикалық талшықтарды салуға мүмкіндік беретін оптикалық талшықта оптикалық сигналдардың бәсеңдеуі. Талшықты оптикалық кабельдер коаксиальды кабельдермен және ұзындығы мың метрден асатын линиялар салынған қос қабатты кабельдердің бағасымен сәйкес келеді. Оптикалық талшықтар диэлектрлік орта болатындықтан. Электромагниттік бөгеттердің (алғаш жанасу кезінде) әсеріне ұшырамайды және сәуле шығармайды. Оптикалық талшықты кабель экрандау мен арнайы жерсіндіруді қажет етпейді. Оптикалық сигналдарды модульдеу/қайта модульдеу үшін қажетті электронды модульдер үлкен деңгейдегі электромагниттік бөгеттердің ортасында арнайы сүзгілеуді қажет етпейді. Мұндай ТОС-тер мен температураны өлшегіштер ауқымды энергетикалық нысандар (трансформаторларда, гидро және электр станцияларында, атом реакторларында) температураны мониторингілеу жүйесінде пайдалануға ыңғайлы болады. 1.1 және 1.2 сұлба ларда қарастырылған.



Сурет 1.1 – Талшықты-оптикалық датчиктер (ТБТ)

Химиялық өнеркәсіптер мен жарылысқа қауіпті өрт-апаттық жүйелерде электрлік кабельдерге қарағанда талшықты-оптикалық сенсорда, олардың орналасуына байланысты қатаң стандарттар жоқ. Жарылысқа қауіпті аймақтардағы барлық электрлік сенсорлар үшін мүмкін болатын жалындау көздерінен сақтану мақсатында, қорғаныстық жерсіндіру талап етіледі. ОТС-тер үшін құрамдас бөліктердің құны өткізудің телекоммуникациялық және оптоэлектронды бағасымен алынады. Талшықты-оптикалық сенсорда электр тогын өткізбейтін толық диэлектрлік материалдар пайдаланылуы мүмкін.

Бұл энергетикада: Фуко тогының әсерінен металл элементтер қызады, сонымен қатар үлкенкернеу аймағында токтың жүру жолдары болмайтын ОТС-ты таңдауға көрінеді.

Геометриялық өлшемдер температура сенсорын таңдау кезінде, мәселен аэрокосмостық аймақта қолдануда маңызды критерий болып табылады. ОТС ауқымды көрсеткішінің арқасында артықшылықтарға ие болады. Әдеттегі электрлік сенсорларды қоршаған ортаның әсері мен олардың құнын, көлемі мен салмағын арттыра түсетін бөгеттерден қорғайтын ауыр экрандаушы қабықшаға орналастыруға тура келеді. Қоршаған ортаның әсеріне тұрақтылық талшықты-оптикалық сенсорды үлкен температура жағдайында пайдаланған кездегі анықтаушы фактор болады, ал қатты денелі құрылым оларға тербеліс және соққы салмағына шыдауға мүмкіндік береді. ОТС-тың жоғарыда қарастырылған ерекшеліктеріне үлкен сезімталдықты, сигналдың кең жұмыс ауқымдылығы мен шудың үлкен қатынасын қосуға болады.

Мониторинг жүйесіндегі температура ОТС-ын қолданудың айтарлықтай ерекшелігі оптикалық талшықтың бір ғана линиясын мәліметтерді сигналды өңдеу бөлігіне дейін негізгі жіберу шинасы ретінде пайдалануға мүмкіндік беретін, сигналдар модуляциясының кең көлемінің арқасында сенсорлардың оптикалық сигналын мультиплекстеу мүмкіндігі болады.

## 1.2 БТ датчигінің сипаттамаларына қойылатын жалпы стандарттар ТОД

Соңғы жылдардағы өндіріс деңгейі: сыртқы ортаның әсерінен қорғайтын және дәлдік сипаттама ретінде өндірісте температураны есептеуде температура ТОД датчигіне үлкен стандарттар қойылады.

ТОД стандартты (ЭД) электронды датчиктерді салыстыратын болсақ, онда ЭД-да монтаждау кезінде кемшіліктер кездеседі. ЭД-ны орнату мынадай материалдардан жасалған болса, онда ұзақ уақыт пайдаланғанда оларды қайта-қайта калибрлеу керек болады. Қазірде интеллектуалды оптикалық датчиктердің эталондарды тексермей, нақты уақытта процестерді тоқтаусыз басқаратын өзі калибрлеуші ТОД жасауға мүмкіндік беретін метрологиялық өзін-өзі басқару бақылау функциясы бар.

Соңғы 10 жылда қазіргі әскери және төтенше жағдай кезінде, ғимараттарды салу барысында, энергетикада және гидротехникада кемелерді құрастыру барысында, атомдық, мұнай-газ авиағарыш салаларында экстремальды жағдайлар туындағанда оптикалық датчиктер мен жүйелерді қолданудың көптеген нұсқалары жүзеге асырылады.

Экстремальды жағдай ЭС мен ТОД - ты есептеу дәлдік сипаттамалары және диапозондарын салыстыру таблицасы 1-кестеде қарастырылған.

Кесте 1.1 – ЭД және ТОД анализ

Параметр	Сезімталдық шегі		Есептеу диапазоны	
	ЭС	ОТС	ЭС	ОТС
Деформация, м	10-4	10-14	±5000	±15000
Қысым, Па	7-10-4	10-6	2-108	6-108
Температура, °С	10-4	10-8	1800	2300
Электр тогы, А	10-14	10-15	104	2x105
Электрлік кернеу, В	10-9	10-12	105	8x105

ТОД - ты қатаң түрде қолдану, мысалы ұңғымаларда немесе энергетика қондырғыларда кернеу мен өрістер, үлкенвольтты токтар мен разрядтар, иондаушы сәулелену сияқты ТОД - тің әдеттегі жұмыс жағдайына жатады [8,9].

Температураның ТОД пен ЭД сияқты стандарты қойылған, сәйкес стандарттармен келесі нормативтік және техникалық құжатта қарастырылған:

- МЕСТ 8.558-2009 «ГСИ. Температураны есептеуге арналған мемлекеттік сынау сұлба сы»;

- МЕСТ Р 52931-2008 «технологиялық үдерістерді бақылау және реттеу құралдары. Жалпы техникалық стандарттар».

ТОД үшін оптикалық есептеулерге қатысты жасалған нормативтік және техникалық құжаттар бар және осындай өлшегіш аспаптарды аттестациялау үшін оптикалық-талшықты жүйелердегі байланыстар мен ақпараттар алмасу

үшін толқын ұзындығы мен әлсіреген, қуаттылығы орташа өткізгіште сигналдың таралу уақытын есептеу құралы ретінде мемлекеттік сынау схемасы қолданылады (МЕСТ 8.585-2005).

Температураны өлшегіштердің сипаттамасына қойылатын жалпы стандарттар ресейлік (МЕСТ Р) мен мемлекет аралық стандарттар (МЕСТ)-пен көрсетіледі және олардың әрекет ету мерзімі болмайды. Сенсорлар мен температураны өлшегіштерде таралған келесі ресейлік және мемлекет аралық сынау стандарттары қабылданған:

- Реперлі нүктелердің ампуласы мен кедергілер термометрі ХТШ-90;
- Термоэлектрлік термометрлер (термобулану);
- Жылу аспаптары мен температуралық лампалар, пирометр стандарттары;
- Манометрлік және биметалдық термометрлер;

ОТ датчиктер үшін техникалық стандарттар өндіріс деңгейіне байланысты. Өндіріс қуаты артқан сайын үлкен сенімділік және дәлдікке ие болатын өлшегіш жүйелерге деген сұраныс артып келеді. Аса ірі өндірістік-энергетикалық жүйелер әртүрлі агрессивті ортаның әсерінен қорғайтын, өлшегіш жүйелердің бөгеттен қорғалған болуын талап етеді. Өндірісте өлшегіш жүйелерді орнату мен таңдауғы шешуші ролде ОТД-тың баға/сапаның тиімді қатынасы ескеріледі. Бұл қымбат емес, әрі жүйенің әрекеті принципі бойынша тиімді [10].

Барлық температураның ТОС -ы екі түрге бөлінеді. Бірінші түрі – температура ОТС-ы сигналдың шығыс көзінен қабылдаушыға баруы температураның өзгерісі әсерінен түрленетін сыртқы сезімтал элементті (СЭ) оптикалық талшықты көрсетеді. Бұл ретте оптикалық талшық ақпарат көздері мен қабылдаушы арасында деректер алмасуға арналған оптикалық канал, яғни өткізгіш функциясын атқарады.

Екінші түрі – оптикалық талшықтың өзі СЭ болып табылады, температура сигналға әсер ететін оптикалық талшыққа көрінеді.

Сыртқы СЭ-мен ОТС алдында оптикалық талшықты СЭ ретінде қолданатын ОТС-тың артықшылығы:

- ОТС конструкциясының көп мөлшердегі әртүрлі геометриялық нұсқалары,

- Кең спектрлі диапазон,
- Үлкен сезімталдық,
- Төмен инерциялық.

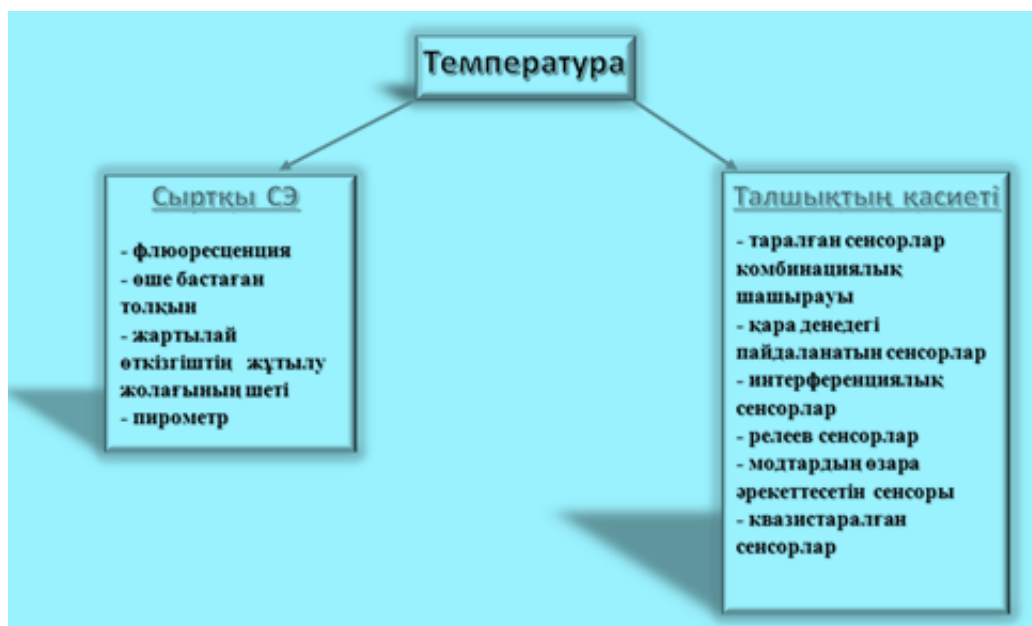
Сыртқы СЭ-мен ОТС алдында оптикалық талшықты СЭ ретінде қолданатын ОТС-тың кемшіліктері:

- Сигналды табу мен өңдеудің күрделі процесі талап етіледі;
- Оптикалық элементтердің тұрақтылығы мен дәлдігіне қойылатын стандарттарды күшейту;
- Берілген сипаттамалармен тұрақты жарық көздері қажет;
- Қоршаған ортаның параметрлеріне деген сезімталдықты арттыру оптикалық талшықта сигналдың селективтілігін төмендетеді және тұрақты немесе баяу өзгертін шамаларды есептеуде қиындықтар туындайды.

ОТС-те пайдаланылатын оптикалық-физикалық құбылыстар:

- Сәулелену интенсивтілігі мен фазалық жылжудың әлсіреуі,
- Поляризациялау жазықтығының айналуы,
- Шашырау.

1.2-суретте температура ОТС-ның әртүрлі типтері қарастырылған. Сыртқы сезімтал элементті ОТС-те температураны есептеу талшықтан тыс аймақта жүзеге асырылады [1,3].



Сурет 1.2 – Температураның ТОС -ын жіктелуі

Оптикалық талшықты сезімтал элемент ретінде - 1.3-суретте қарастырылған интерферометрлік сенсор қолданылады. Үлкендәлдікті қамтамасыз ететін сенсорлардың көбі осы ішкі класқа жатады. 1.2-1.3-суретте қарастырылған сенсорлар таралған құрастыру аймағына сәйкес категориялар бойынша топтастырылған.



Сурет 1.3 – Температураның интерферометрлік оптикалық-талшықты датчиктер

Оптикалық талшықты өлшегіш жүйелерде қолдану аймағын үш топқа бөлуге болады:

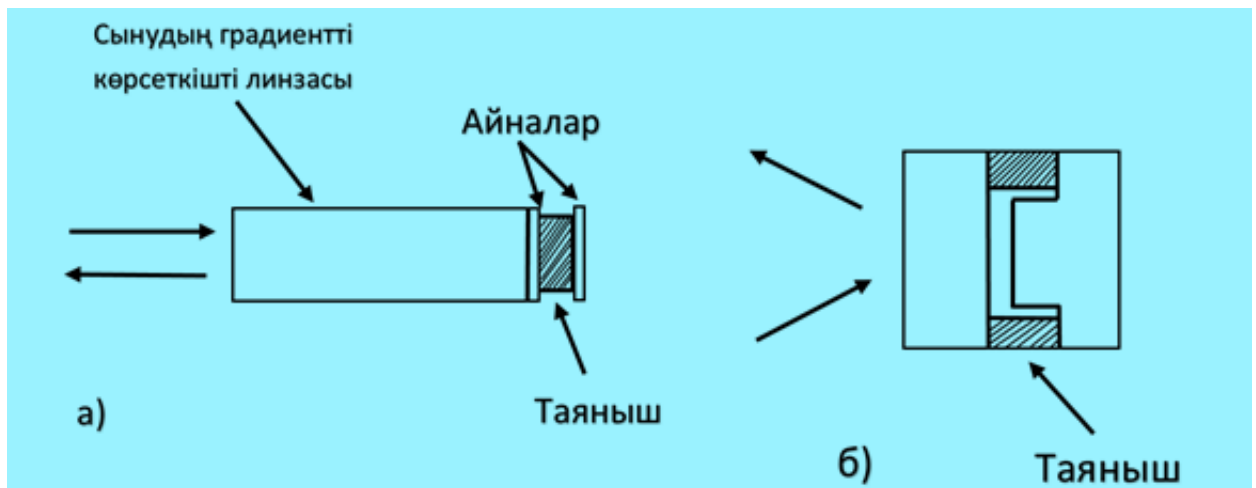
- Қашықтықтан бақылау мен қол жетпейтін жердегі жарық түсіру үшін жарық өткізу;
- Эндоскоп, экран және күшейткіш сияқты шолу жасау жүйелері;
- Оптикалық талшықтың өзін және қосымша компоненттерді қолданатын сенсорлар.

### 1.3 Фабри-Перо интерферометр негізіндегі сенсорлар

Датчиктерді жасау тәсілдері-талшықтың шетіне айналардың жұқа қабатын жағу алдында өңделген кварцты тұндыру арқылы күрделі құрастыру негізінде тұрады.

1.4-сурет температура тәуелді екі датчигі қарастырылған. Интерферометр сипаттамаларын өзгерту үшін «кергі байаныс» ұйымдастырылады. 1.4-а сурет бұл схемада кергі жарықтың өткізгіш және температурасы өзгергенде, өзінің қалыңдығының өзгеру арқылы сыну көрсеткітің өзгеріп оптикалық қашықтыққа әсерін береді. 1.4-б суретте қашықтыққа бірден әсер ететін кері схемалары қарастырыған.

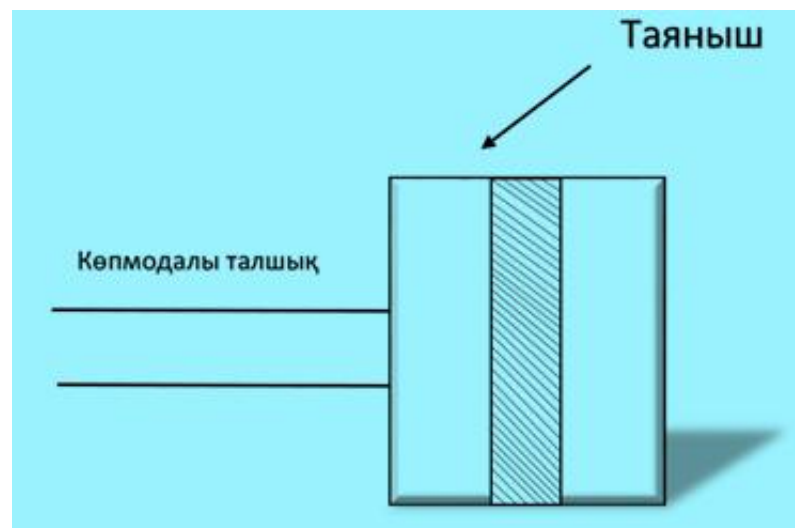




Сурет 1.4 – ИБ өзгертуге незделген кеңейтуді қолданылатын температура датчигі

1.5-суретте Фабрика-Перо интерферометрінің негізіндегі температура датчигі. Датчиктер интегралды схемалар технологиясын қолдану арқылы жасалған. Дегенмен датчиктер аймағының өлшемі  $0,5*0,5*0,2$  мм құрайды.

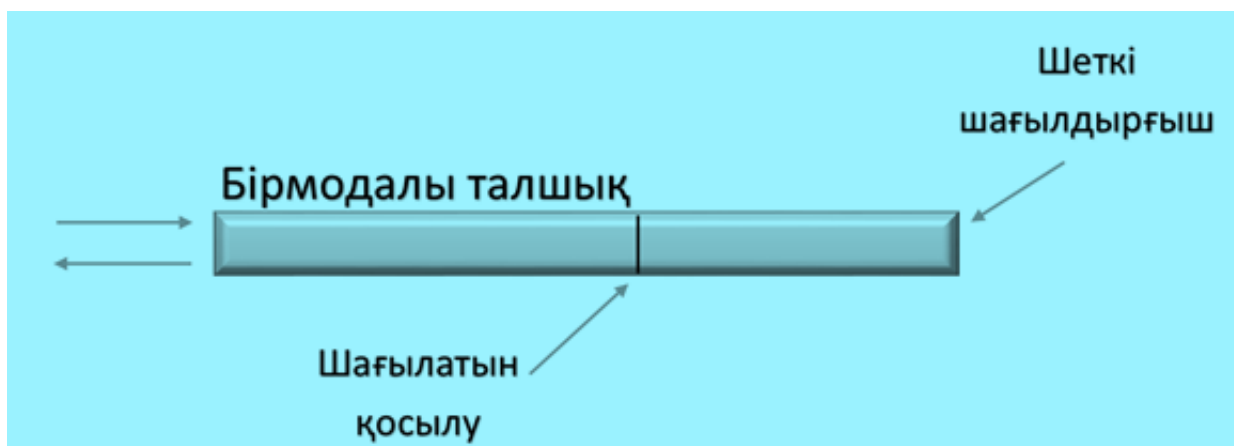
Интерферометриялық датчиктерде сигнал деңгейін есептегіш ретінде бір фотодиод қолданылады, алайда датчиктің тиімділігі шектеулі. Мысалы, төзімділігі үлкен Fabria-Perо интерферометриялық аспаптарында шуды төмендететін интерферометрдің ығысу циклдерінде режимнің сызықтық қамтамасыз ететін жүздеген фотодиодтар мен дисперсиялық оптикалық талшықтардан дәл есептеу жүйесі орындалады.



Сурет 1.5 – Температураны арнайы есептеуге арналған Фабри-Перо датчигі

Датчиктің талшықты - оптикалық қасиеттері және көздері алынғанда бұл сызықты режим ретінде есептеулер жүргізетінін айтуға болады.

Фабри-Пероның бір модальды датчиктері лазерлік көздерді қолданады, ал интерферометр талшықтың өзінде орналасады. Лазерлік көздер көп мақсатты интерферометриялық датчиктерде мүмкін емес әр түрлі және өте ыңғайлы құрылымдарды жасайды. 1.6 – суретінде температураның интерферометриялық датчигінің нұсқасы қарастырылған-бір алмалы-салмалы талшыққа салынған интерферометр. Оптикалық талшық шаңның жұқа қабаты түрінде айналардан тұрады немесе Френельдің шағылысуы қолданылады. Бұл ішкі талшықтың интерферометрінде температураны есептеу үшін Хокнер сипатталған әсерлер қолданылады [7].

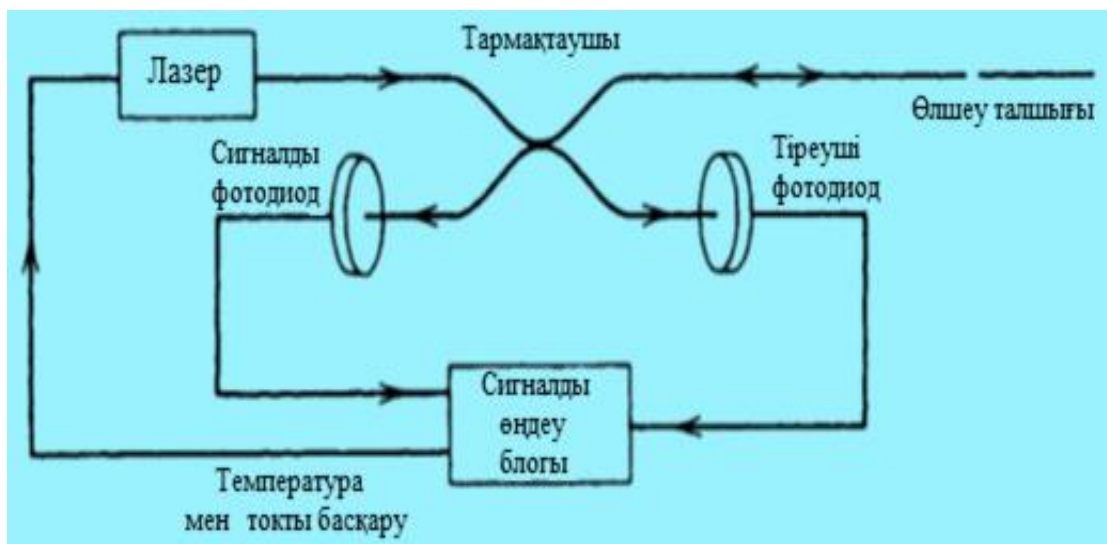


Сурет 1.6 – ТО датчиктің бір модальды интерферометрінің сұлба сы

Интерферометр ішкі Фабри-Перо талшықты интерферометр Маха-Цандер интерферометрінің кейбір ерекшеліктері бар. Фабри-Перо интерферометрі үшін температураға байланысты интерферометрдің тиісті ұзындығы талап етіледі.

Резонатордың ұзындығы когерентті лазерлік сәуленің ұзындығынан асады. Фабри-Перо үлкен төзімді интерферометриялық датчиктері үшін олардың сызықсыз еместігін есептеудің арнайы әдістері қолданылады.

FP - интерферометрі негізіндегі үлкен температуралы токтарды есептеу жүйелерінде әр түрлі схемалар қолданылады: бір немесе бірнеше фотоқабылдағыш құрылғылар интерференцияны желілерді жылжыту үшін. Мұндай жүйелер қозғалтқыштармен жабдықталуы мүмкін 1.7.- суретте бұл есептеу аспабында толқын желісі бойынша лазерлік сәуле екі фотоқабылдағышқа беріледі.



Сурет 1.7 – Фабри-Перо ТО үдерісімен жұмыс жасайтын есептеуі құрылғы

Бұл есептеу құрылғыда интерферометр негізінде аз ұзындыққа когерентті лазерлік көздемелер ұсынылады. Кейбір жағдайларда бұл есептеуіштер механикалық кернеу мен температура сияқты екі байланысты параметрді бір мезгілде есептеуге мүмкіндік беретін арнайы талшықты поляризациялық жүйеге қосылады [11-13].

Интерфеорметр негізіндегі көпмодалы ТО өлшегіштер ТОД және салыстырғанда сезімталдығы барынша аз болатыны анықталды. Әдетте өнеркәсіпте үлкен сезімталдық көп талап етілмейді. «MetriCor» шығаратын температураның көпмодалы датчиктері  $0,1^{\circ}\text{C}$  –қа дейін болады. Оның ұзындығы 10 сантиметрге жетеді температураның бірмодалы интерферометрлік датчигі температурасы Хокер мәні талшық сезімталдығы жүз ( $100$ ) рад  $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{м}^{-1}$ -ге тең есептесек, онда интерферометр сезімталдығын  $10^{-4}$  рад-ты құрайтыны анықталды.

## 1.4 Мах-Цендер және Майкельсон интерферометр негізіндегі датчиктер

Интерферометрлік датчиктер электромагниттік бөгеттері әсеретпейтін оптикалық сигнал қасиеттерінің арқасында сезімталдылығы, өте дәл датчиктер болып саналады.

Интерферометр негізінде жүргізілген отырған оптикалық сигналдың әртүрлі ара қашықтықтарда өтетіп отыратын екі сигналға бөлініп қарастырылады, кейін ол сигналдар қосылып, ол кезде сигналдың салыстырмалы фазалық ығысуы мынадай болады:

$$\varphi = n_1(kz - n_2kz_2) \quad (1.1)$$

немесе екі жарық сигналыда бір орталықта таралатын болса, ол кезде

$$\varphi = n_1k(z_1 - z_2) = nk\delta \quad (1.2)$$

формулананы мына түрде көрсетеміз

$$d\varphi = kd(nz) = k(ndz + zdn) = kn\left[\left(n\frac{dz}{z}\right) + dn\right] \quad (1.3)$$

Мұнда  $ndz$  ұзындықтың физикалық өзгеріуіне сәйкес, ал  $zdn$  – сыну көрсеткіш өзгерісіне сәйкес келеді.  $dz/z$  шамасы – Т-тың деформациясы.

(1.3) теңдеуде температураның оптикалық сигналға әсер ету теңдеуін шығаруға болады:

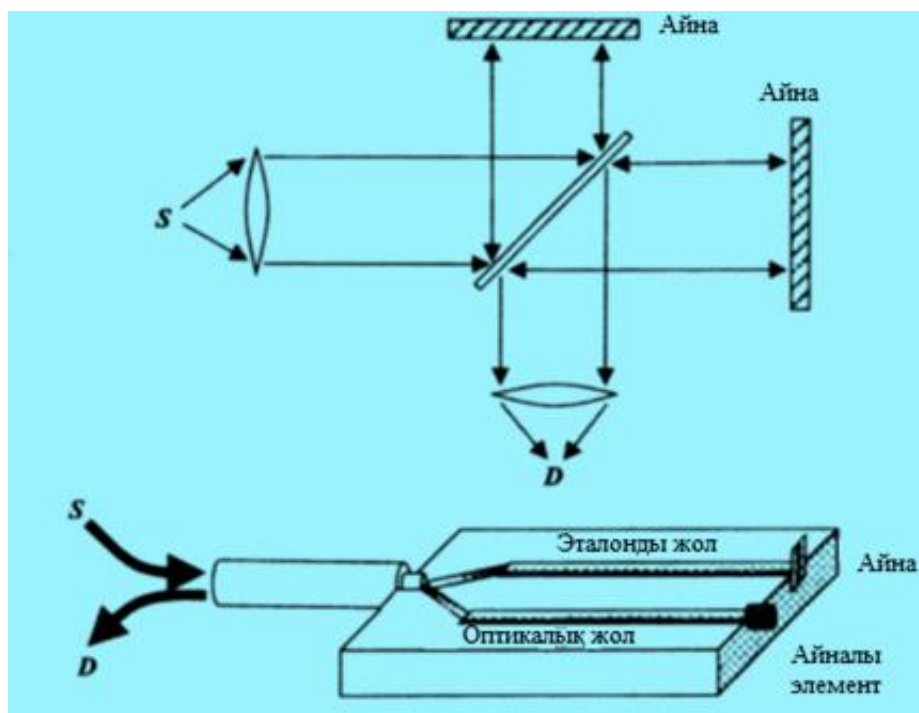
$$\frac{d\varphi}{dT} = k\left(n\frac{dz}{dT} + z\frac{dn}{dT}\right) = kz\left(\frac{n}{z}\frac{dz}{dT} + \frac{dn}{dT}\right) \quad (1.4)$$

ТК талшық  $dz/(zdT)=5\times 10^{-7} K^{-1}$   $dn/dT=10^{-5}K^{-1}$  фазаның оптикалық ығысуында келесі сыну көрсеткішіне  $d\varphi\sim 100\text{рад}^{-1}K^{-1}$ ) ие [10]. Диаметрінің 1 мм  $dz/(zdT)\sim 6,5\times 10^{-7}K^{-1}$  нейлон қабаты кварцты талшықта фазаның оптикалық ығысуы талшықты - оптикалық температураның өзгеруі болады[1].

Датчиктердің құрылымы өлшенетін параметрі сәуленің оптикалық жүру жолының ұзындығының өзгерісін өзгертетіндей болуы керек. Фазалық ығысу кез-келген типті интерферометр көмегі арқылы интерференциялық әдіспен өлшенеді. Сезімтал элемент болғандықтан оптикалық толқын өткізгіш кейбір төсемдерде орналасады. ОТ датчиктердың көбі 1.8-суреттегі Мах-Цендер интерферометрін қолданады. Майкельсон иетерферометрінің үдерістік оптикалық схемасы 1.8-суретте көруге болады.

Мұндай дрейфтің уақытша өлшемі – 0,1-ден аса болады. Бұған сәйкес интерферометр датчиктері 10 Гц-тен көп жиілікте есептеуге болады. Екіншіден интерференцияның бірдей интенсивтілігі фазалық ығысуы  $2\pi$  периодпен

қайталанатын толқын ұзындығынан артық ұзындықтарда есептеу керек. Осылай ОД конструкциясын басынан орнату және қосымша сигналдарды өңдеуге [2].

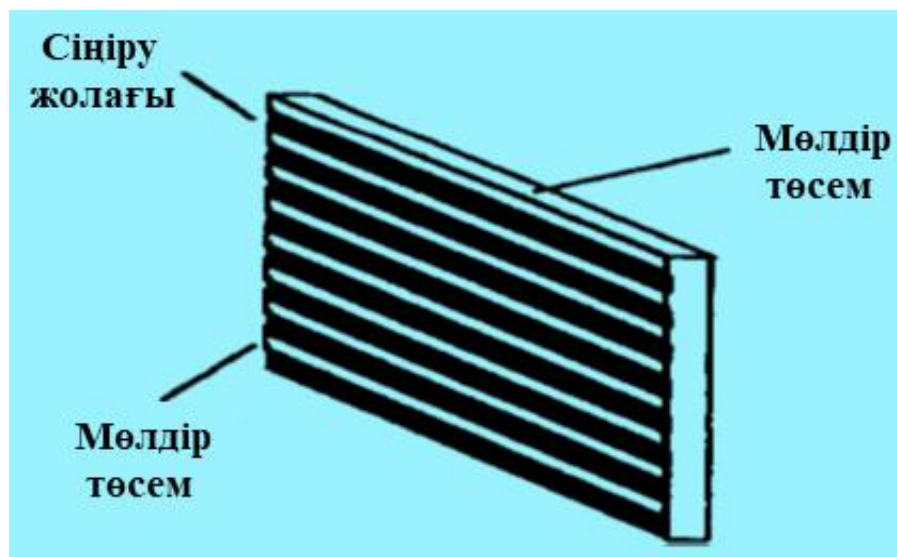


Сурет 1.8 – Майкельсон интерферометрінің сұлба сы (талшықты-оптикалық форма).

### 1.5 Дифракциялы датчиктер

Тиімділігі үлкен көпмодалы талшықты-оптикалық датчиктер дифракциялы тордың қасиеттеріне негізделген. Бұл тор 1.9 - суретте қарастырылған кезектесіп мөлдір әрі сіңіретін облысы оптикалық мөлдір ортаның толығымен көрсетеді. Қазіргі кезде осындай түрдегі датчиктер жасауда көптеген жұмыс атқарылып отыр.

Дифракциялы торлар үдерісі 1.9-суреттен көруге болады. Мұндағы  $s$  тор периоды, ал  $a$  саңылаудың өлшемі қарастырылған.



Сурет 1.9 – Дифракциялы тордың құрылымыдық сұлба сы

Дифракциялы тор толқын ұзындығына әсер етуші құрылғы ретінде қолданылуға болады. Егерде  $a/s$  қатынасы тұрақты болса, ал тордың периоды  $P$  (температура) әсерінен өзгертін болса, онда сәулеленудің бұрыштық спектральды таралуы дифракциялық торлар арқылы өзгереді. Мысалы, бұрышты тұрақты есептеу кезінде кіріс сәуленің тұрақты түсу бұрышы мен энергияның кіріс сигналдың толқын ұзындығымен біркелкі таралғанда, алғашқы түсі  $P$  параметрімен байланысты болады.

Егер, төсем үлкен жылулық ұлғаюын (1.9-суретте толқын ұзындығының өзгерісіне негізделген температура сенсоры қарастырылған) көрсететін болса, онда тордың периоды мына формуламен алынады:

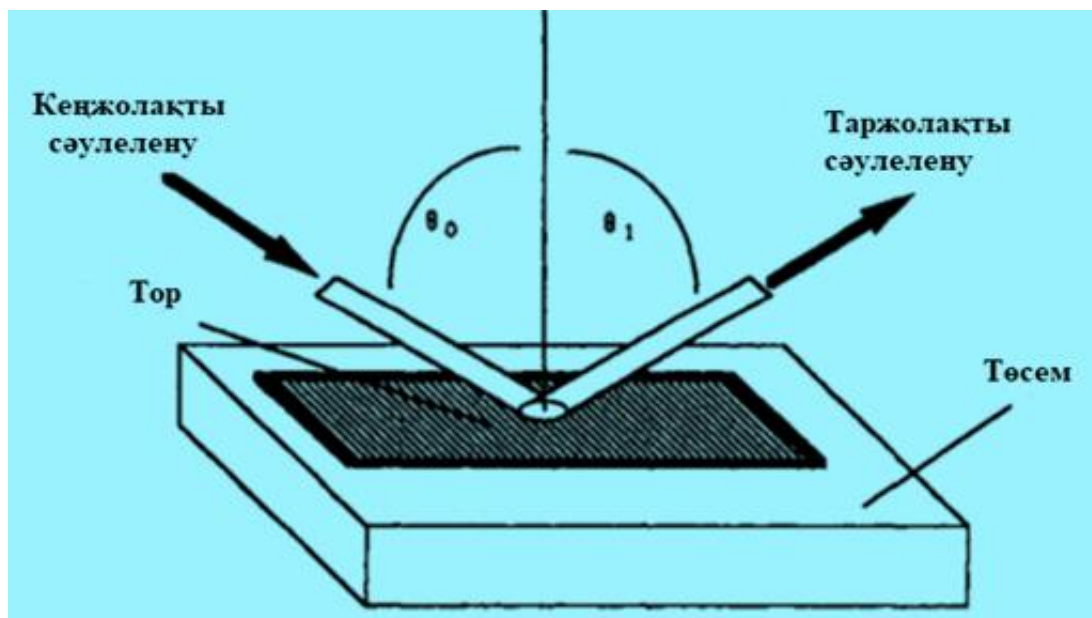
$$s = s_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1.5)$$

Мұндағы  $\alpha$ -төсемнің жылулық ұлғаю коэффициенті және  $s_0 - T_0$  температурасындағы тордың периоды.

$\theta_0$  тұрақты бұрышында сынатын және жұтатын жарықтың кезектесуінен сынатын дифракциялық тордың жарықтануы кезінде жарық дифракциясы тор периодына  $s$  (сыну жолағының ара қашықтығы) мен  $\theta_1$  тіркеу бұрышына тәуелді болады:

$$s(\sin \theta_0 + \sin \theta_1) = m \quad (1.6)$$

Мұндағы бұрыштар жарықтың түсу жазықтығының тор жазықтығына перпендикуляр түсуімен өлшенеді.  $M$  шамасы – дифракцияның реті. Торлар жарықтың түсу жазықтығына перпендикуляр болады. Санау осі түсетін жарық тор жазықтығымен қиылысатын, нүкте арқылы өтетін тор жазықтығына перпендикуляр.



Сурет 1.10 – Сындырушы дифракциялық тордағы дифракция

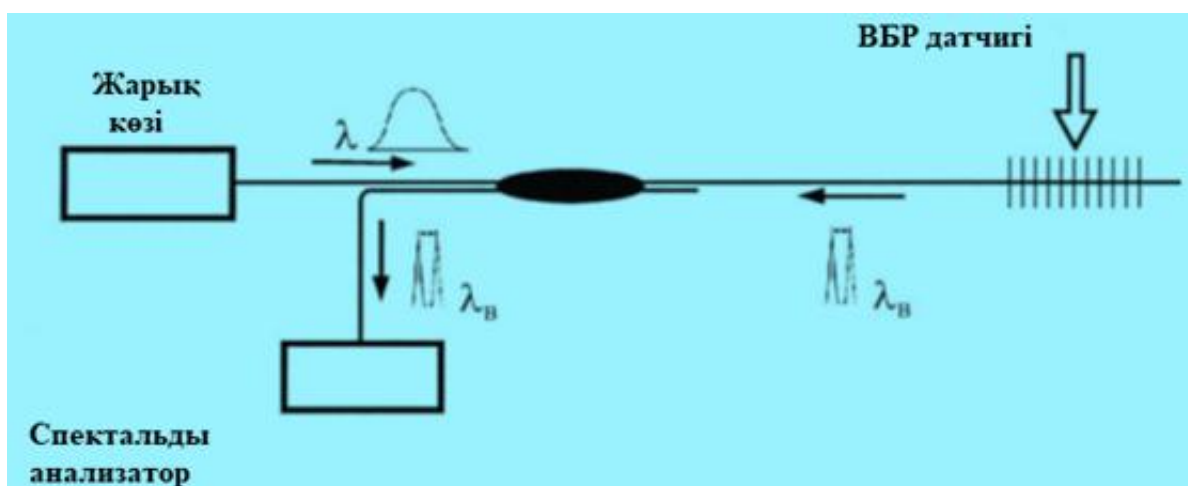
Түсу бұрышы санау осімен салыстырғанда, оң бұрыш деп алынады, мұнда дифракция бұрышы санау осі жағынан оң, ал керісінше ретте кері болатындай, оң бұрыш ретінде алынады. Егер дифракциялық тордың периоды өлшенген параметрлерге  $P$  (яғни  $s=f(P)$ ) сәйкес өзгертін болса, онда  $P$  параметрі  $s$  белгілі ( $f^{-1}(s)$  функциясы бар және анықталған болады) болғанда мына формуламен қарастырылады:

$$P = f^{-1} \frac{m}{\sin \theta_0 + \sin \theta_1} \quad (1.7)$$

Интенсивтілікті есептеу негізіндегі сияқты толқын ұзындығын есептеу негізінде жүзеге асырылған дифракциялық сенсорлар жасалған [10].

### 1.6 Көлемді дифракциялық БТ негізінде температураның талшықты-оптикалық сенсорлары

Бүгінгі күнде көлемді дифракциялық БТ негізіндегі есептеу құралдары жиі қолданыла бастады. Мұндай торлар оптикалық жарық өткізгіштің өзегінде орналасқан жүздеген нм болатын, нано-өлшемді периодты оптикалық-талшықты құрылымды көрсетеді [13]. Мұндай өлшегіштің жұмыс істеу принципі сезімтал элементке әсер етуші механикалық кернеу (қысым) немесе температураға байланысты (ТБТ) талшықты Брэгг торларының  $\lambda_B$  резонансты толқын ұзындығына тәуелділігіне негізделген. ТБТ ауытқулары сынатын сәуленің толқын ұзындығының өзгерісіне  $\lambda_B$  әкеледі. Сондықтан спектральды құрам температура немесе қысымның шамасын анықтайды, 1.11-сурет.



Сурет 1.11 – ТООБТ-да температураның үдерістік сұлба сы

Сенсордың сезімтал элементі электронды компоненттерден тұрмайды, сондықтан ол толығымен диэлектрлік болып табылады. Оптикалық талшықта әрқайсысы өзінің толқын ұзындығын беретін торлардың үлкен көлемі орнатылған. Бұл ретте нүктелік сенсордың орнына толқын ұзындығы бойынша мультиплекстелген бөлінген тіркеу жүйесін аламыз. Жарықтың толқын ұзындығын ақпараттық параметр ретінде қолдану сенсорды талшықтағы оптикалық қуаттың кездейсоқ өшуі мен сәулелену көзі мен қабылдаушы параметрлерінің дрейфіне сенсорды сезімтал болдырмайды. Брэгг сенсорларын қамтитын есептеу құрылғылары жылда әрекет ету жағынан тензо сенсорлардан қалып қалады. 1.11-суретте көрсетілген сигналдар калибровкасының жетілдірілген принципті оптимизацияланған есептеу жүйесі құрылғының жұмысын арттыруға мүмкіндік береді.

БТ негізіндегі талшықты-оптикалық сенсорларын “Sedatec” компаниясы шығарады [14]. Құрылғының сыртқы бейнесі 1.12-суретте қарастырылған.



Сурет 1.12 – “Sedatec” компаниясы шығарған БТ негізіндегі температураның талшықты-оптикалық сенсорларының сыртқы пішіні

### 1.7 Жартылай өткізгіш сезімтал элементті температура сенсоры

Жартылай өткізгіштердің спектральды жұтылу жолағының температураға тәуелділік шекарасы температураны есептеуге арналған ОТС жасау үшін қолданылады. Мұндай сенсордың жұмыс сітеу принципі 1.13-суретте



қарастырылған. Бір талшықтан екіншісіне GaAs-призмасы арқылы сәуле өтеді. Егер фотондардың энергиясы тиым салынған аймақтың еніне қарағанда (яғни толқын ұзындығы 900 нм-ден көп болған кезде) аз болса, онда галлий арсенидасында сәуле сөнбейді. Толқын ұзындығы қысқа фотондар жұтылады. Жұтылу аймағының шекарасы шамамен  $0,5 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ -ге ығысады. Бұдан  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  сенсор дәлдігін алу үшін аймақ шекарасындағы толқын ұзындығының дәлдігі  $0,1 \text{ нм}$  болатыны анықталды. Осындай температура сенсорларын температураға қатысты сезімтал сүзгілерді (мысалы, Schott RG830 жиілігі төмен коллоидты сүзгі) қолдана отырып, құрастырады.



Сурет 1.13 – Жартылай өткізгіш шекарасының жылжуын қолданатын температура сенсоры

Толқын ұзындығы қысқа фотондар жұтылады. Жұтылу аймағының шекарасы шамамен  $0,5 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ -ге ығысады. Бұдан  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  сенсор дәлдігін алу үшін аймақ шекарасындағы толқын ұзындығының дәлдігі  $0,1 \text{ нм}$  болатыны анықталды. Осындай температура сенсорларын температураға қатысты сезімтал сүзгілерді (мысалы, Schott RG830 жиілігі төмен коллоидты сүзгі) қолдана отырып, құрастыруға болады.

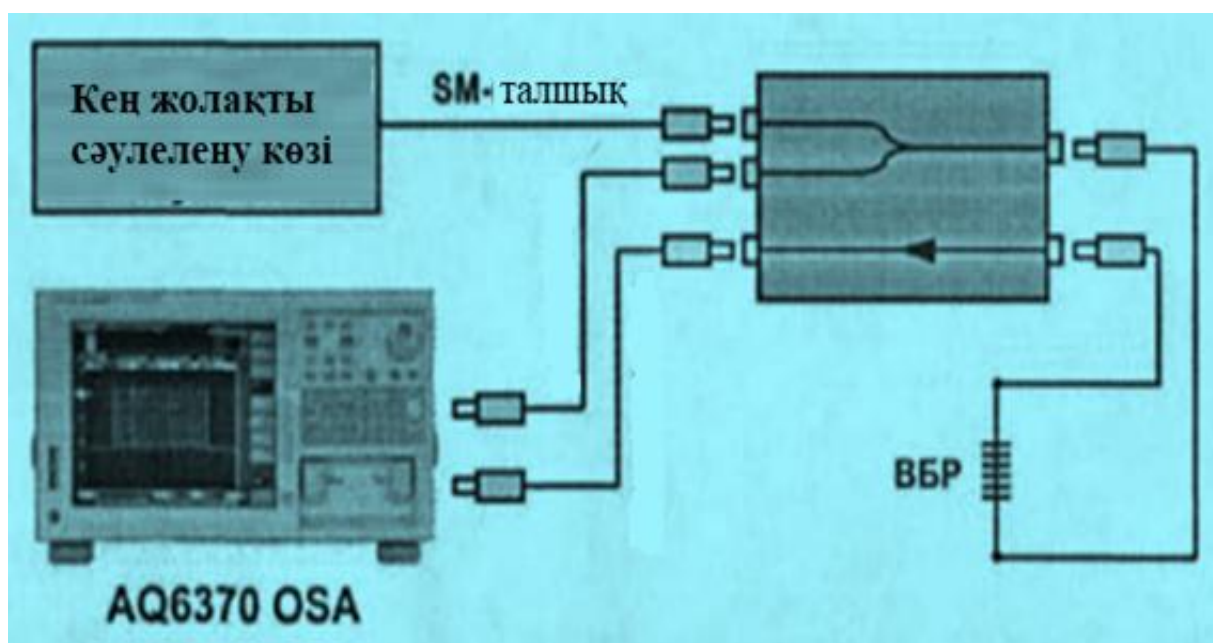
## 2 БТ негізгі параметрлерін есептеу әдістері

Талшықты-оптикалық БТ дайындау мен жасау торларды және олардың негізінде құрылғыларды тағайындаудың әрбір кезеңінде сипаттамаларын өзгертпей жасау мүмкін емес. Бұл тарау ТБТ-ның негізгі параметрлерін есептеу мен есептеу тәсілдеріне арналған.

### 2.1. ТБТ-ның спектральды сипаттамасын есептеу

Сыну және өткізу спектрін есептеу суретте көрсетілген схема бойынша жүргізеді. Схеманың құрамына кең жолақты сәулелену көздері (бұл ретте ИҚ диапазонының суперфлюоресцентті талшықты көзі), спектроанализатор, FC типіндегі оптикалық коннекторы мен SM-талшықты қамтитын стандартты телекоммуникациялық оптикалық пачкордтар, талшықты тармақтағыш пен FC типіндегі оптикалық коннектор портына жалғанған оптикалық оқшаулағыш кіреді.

Жұмыс режимінде шағылуда спектрді сәулелену көзінің спектрі бойынша спектроанализатормен нормаландырады. Осылайша, нақты уақытта брэгг торларының жазбасын көруге болады. Мұндай жағдайларда шағылу спектрінің интенсивтілігін нормирлеу нақты спектрмен салыстырғанда екі есеге азаяды.



Сурет 2.1 – БТның шағылу және өткізу спектрлерін есептеу схемасы

### 2.2. БТ-ның толқын ұзындығын есептеу

Датчик ретінде механикалық керену мен біртекті температуралық өріске орналастырылған біртекті брэгг торлары қолданылады, осынай торлардың брэггтік толқын ұзындығының ығысуын есептеу маңызды болады.

Бұл жұмыста қол жетімді спектральды шешуге байланысты ығысудың әртүрлі екі тәсілі қарастырылады.

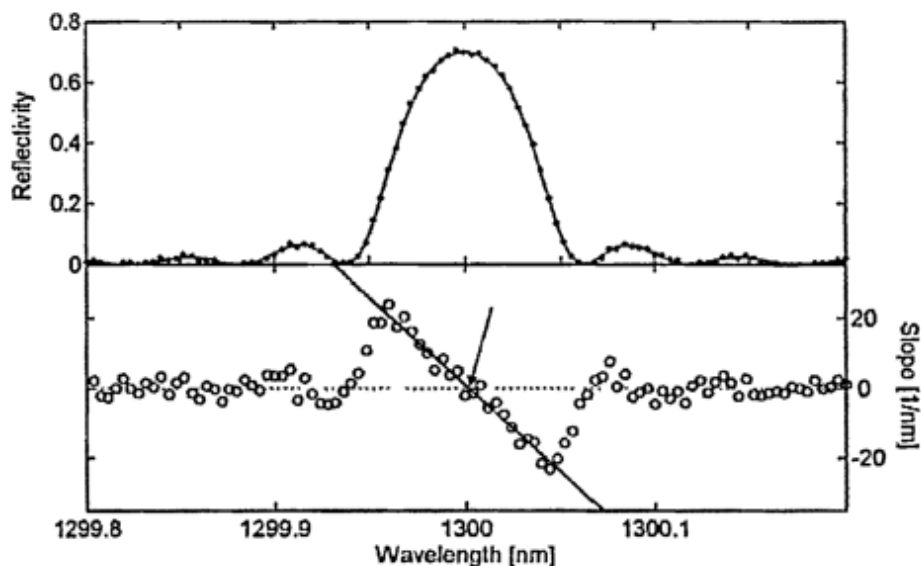
Төмен шешуі бар брэгг толқын ұзындығын есептеу шағылудың туынды функциясы оның максимальды және минимальды мәндерінің арасында (иілудің ауысу нүктесіне сәйкес) нольмен қиылысатын толқын ұзындығы ретінде алынады. 10-суретте 10 мм ұзындықта және  $\Delta n_{ac} = 5 \cdot 10^{-5}$ , шу деңгейі 2% және рұқсатберуі 4 пм болатын біртекті тордың сыну спектрі бейнеленген. Максимум нүктесінен бөлек (бағытпен қарастырылған) біз иілу нүктесін (туынды функцияның максимумы мен минимумы) анықтадық.

Үлкен спектральды рұқсат нүктесімен есептеу үшін ұсынылған әдіс шыдың деңгейі туынды шағылу функциясының шамасынан артық болғандықтан, қолайлы болмайды. Сондықтан басқа әдісті (басқа ретте рұқсатты азайтуға тура келеді) қолдану ұсынылады.

Брэгг толқын ұзындығының ығысуын анықтау үшін екінші әдісте тордың сыну функциясының рұқсат етілген ортасын қолданады:

$$\lambda_b = \frac{\sum_m R(\lambda_m) \cdot \lambda_m}{\sum_m \lambda_m} \quad (2.1)$$

Мұндағы  $\lambda_m$  және  $R$  өлшенген толқын ұзындықтары мен шағылу интенсивтілігі. Бұл әдіс үлкен спектральды рұқсатты (Брэгг шарықтау шегінде 200-ден жоғары) талап етеді. Сонымен бірге, бұл әдіс біртекті емес қоршаған ортада болатын, мысалы, біртекті емес механикалық кернеуде тордың орталық толқын ұзындығын өлшегенде қажет. Мұнда салмақтық орталық брэгг шарықтау шегінің орташа мәнін көрсетеді. Кең диапазонды спектральды ТБТ үшін салмақтық орталықты есептеу спектральды тығыздық энергияға пропорционалды болғанда жүзеге асырылады.



Сурет 2.2 – Төмен спектральды рұқсаты бар есептеу үшін толқынұзындығын есептеу; жоғарғы сұлба : шағылудың (сызықтың) теориялық интенсивтілігі мен шулы сигнал (нүктелер); төменгі сұлба : туынды (шеңберлер) мен максимум және минимум (сызықтар) арасындағы сызықты аппроксимация

### 2.3 Талшықты БТ-ны дайындау тәсілі

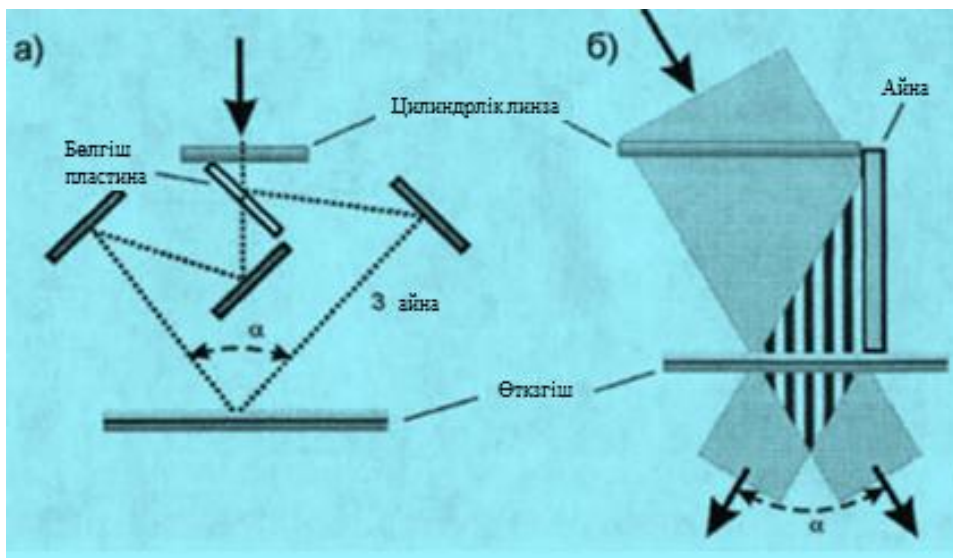
Аз ТБТ периодының күшінде ( $L \sim 0.5$  мкм) интерференциялық әдіспен өрнектейді. Қажетті торлы құрылымды жазу процесі бірнеше минуттарға созылатындықтан, үлкен тұрақтылықтағы интерференциялық көрініс қана мүмкін.

Ұсынылған ТБТ жазбасының схемасының саны көп болғанына карамастан, оларды ұйымдастырудың бірқатар негізгі принциптерін бөліп көрсетуге болады.

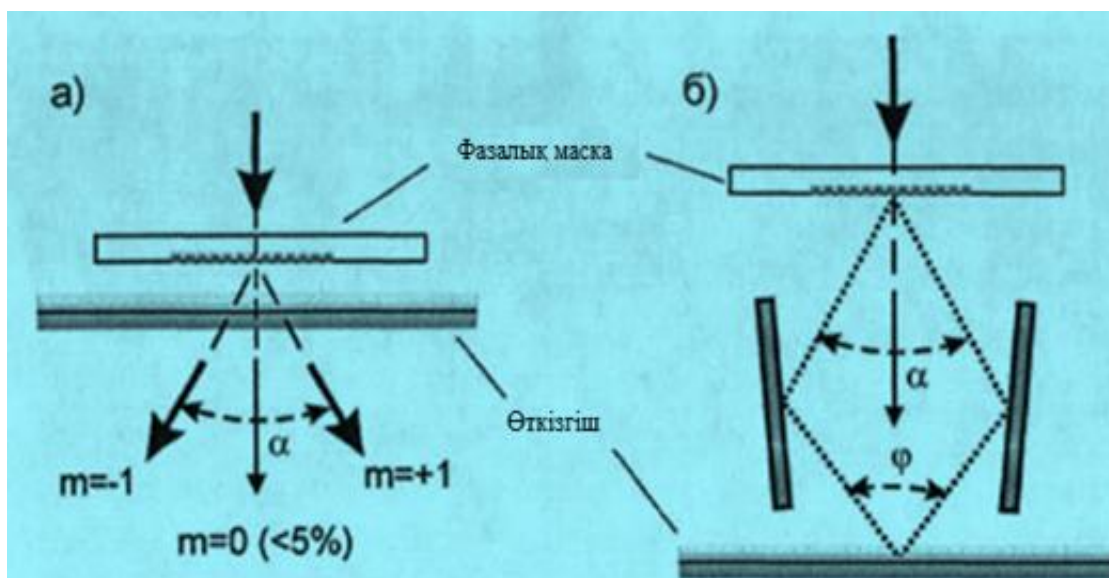
БТның жазбасы үшін қолданылған. Бірінші интерферометрде жарықты бөлгіш пластина көмегімен ағымдағы УК түйінді амплитудалық бөлу қолданылды. Түйіндер содан кейін белгілі бұрыш бойынша бір біріне сәулеленетін жарық өткізгіш орналасқан жерге көшіріледі. Бұл бұрыш интерференциялық көрініс периодын, сонымен бірге ТБТ периодын береді.

ТБТ-ны жазу үшін көбінесе оптикалық элементтерінің саны аз, уақытша тұрақтылығы көп түйіндермен кеңістіктік бөлетін интерферометрлерді қолданады. Мұндай интерферометр түйіннің бағытын теңдей екі бөлікке бөлетін диэлектрлік айнаны қолданады. Бұл ретте бұрышты қайта құру 2.3 суретте бейнеленген интерферометрде жасалғанмен салыстырғанда жеңіл болатын айнаны оған бекітілген жарық өткізгішпен бірге бұру арқылы жүзеге асырылады.

Интерферометрлердің қарастырылған типтері торларда жазылған параметрлерді таңдауда ыңғайлы болады, алайда жазатын сәулеленуде кеңістіктік және уақытша когеренттікті талап етеді.



Сурет 2.3 – УК-сәулеленулер түйінімен кеңістіктік амплитудалық (а) және кеңістіктік (б) бөлінген интерферометрдегі брэгг торлары жазбасының схемасы



Сурет 2.4 – Фазалық маска көмегімен брэгг торлары жазбасының схемалары: тікелей жазба (а), Тальбота интерферометріндегі жазба (б)

Салыстырмалы кең шектерде ТБТ резонансты толқын ұзындығын қайта тұрғызуды қосымша айналар көмегімен бұруға болатын Тальбота интерферометрінде жүзеге асыруға (2.4 сурет). Еркін бөлінген ықпалдандырылған ПП-мен торларды жасауда салыстырмалы фазалық масканың УК-түйінін сканерлеу әдісі тиімді болып табылады.

## 2.4 ТБТ жазбасын фазалық маска әдісі арқылы орнату

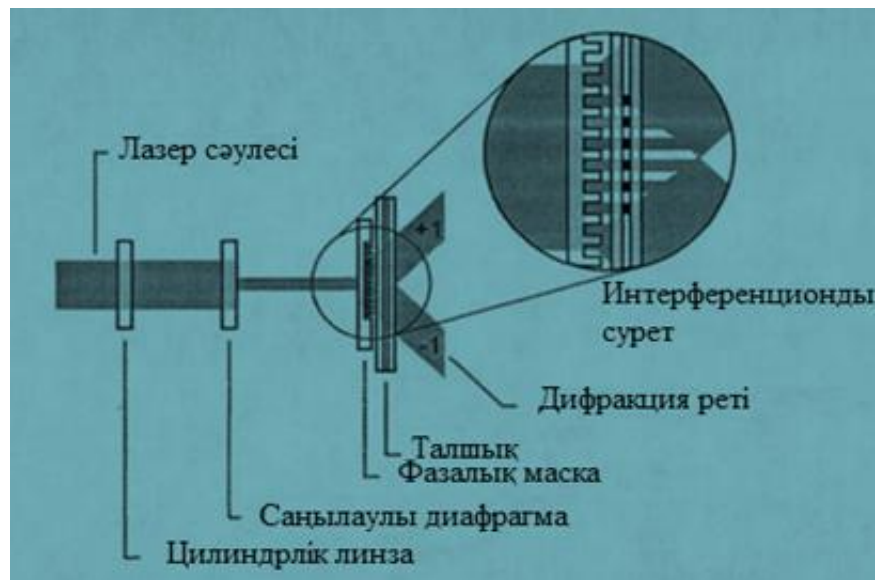
ТБТ-ның фазалық маска арқылы жазбасының әдісі (2.5 сурет) УК-сәулеленуінің когеренттігіне деген стандарттарды азайтады, сондықтан қымбат емес эксимерлік лазерлерді қолданады. Бүгінгі күнде дайындалатын фазалық маскалар ұзындығы бойынша айнымалы болатын период пен ПП модуляциясының амплитудасын көрсететін ТБТ құрылымын жазуға мүмкіндік береді. Сонымен бірге ТБТ мүмкін болатын параметрлерінің қатаң бекітуі масканы даярлау кезеңінде қарастырылған схеманың кемшіліктерінің бірі болып табылады.

Фазалық маска бетінде периодтық рельеф қалыптасқан кварцты пластинаны көрсетеді. Масканың периоды мен тереңдігі берілген толқын ұзындығы үшін брэггтік шағылуды максимальды бірінші реттік жасайтындай үйлестірілген.  $\pm 1$  реттік суперпозициясы маска периодының жартысына тең периодты интерференциялық көріністі береді. Интерференция жарық көзі когерентті ұзындықта (уақытша және кеңістіктік) жұмыс жасағанда ғана туындайды. Егер талшық интерференция аймағына орналастырылған болса, фазалық масканың жарты периодына тең периодты ТБТ-ның жазбасын жүргізуге болады. типтік бақыланған мәндер 40% энергияның әрбір дифракцияның бірінші ретіне сай келеді. Қалған нөлдік ретте (түскен түйіннен 1-5% кем) интерференциялық көріністің көріну шегін шайып жіберетін тұрақты сыну көрсеткішінің өзгерісіне алып келеді.

Түйінді түрлендіру схемасы дөңес цилиндрлік линза мен компьютермен басқарылатын (бүйірінен қараған бейнесі 2.5-суретте) РІ прецизионалды моторлы жылжымалы платформаға орналастырылған саңылау диафрагмадан тұрады. Осылайша, талшықты кейбір қадамдармен барлық фазалық маскада тордың ұзындығы бойынша жазбаны жүзеге асыруға болады.

Жарық көзі ретінде соңғы құю мезетінен бастап уақытқа байланысты бірнеше миллиджоульден 60 мДж-ге дейін энергиясы бар 248 нм (KrF) толқын ұзындығында жұмыс жасайтын импульсті эксимерлі лазер пайдаланылды. Лазерлік сәуленің ені фазалық масканың алдында орналасқан саңылаулар шекарасымен шектеледі. Фазалық маска жылдам алынып, ауыстырылады.

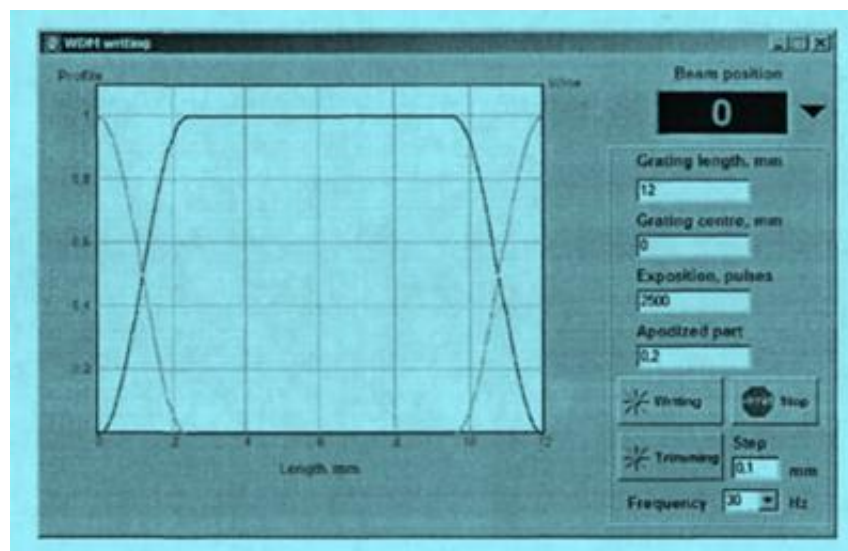
Талшықты фазалық маска алдында салыстырмалы лазерлік сәулемен тегістеу үшін микроскоп қолданылды. Мұндай жазба схемасы торды жазу процесінде механикалық тұрақтылық көрсетеді. Талшықты фазалық маскадан 1 мм-ге алыстатқанда, бұл нүктеде сәулелену когерентті емес болғандықтан, оған біртекті жарық беріледі. Бұл тримминг немесе торда жазылған брэггтік толқын ұзындығын ыңғайлау үшін қолданылуы мүмкін. Сонымен бірге, брэггтік толқын ұзындығын ыңғайлау жазбаның алдында талшықты керу арқылы жүзеге асыруға болады. Тор жазбасының процесі есептеу схемасына сәйкес спектроанализаторда нақты уақытта бақыланады.



Сурет 2.5 – Фазалық масканы пайдаланып ТБТ жазбасының схемасын тұрғызу

Оптикалық схеманы түзету сәулеленуі оның эксимерлік лазердің фазалық маскаға дейін оптикалық жолымен сәйкес келетіндей қиыстырылатындай He-Ne лазерлік сәулемен жүзеге асырылады. Вертикаль түзету дифрагирленген фазалық маскада түзету сызғышын қолданатын He-Ne лазерлік сәулесінің интерференциялық максимумы арқылы жүзеге асырылады.

Жазбаны орнатуды программалық қамтамасыз ету тордың ұзындығын, жазба профилін, экспозицияны (тордан өтетін лазер импульстерінің саны), тримминг профилі (тордың біртекті когерентті емес жарық берілуі) мен жазба қадамын алуға мүмкіндік береді.



Сурет 2.6 – ТБТ «WDM writing» жазбалар программасының терезесі

Кесте 2.1 – БТ жазбасына, қондырғысына кіретін жабдықтар

	<i>Өндіруші</i>	
ASX-750 эксимерлік лазер	MPB	Толқын ұзындығы 248 нм; газды қоспа KrF; импульстер жиілігі 60Гц; импульстегі энергия 60кДж-ге дейін
УК-түйінін қосатын жеткізу жүйесі:		
Бірінші саңылаулы диафрагма	MPB	
Екі бұрышы бойынша түзеткіші бар 45° УК айна		
УК сапасымен кварцты цилиндрлік линза	CVI	
Микрометрлік винтпен реттелетін екінші диафрагма	Edmund Optics	
4 ось бойынша түзетілген масканы қолданушы	MPB, Optosigma	
4 ось бойынша түзетілген суперинварда талшықты қолданушы	MPB, Optosigma	
DC жетекті M531.DG жылжымалы столы	PI	Позициялау қашықтығы 306мм; минимальды қадам 1 мкм; позициялау дәлдігі 0,033 мкм
C843.21 контроллері	PI	
МБС-9 микроскобы		
BBS7210 кең жолақты жарық көзі	MPB	Шығыс сәулелену қуаты 11 dBm; спектрдің ені 76 нм; орталық толқын ұзындығы 1565 нм

## 2.5 ТБТ жазбасының тізбектелуі

Талшықтардың әйнек торларын төмен температурада молекулалық сутегімен қанықтыру негізінде төмен температурада молекулалық сутегімен қанықтыру сутегінің қысымы 150 атм бөлме температурасында бір апта бойы арнайы автоклавта жүзеге асырылады. Мұндай өңдеуден өткен талшықта -40дБ



деңгейде брэгг максимумымен БТнда жазу мүмкін. Төмен температурада молекулалық сутегімен қанықтырылған талшық ол жазбаға жарамды болған кездегі уақытты арттыруға мүмкіндік береді. Бір аптадан кейін сутегінің бөлігі талшықты тастап кетеі және жазбаның тиімділігі азаяды.

Оптикалық схеманы жинау - Оптикалық дәнекерлеу көмегімен төмен температурада молекулалық сутегімен қанықтырылған талшық талшықты тармақтағыш пен оптикалық оқшаулағышты қамтитын модуль портына дәнекерленеді. Оқшаулағыштың модульге шығысына спектроанализатор қосылады. Сутегімен қанықтырылған оптикалық талшықтың аймағы арқылы өткен жарық спектрі спектроанализатор жадысына жазылады. Спектроанализатор салыстыру режиміне ауысады – өлшенген спектр жазбадан алынып тасталады. Осылайша, спектрдің суперфлюоресцентті сәулелену көзінің әсері шығарылады.

Экимерлік лазерді тексеру – диафрагма лазері сәулесінің жолына біріншінің орына пироэлектрлік импульстік қуат өлшегіш нысана орнатылады. Аспаптың көрсеткіштері негізінде қажетті күштің тордағы жазбасына қажет импульстер санны жайлы айтуға болады. импульс энергиясы 15 мДж-ден төмендеген кезде лазер қайта қосуға нұсқау береді.

Фазалық масканы орнату - ұстағышта қажетті периоды бар фазалық маска орнатылады.

Оптикалық талшықты орнату - стрипперді қолдана отырып, жазба жүргізілетін талшық аймағының полимерлік жамылғысын алып тастау керек. Жамылғының қалғанын изопропилен спиртке батырылған түксіз майлықпен кетіреді. Содан кейін талшық ұстағышқа бекітіледі. Талшықты созуды ұстағыш маңындағы талшыққа ілінген жүктің салмағын өзгерте отырып реттеуге болады. Микроскопты қолдана отырып, талшықты фазалық маскаға параллель қояды, сосын оған жақынырақ жылжытады.

БТның жазбасы - «WDM writing» программалар терезесінде жазба параметрлері – тордың ұзындығы, позиционер салыстырмалы координата басының орталығы, позиционер қозғалысының қадамы, экимерлік лазер импульстерін жиілігі, тордағы импульстер саны мен аподизация бөлігі. Сосын «Writing» батырмасын басу арқылы жазу процесі іске қосылады. Егер лазер импульстерінің саны қажет күшпен тордың жазбасы үшін жеткіліксіз, ал талшықты созу көп болмаса, жазбаны қайталауға болады.

Тримминг -талшықты фазалық маскадан 1 мм қашықтыққа жылжытып, дифракциялық максимумдер когеренттігі жоғалатын аймаққа орналастырады.

Осылайша, жазылған БТның біркелкі жарық беруі жүзеге асырылады. Процесс «Trimming» батырмасы арқылы қосылады.

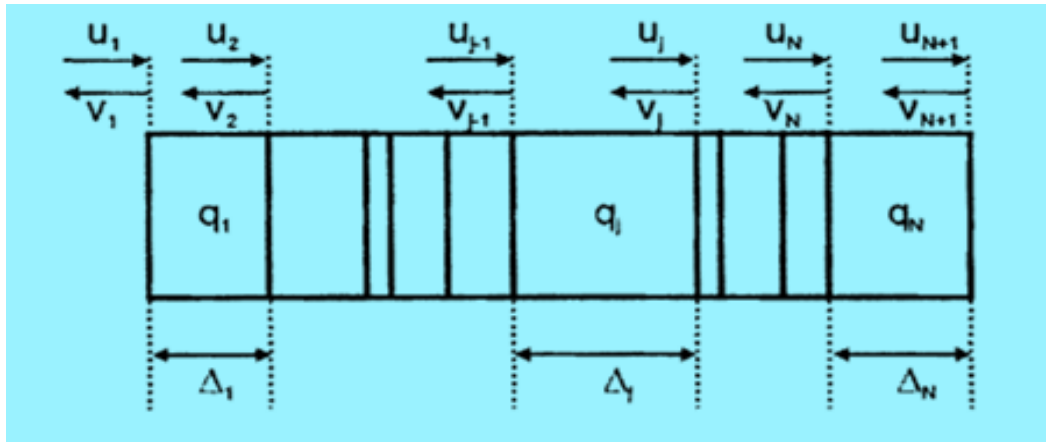
Торларды босаңсыту - торларды босаңсытуды торды қолдану жоспарланатын максимальды температурадан асып түсетін 30<sup>0</sup>С температурада жүргізген дұрыс. Босаңсыту кезінде тордың күші бірнеше процентке кемиді, ал орталық ұзындық қалған сутегі талшықты тастап кеткендіктен, орташа сыну көрсеткіші азаюы мүмкін.

## 2.6 БТ математикалық сипатталуы

Брэгг торларын қамтитын жарық өткізгіштерде электромагниттік толқындардың таралуына талдау жасау үшін бірнеше әдістер жасалған. [15]. Жарық өткізгіш модаларының өзара әрекеті белгілі толқын ұзындығында тек екі мода ғана фазалық синхронизмнің шарттарын қанағаттандырады, осылайша бір-біріне энергия бере алатын байланысқан модалар теориясымен сипатталады. Сонымен бірге әлсіз периодтық ауытқу өзгеріссіз қалады. Байланысқан модалар теориясы басынан бастап біртекті торларға арналған, бірақ Когельник [14] модель мен апериодты құрылымдарды таратты. Байланысқан модалардың формализм әдісі бір текті емес торлар үшін байланысқан дифференциалды теңдеулер жүйесі жалпы ретте аналитикалық шешімге ие болмайды. Сонымен бірге торларға талдау жасау үшін тиімді көрсеткіш (effective index method - EIM) [16] пен шашырау матрица (transfer matrix method - TMM) әдісі сияқты матрицалық әдістер жасалған. EIM әдісінде торлар ауытқу периодының ең кіші мәнінен аз болатын ұзындықтағы секцияларға бөлінеді. Өрістер интегралды оптикадағы тиімді сыну көрсеткіші әдісін қолданатын әрбір секциялардың ішінде қарастырылады. Бұл кезде сыну көрсеткіші оның аймағында тұрақты болып қалады деп қарастырылады. Әрбір секцияның ішіндегі өрістер секциялардың оң және сол жақ бөлігінің арасында матрицалар қатынасын түзе отырып, алдыңғы және соңғы секциялар өрісімен сәйкес болады. бұл секциялардың жеке матрицаларын көбейту арқылы алынған жалпы матрица толық құрылымды қарастырады. Бұл тәсіл құрылымның максималды ұзындығы бірнеше миллиметрді құрайтын интегралды-оптикалық торды сипаттауға ыңғайлы. Алайда ұзындығы бірнеше сантиметрге жететін талшықты торлар болғанда, бұл әдісте есептеуге көп уақыт қажет етуі мүмкін.

Шашырау матрицасы әдісінде торлар ұзындығы ауытқу периодынан көп болатын секцияларға бөлінеді. Әрбір секцияның ішіндегі сыну көрсеткішінің модуляциясы тұрақты деп саналады. Мұндай әрбір секция біртекті торға сәйкес келетін, ал құрылым жеке матрицалардан алынған жалпы матрицалармен сипатталады. Бұл тәсіл периодты және периодты емес құрылымдар мен ұзын торлар үшін қолайлы. Торларды алдау үшін бірнеше аса белгілі емес әдістер ұсынылған.

Шашырау матрицасы әдісінде [17, 18, 19] торлар ұзындығы  $\Delta_j (j=1, \dots, N)$ , әрқайсысында  $\Delta_{nc}$ ,  $\Delta_{dc}$  және  $\Delta$  параметрлері тұрақты деп саналатын  $N$  аймақтарға бөлінеді. Содан кейін тор  $q_j$  байланыс коэффициенті мен  $\Delta_j$  физикалық енді  $N$  секциялармен алынады (2.7-сурет).



Сурет 2.7 – ТБТ-ны Т-матрицасының әдісі үшін аймақтарға бөлу

$j$  секциясының кірісі  $u_j$  ж  $v_j$  өрістерін біле отырып, оның шығысында  $u_{j+1}$  және  $v_{j+1}$  өрістерін табуға болады. Осы жағдай транспортты матрица тәсілімен берліген өрнек түрінде көрсетуге болады:

$$\begin{bmatrix} u_j \\ v_j \end{bmatrix} = T_j \begin{bmatrix} u_{j-1} \\ v_{j-1} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

мұндағы

$$T_j = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_j \Delta_j) + i \frac{\delta}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) & \frac{q_j}{\gamma_j} \sinh \gamma_j \Delta_j \\ \frac{q_j}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) & \cosh(\gamma_j \Delta_j) - i \frac{\delta}{\gamma_j} \sinh(\gamma_j \Delta_j) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

мұндағы  $\gamma_j^2 = |q_j| - \delta^2$ .  $u_1, v_1$  және  $u_{N+1}, v_{N+1}$  өрістері сәйкесінше, тордың кірісі мен шығысына жатады. Олар өзара келесі қатыснасты құрайды

$$\begin{bmatrix} u_{n+1} \\ v_{n+1} \end{bmatrix} = T_N * \dots * T_j * \dots * T_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

1) Талшықты брэгг торларының параметрлерін есептеу әдістері мен жабдықтары қарастырылды.

2) ТБТ жазбасының технологиясы, сонымен бірге жұмыс барысында қолданылған жабдықтар мен программалық қамтамасыз ету кезеңдермен қарастырылды.

3) Талшықты брэгг торларының математикалық сиптталуының негізгі әдістері қарастырылды.

Аподизация факторын таңдау – аподизацияны тордың ұзындығына түгелдей емес, тек шеттерінде ғана жүргізсе, онда тордың «тиімді ұзындығы» үлкен болады, яғни тордың дәл сондай ұзындығы мен шағылу коэффициентінде спектрдің аз енін алуға болады. Тор ұзындығының қай бөлігі аподизация

жағдайынада аздап көрсететін шаманы аподизация деп айтамыз. Аподизацияны факторы шамамен 0,5 тор барлық ұзындығы бойынша аподизацияланғанын білдіреді. 0 – тор аподизацияланбаған болады. 0,1 – әрбірінен 0,1 бойынша тордың шеттері аподизацияланған. Аподизация факторының шамасы сайд-лобтар болмаған кезде, минимальды мүмкін. Бұл мәнді анықтау үшін әртүрлі аподизация факторымен бірнеше тор жазылды. Өткізу спектрлері мен тордың шағылуы осы жұмыстың 2.2-қосымшасында келтірілген.

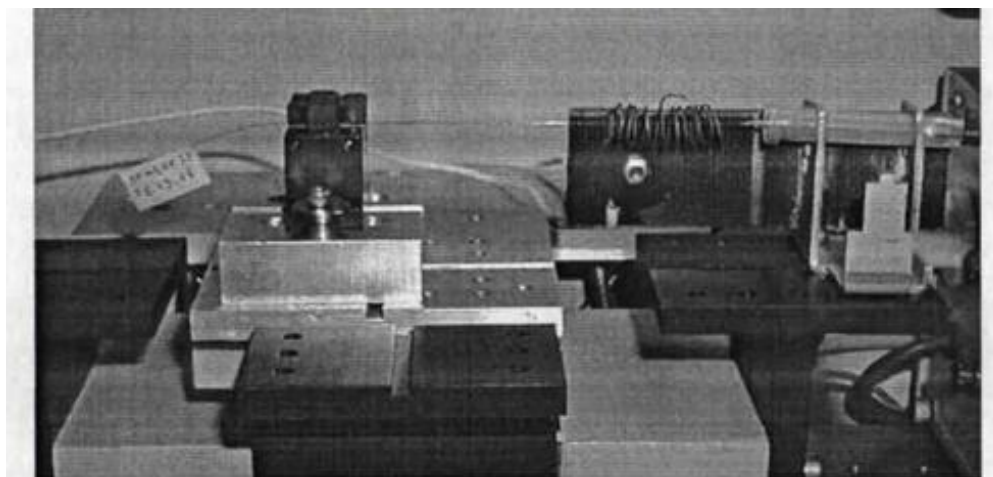
Кесте 2.2 – Әртүрлі аподизация факторымен берілген торлардың сипаттамасын таблицада көруге болады

Торлардың нөмірі	Орталық толқын-ұзындығы, нм	Спектральді ені, нм	Тордың-ұзындығы, мм	Күш, дБ	Тримминг
46	1550,66	0,32	8	-11,2	0,4
47	1550,6	0,23	8	-11	0,3
48	150,61	0,29	8	-13,4	0,2
49	1550,4	0,23	8	-8,1	0,2
50	1550,5	0,25	8	-10	0,2
51	1550,44	0,25	8	-12,2	0,2
52	1550,36	0,26	8	-12	0,1

Өткізу спектрінен көрінетіні ұзындығы 8 мм тор үшін аподизация факторы 0,1 болғанда сайдлобтар қатты көрінеді, осы кезде аподизация факторы 0,2 болғанда, оларды тәжірибе жүзінде толық басып тастайды.

## 2.7. Температураның талшықты-оптикалық датчигі

Полиимидті позиционер негізінде Physik Instruments F206 [20] Брэгг торларына түсіру үшін берілген жылдамдықтағы полиимидті қамтитын шприц инесінен оптикалық талшықты шығаруға мүмкіндік беретін жарақтар дайындалды. Түсірілген қабаттың біртектілігін жақсарту үшін шприцтен шығарылған талшықты қыздыруға мүмкіндік беретін қосымша модуль дайындалған. Нихромды спиральдың температурасы бөлме температурасынан бастап 300<sup>0</sup>С-ге дейін реттеледі.



Сурет 2.8 – Полиимидті түсіруге арналған жарак

Оптикалық талшықта HD Microsystems фирмасының PI2556 маркалы полиимиді салынған [21].

Полиимидті біртекті салу бойынша ең жақсы нәтижелері талшықты ауыстыру жылдамдығын 1 мм/мин мен спиральдің температурасы 100°C болғанда алынған. Алайда мұнда біртектілік көп нәрсені жақсартуды қажет етеді. Сол себепті, толыққанды датчикті жасау үшін талшыққа полиимидті жамылғы салу үшін өнеркәсіптік жабдықтау болуы қажет.

2.8-суретте бейнеленген схема бойынша температураның талшықты-оптикалық датчигінің макеті жинақталған. Температура датчигі ретінде №33 тор пайдаланылған (2.1-кесте). температуралық компенсация үшін №25 тор пайдаланылған (2.2-кесте).

Кесте 2.3 – БТның сипаттамасы

Тор нөмірі	Орталық-толқын ұзындығы, нм	Спектралді ені, нм	Тордың-ұзындығы, мм	Күш, дБ	Трим-минг
25	1549,92	0,29	8	-9,2	0,3

Полиимидтің 8 қабаты тізбекті түрде №33 торға салынған. Әрбір салудан кейін еріткішті буландыру және бөліктеп имидизациялау үшін 100°C температураға дейін қысқа уақыт қыздырылған. Барлық қабаттарды салып болған соң, 200°C температурада имидизациялау жүргізілді. Содан кейін датчиктіте бөлме температурасымен салыстырмалы температурасының өзгерісі (~50%) магистральды сығылған ауа температурасы (~2% RH) және керісінше мәндері өлшенді. Температуралқ компенсация БТ толқын ұзындығының масимум мәні полиимидсіз жабындысы кезіндегі толқын ұзындығының полиимидті торлардың масимум мәнінен шығарылып тастау арқылы қарастырылады. Компенсацияның мұндай қарапайым түрі оның аз қалыңдығы

мен осы тәжірибеде аздаған температура диапазонында полиимид жамылғысын температуралық сызықтық коэффициентін кеңейтуге әсер ететін эффектілерді қарастырмайды.

Burleigh WA 7100 optical Channel Analyzer спектроанализатор пайдалану ерекшелігі БТның толқын ұзындығын оптикалық қуаттың алғашқы мәні бойынша анықтау алгоритмі болып табылады. Спектрдегі көлбеу қызыл сызық төменде осы алғашқы нәтижелерді көрсетеді.

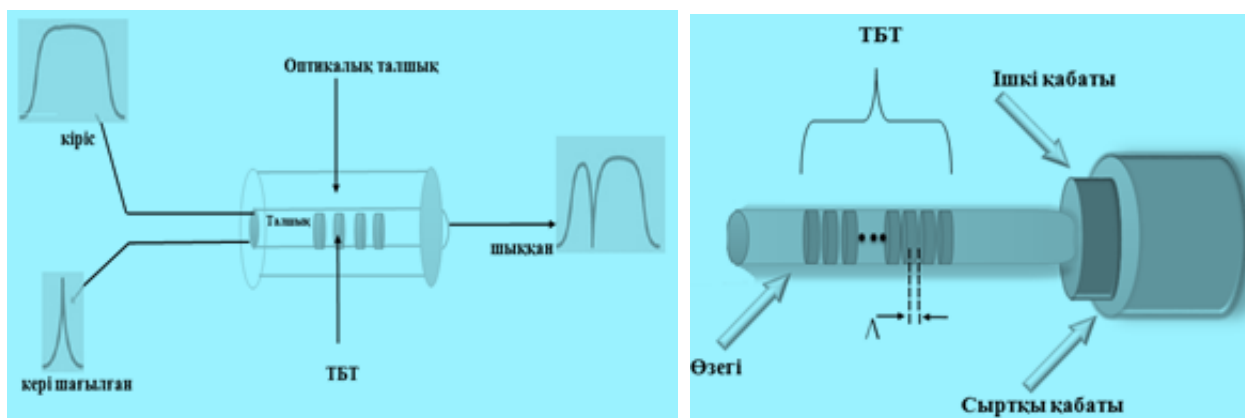
Әрбір жаңа қабат сайын салыстырмасы температурасының, шудың азаюы мен сипаттамалар дрейфіндегі өзгерістерге датчикті әсерінің өсуі байқалды.

### **3 БТ негізіндегі температура датчигі, және оларды жүзеге асыру, бағалау, спектральды сипаттамалары**

БТ негізіндегі температура сенсоры, оларды эксперименталды жүзеге асыру, бағалау және олардың спектральды сипаттамаларын зерттеуді қарастырамыз. Оптикалық талшық оптикалық коммуникацияда, оптоэлектроникада және сенсорларда маңызды рөл атқарады. БТ негізіндегі температура сенсорлары электромагниттік интерференцияға қабілеттілігіне, салмағы аздығына, өлшемі ықшам болуына, тұрақтылығына, икемділігіне, температураға және ауа райының қолайсыздығына тұрақтылығына байланысты қарапайым электрлік сенсорлармен салыстырғанда көптеп кездеседі. Температураның өзгерісінен болатын толқын ұзындығының жоғарғы рұқсатты ығысуын анықтау оптикалық спектр анализаторымен жүзеге асады. БТ негізіндегі температура сенсорлары және бір модальды талшыққа негізделген Мах-Цендер интерферометриялық температура сенсорларының екеуі де толқын ұзындығының Брэгг ығысуын есептеу есебінен қолданылады және зерттеледі. Орындалған зерттеу нәтижелерінен көретініміздей, температура өзгерісіне сезімтал,  $5-70^{\circ}$  температуралық интервалында сезімталдығы  $1-6 \text{ сдт}/0,1^{\circ}\text{C}$ , сондай-ақ Брэгг толқын ұзындығының ығысуы мен температура градустарының көрсеткіштері сызықты болып келеді.

Сыртқы (гибридтік) оптикалық сенсорлар талшықты жарықты сезімтал элементке және сол элементтен тасымалдау механизмдеріне ғана қолданылады және осы ретте ішкі оптикалық сенсорлар оптикалық талшықты сезімтал элементтің өзі ретінде қолданылады. Бұл жұмыста БТ негізіндегі температура сенсоры температура сенсоры ретінде пайдаланылып, оның спектральды сипаттамасы басқа температура сенсорларының жұмыс істеу қағидаларымен салыстырылып зерттелген және де олар жарықты тар диапазондағы толқын ұзындығымен шағылыстырады.

Бірден бір көптеп қолданылатын оптикалық сенсорлар ТБТ болып табылады, ол жарық сәулесінің толқын ұзындығын шағылыстырады. Ол сондай-ақ температура өзгерісіне байланысты ығысады немесе деформацияланады. БТ негізіндегі температура сенсорлары голосұлба алық интерференцияларды қолданумен құрылған, себебі сезімтал талшықтың қысқа толқынын жарық сәулесінің интенсивтілігімен таралуына сәйкестендіру қажет. Талшықтың сыну көрсеткіші жарық интенсивтілігімен тұрақты өзгереді, бұл процесс талшықты БТ деп аталады және 3.1-суретте келтірілген.



а)

б)

Сурет 3.1 – БТ негізіндегі температура датчигінің операциясы мен оның кеңейтілген бейнесі

Кеңейтілген спектрлі жарық сәулесі талшықты БТна жіберілген кезде, сыну көрсеткіші айнаымалысының әр сегменттен берілетін шағылысуы жарық сәулесінің белгілі бір толқын ұзындығына ғана көрінеді. Бұл Брэгг толқын ұзындығы алдағы теңдеуде қарастырылады. Брэгг толқын ұзындығы ( $\lambda$ ) функциясы болып табылатындықтан, торлар арасындағы интервал тор периоды болып табылады. ТБТ түрлі толқын ұзындықтарымен жасалады. Деформацияның және температураның өзгерісі сынудың  $n$  эффективтік көрсеткішіне көрінеді. Бұл шағылысқан толқын ұзындығының ығысуына әкеледі. Деформация және температура әсерінен талшықты БТн шамамен мына теңдеулермен сипаттауға болады:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + \alpha_\delta \Delta T \quad (3.1)$$

$\lambda_B$  – Брэгг толқын ұзындығының ығысуы,  $k$  – беріктік коэффициенті және ол 1-р мәніне тең болады, мұндағы  $p=0.22$ ,  $k=0.78$ ,  $\varepsilon$  – кернеу,  $\alpha_\delta$  – сыну көрсеткішінің өзгерісі,  $\Delta T$  – температура өзгерісі.

Бірінші өрнек толқын ұзындығындағы кернеудің әсерін қарастырады, екінші өрнек толқын ұзындығының ығысуындағы температураның әсерін суреттейді. Себебі талшықты БТ кернеуге де температураға да бірдей жауапты, температура сенсоры үшін талшықты БТ кернеусіз қалады. Талшықты оптикалық интерферометриялық сенсорлар өздерінің арнайы спектрлік сипаттамаларымен кең таралған. Мах-Цендер интерферометриялық температура сенсоры екі сәуле арасында интерференциялық эффектпен жұмыс істейді және түрлі оптикалық тракт бойынша бір талшық және екі әртүрлі талшықтар арқылы таралады. Сәуленің бөлінуі және компоненттердің бірігуі талшықты-оптикалық интерферометрлердің кез-келген конфигурациясында талап етіледі. Жіберілетін сәуле талшық бөлгіш арқылы екі қанатқа бөлінеді, олар сезімталдық және



тіректік қол ретінде қызмет етеді. Температураға сәйкес келетін фаза ығысуын келесі теңдеуден алуға болады:

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right] \quad (3.2)$$

мұндағы  $d\varphi$  – фазалық ығысу,  $\lambda$  – жарықтың толқын ұзындығы,  $n$  – сыну көрсеткіші,  $dT$  және  $dL$  температура және сәйкес ұзартылуы,  $L$  – талшықты толқын ұзындығы.

$$\alpha = \frac{dL}{dT} \text{ and } \beta = \frac{dn}{dT} \quad (3.3)$$

мұндағы

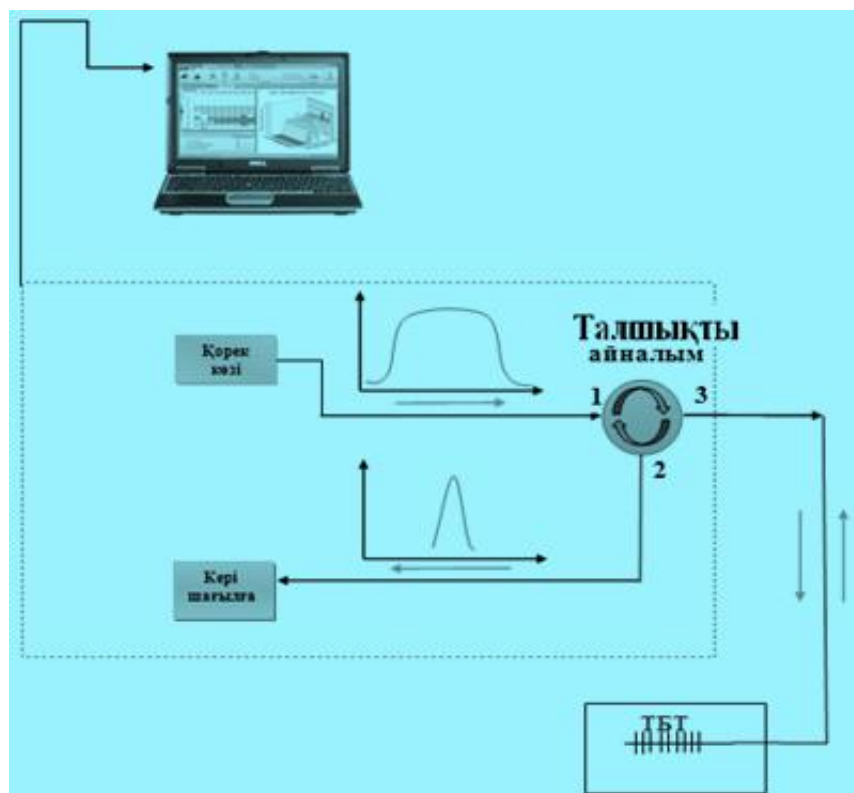
$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} L (n\alpha + \beta) \quad (3.4)$$

Мұнда  $\alpha$  – жылулық кеңеюі,  $\beta$  – жылулық-оптикалық коэффициент. Жоғарыдағы теңдеуге сәйкес, сыну көрсеткішінің өзгерісі төмендегі теңдеумен берілген:

$$dn = \frac{\lambda}{2\pi L} d\varphi - n\alpha dT \quad (3.5)$$

### 3.1 Талшықты БТна негізделген сенсордың сипаттамасы

ТБТ сенсорын сипаттау үшін, бір модальды оптикалық талшықты лазерлік диод, толқынның орташа ұзындығы (1530 нм- 1548 нм), шығыс қуаты шамамен 1,59 мВт, шығыс ток шамамен 29,4 мА, оптикалық талшықты циркулятордың кіріс терминалына қосылған. Осы кезде таратқыш терминал талшықты БТна қосылған, ол микропроцессормен басқарылатын су ваннасы бойлерінде пайда болады, температура диапазоны:  $(0-100)^\circ \text{C}$ , циркулятордың үшінші терминалы арқылы шағылған сигнал монохроматорға/спектрограф (Zolix DlnGaAs1700 InGaAs Detector) жалғанған, моделі Omni- $\lambda$  сериялары, фокустың арақашықтығы 500 (мм). Эксперименттік жұмыстың толық блок-сұлба сы 3.2- суретте келтірілген.



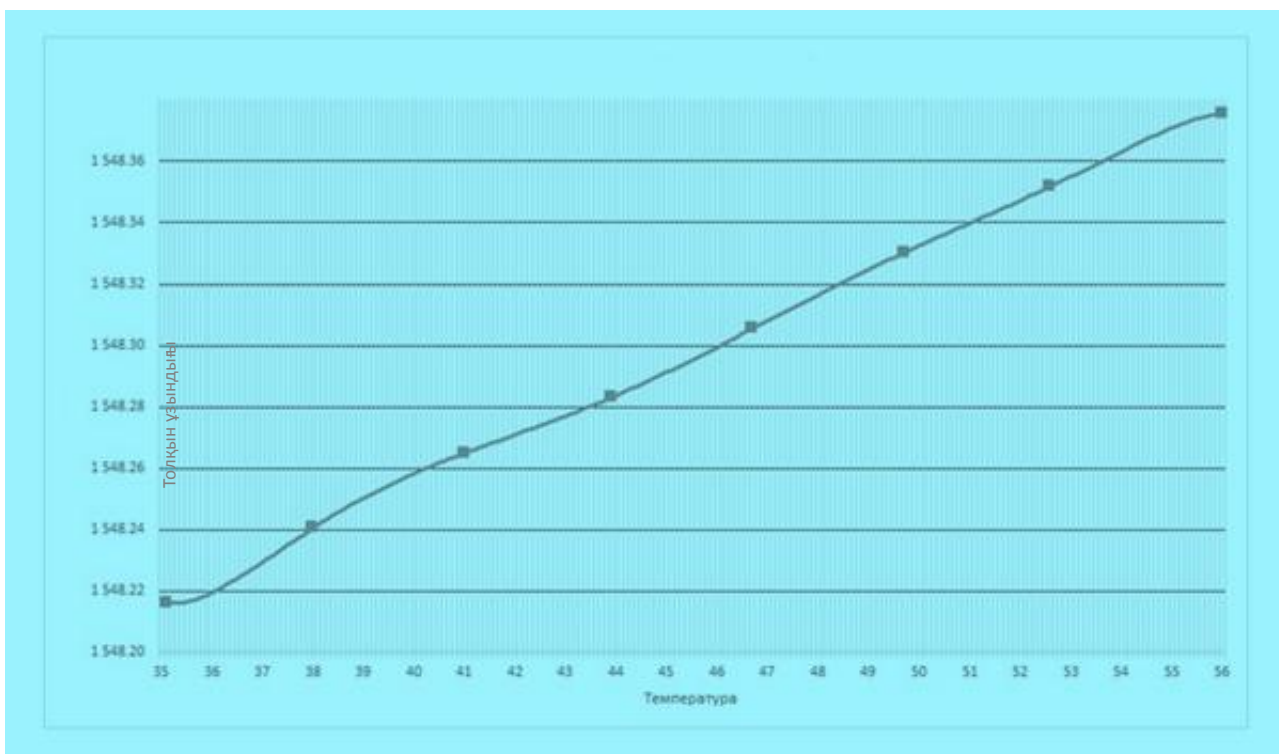
Сурет 3.2 – ТБТ температуралық датчигінің құрылым блок сұлба сы

Сынақтан ТБТ-ны өткізу үшін ваннадағы су температурасы алдымен (5-70)°С аралығында 5°С қадаммен жоғарылап отырады, (70-35)°С аралығында 5°С қадаммен төмендеп отырды.

Брэгг толқын ұзындығы өткізу спектрінің нөлдік аймағының орталығы ретінде алынған. Спектрлік жауап ретінде (толқын ұзындығы ығысуы және температураның өзгерісі функциясы ретіндегі ТБТ шағылысу сигнал амплитудасы) оптикалық спектр анализаторын қолдану белгіленген. Температураға байланысты резонанстың Брэгг толқын ұзындығы байқалған.

Температураның өсуімен ТБТ резонанстық толқын ұзындығының ығысуы 0,0091 нм С<sup>-1</sup> арқылы өлшенді. Екінші теңдеуден күтілген сезімталдылық 1548 нм-лік БТ үшін шамамен 13,7 мкм °С -ге тең.

БТның толқын ұзындығының ығысуының температураға тәуелділігінің эксперименттік нәтижелері 3.3-суретте келтірілген.



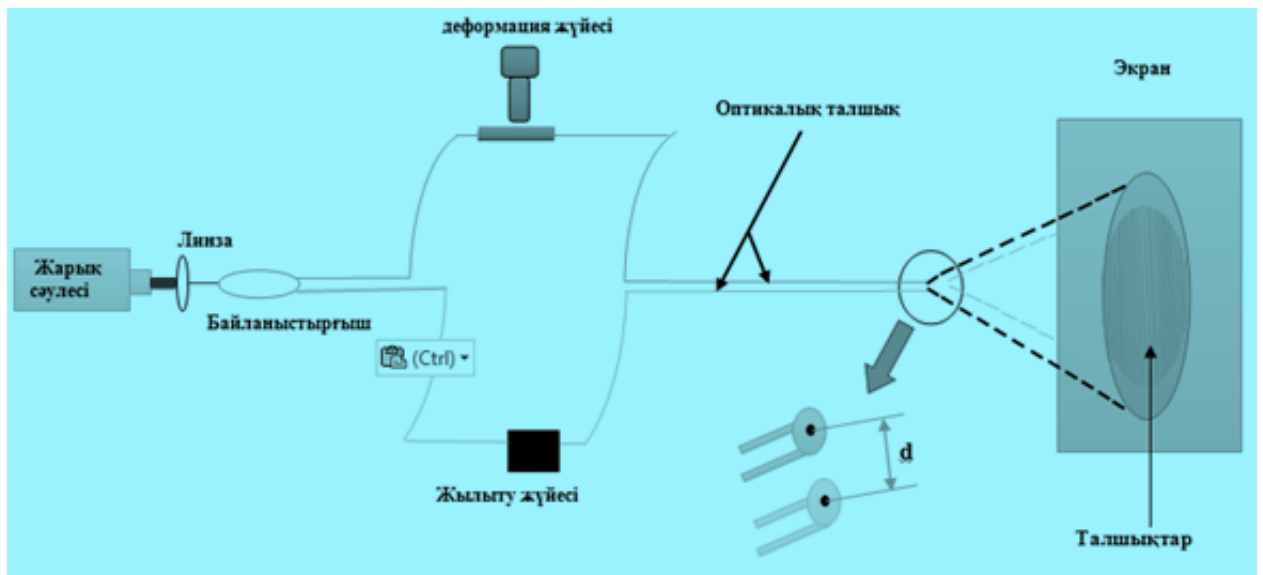
Сурет 3.3 – БТ шағылысу түрлі температурадағы ең жоғарғы шыңы

Тор спектрі түрлі температураларда белгіленген. Нақты толқын ұзындығы спектрден таңдаған, кестеде келтірілгендей температураның өзгерісін таратудың сәйкес өзгерісімен шағылысқан, таңдалған 1546-1556 нм толқын ұзындықтарында ТБТ 5-65°C температуралық диапазон аралығында температуралық сенсор ретінде қолданылады. Бұл осындай сенсор үшін калибрлік қисық ретінде жүзеге асырылуы мүмкін.

Кесте 3.1 – Температура өзгерісімен Брэгг толқын ұзындықтарының мәндері

T ° C	$\lambda_B$ nm	T ° C	$\lambda_B$ nm	T ° C	$\lambda_B$ nm
6.8	1548.3462	30	1548.3462	56	1548.3462
10	1548.3462	35	1548.3462	60	1548.3462
15	1548.3462	40	1548.3462	65	1548.3462
20	1548.3462	45	1548.3462		
25	1548.3462	50	1548.3462		

Үлкен температураны қолдану үшін ТБТ-ның түрлі толқын ұзындықтарын қолдану қажет. Температураның өзгерісі детектор көмегімен өлшенеді, спектрдің бір анализаторымен бір толқын ұзындығы көзі қолданылады. Бұл эксперименттің блок-сұлба сы 3.4-суретте келтірілген.



Сурет 3.4 – ТБТ негізіндегі датчиктің эксперименттік блок сұлба сы

Сынақтан өткізу үшін қолданылған сенсорда алдымен қоршаған ортаның 35-тен 56-қа<sup>о</sup>С температурасымен 5<sup>о</sup>С қадам арқылы өзгерісі алынды. Сыну көрсеткішіне қатысты фаза айырмасы теңдеуге сәйкес және 3.2-кестеде келтірілген.

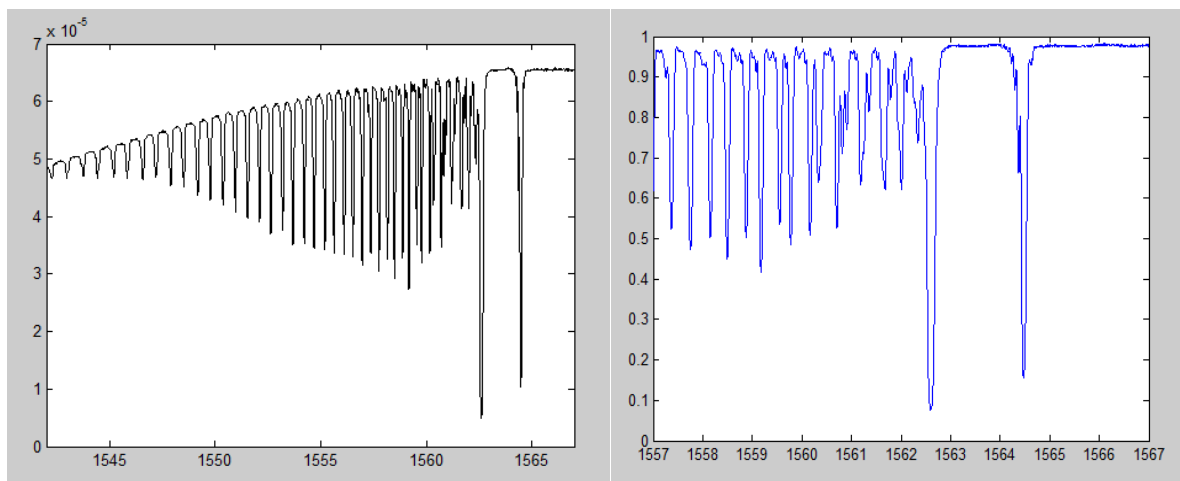
Кесте 3.2 - Температураның сыну көрсеткішінің өзгерісіне байланысты фаза айырмасына әсері

T <sup>о</sup> C	$\Delta \phi * 2\pi$	d n	T <sup>о</sup> C	$\Delta \phi * 2\pi$	d n
35	9.50	1.6211	47	43.75	7.6434
38	17.5	3.0111	50	48.75	8.5226
41	24.75	4.3026	53	53.50	9.4017
43	31.50	5.4895	55	57.50	10.061
44	38.25	6.6763	56	61.25	10.721

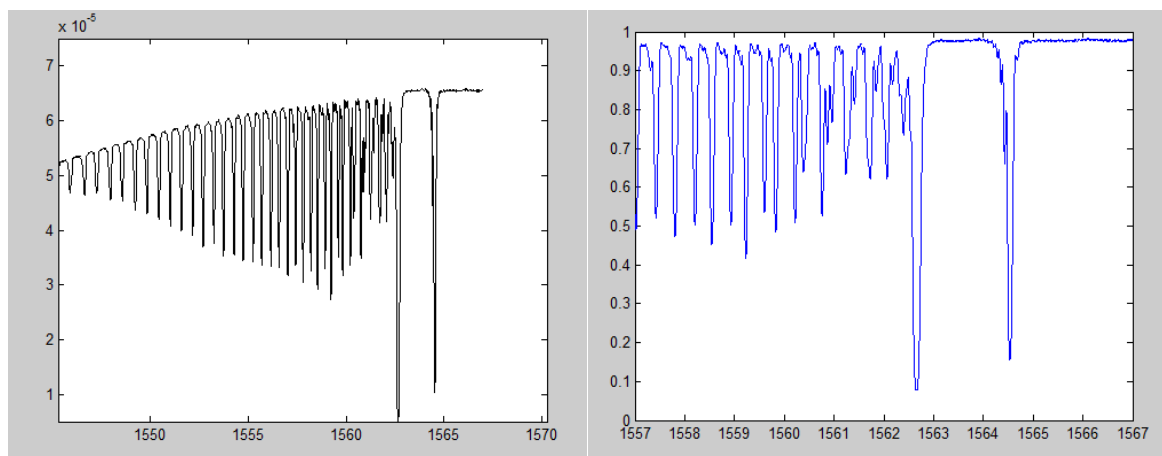
Температура мәнінің фаза айырмасына қатынасы сызықты байланыста болуы тиіс және сыну көрсеткішіне байланысты өзгереді. Суретте қарастырылғандай калибрлік қисық осындай сенсор үшін сезімталдық қисығы ретінде қолданылуы мүмкін. [18]

Бұл сұлба тер Брэгг торларының қисықтарының спектрлік трансмиссиялық сипаттамаларынан тұрады. Торлардың бұл қисықтары талшық өсінің ұзындығына дейінгі 2 градуспен иілген. Қара сұлба терде «х» өсінде толқын ұзындықтары тор арқылы нанометрлік өлшемде өтеді, ал «у» өсінде шығыс сигнал ваттпен көрсетіледі. Көк сұлба терде «у» өсінде қалыпқа көрсетілген шығыс сигнал, ал «х» өсінде кіріс толқындардың ұзындығы қарастырылған. Бұл

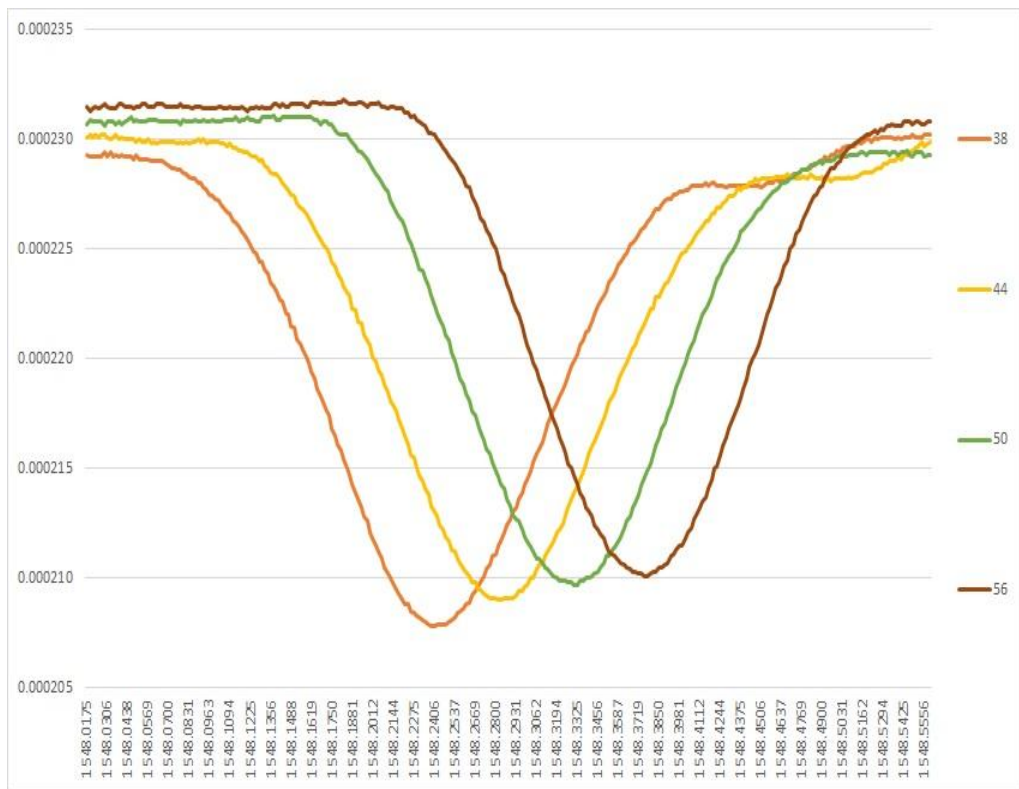
сұлба температураны ұлғайтатын спектрлер келтірілген, ал оларда торлар орналасқан. Бұл зерттеліп отырған бөлімде қара сұлба көрсетіліп отырған қарапайым оптикалық талшық болса, ал көк сұлба БТ жазылған кездегі бейнесі.



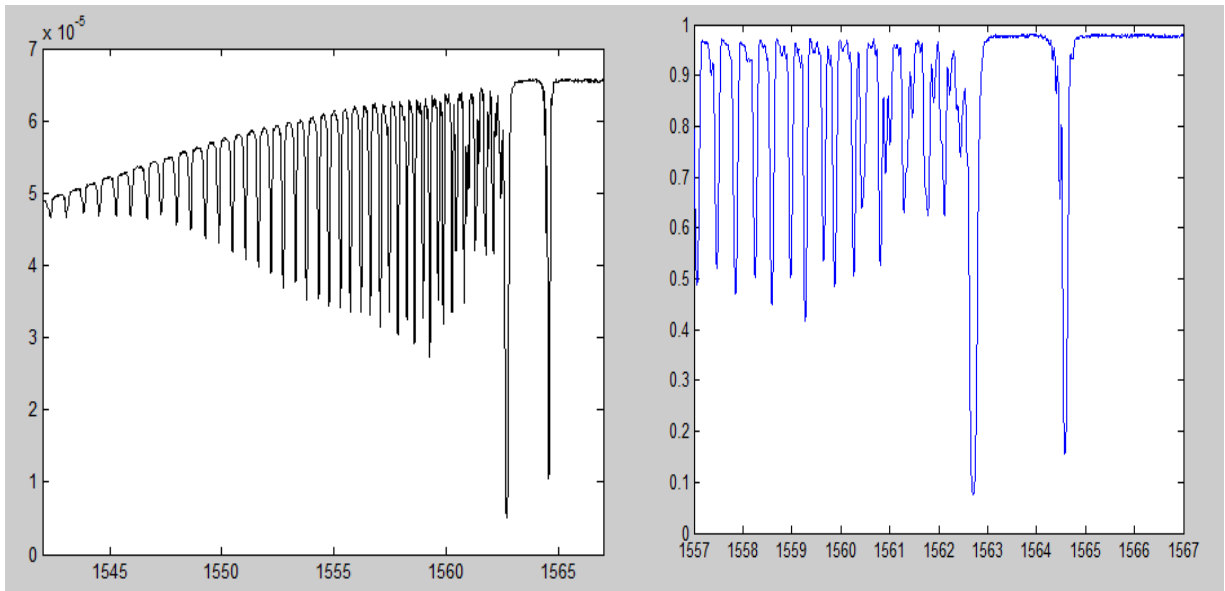
Сурет 3.5 – Оптикалық талшықты Брэгг торларының спектралды трансмиссиялық сипаттамалары, бет 1



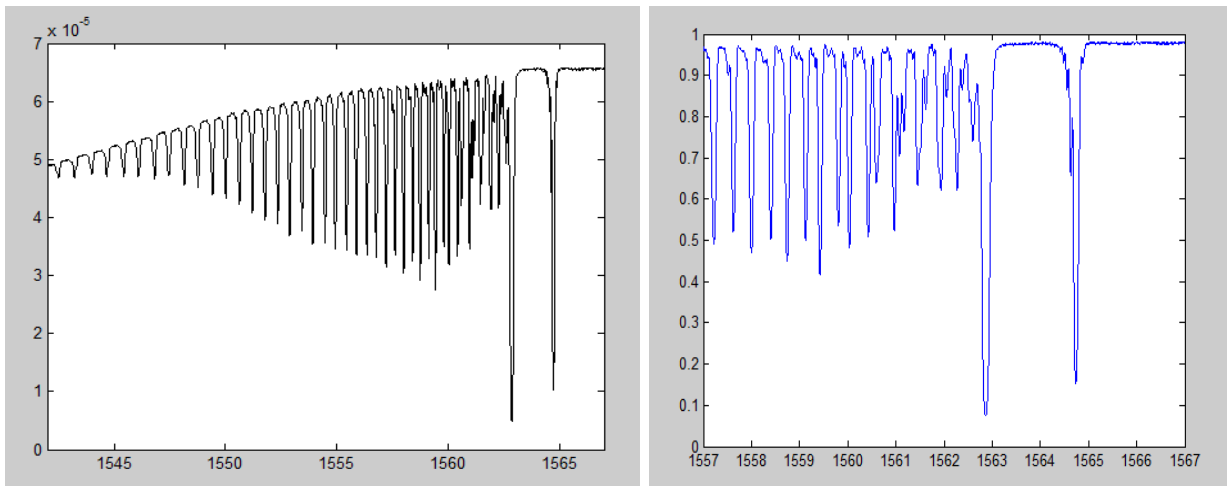
Сурет 3.6 – Оптикалық талшықты Брэгг торларының спектралды трансмиссиялық сипаттамалары, бет 2



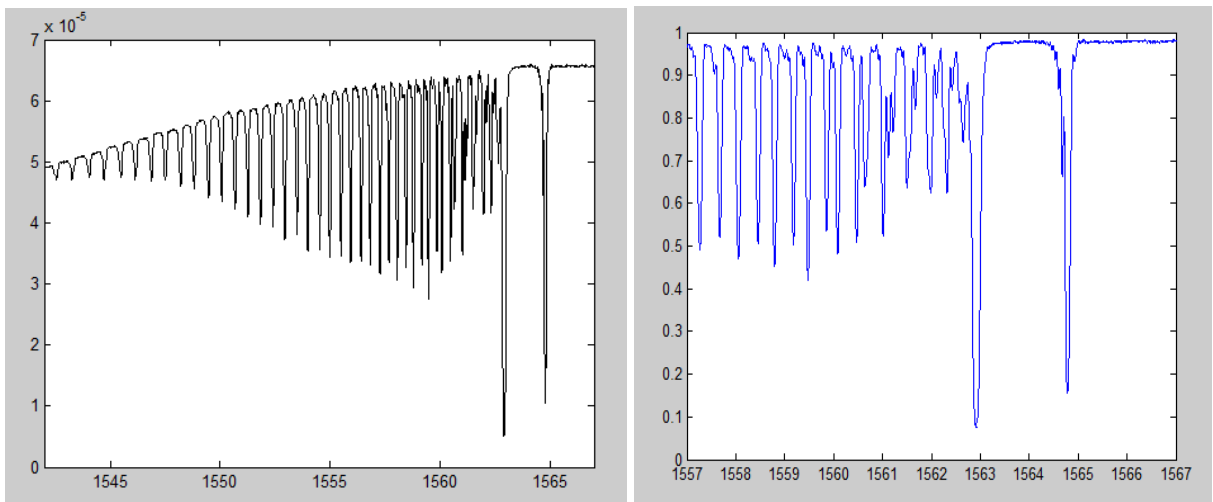
Сурет 3.7 – 38<sup>0</sup> С, 44<sup>0</sup> с, 50<sup>0</sup> , 56<sup>0</sup> градус аралығындағы сұлба



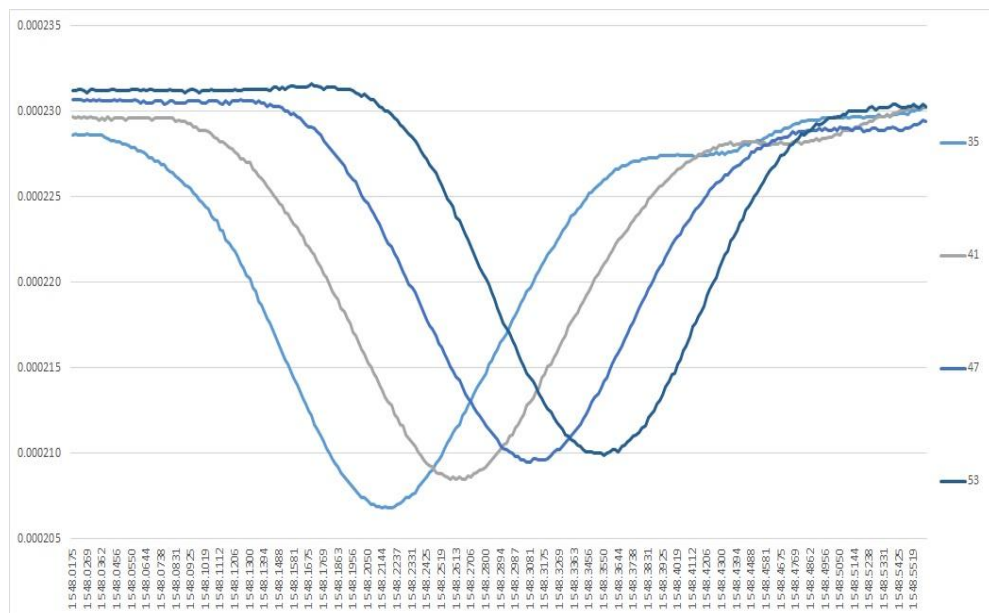
Сурет 3.8 – Өзгеріс графигі



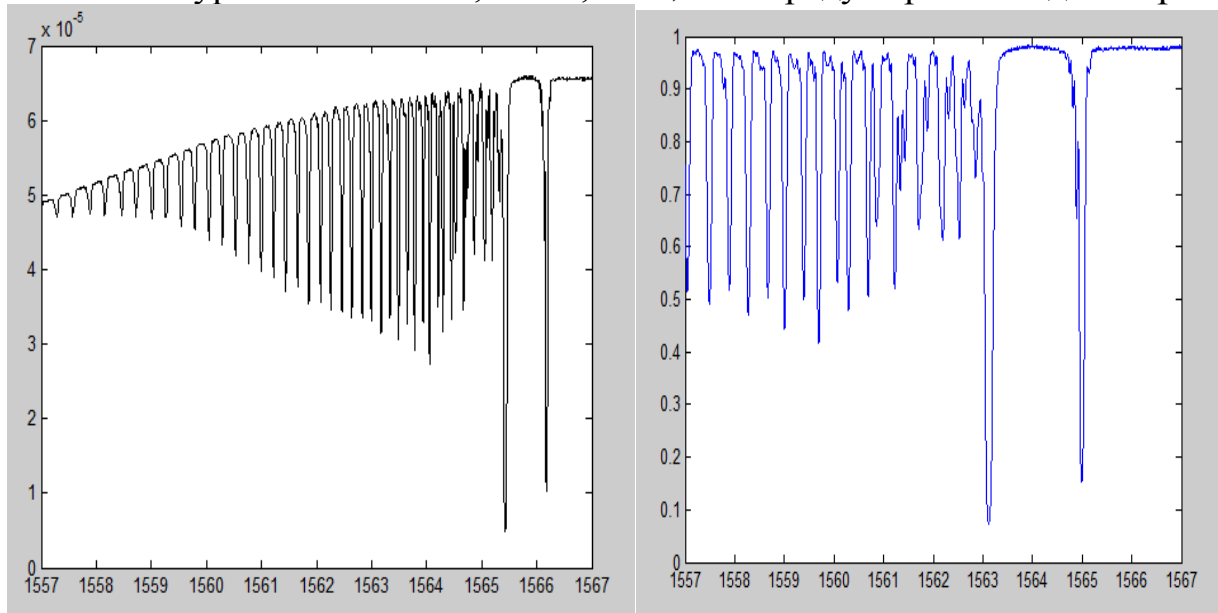
Сурет 3.9 – Әртүрлі аралықтағы өзгеріс сұлба тері, бет 1



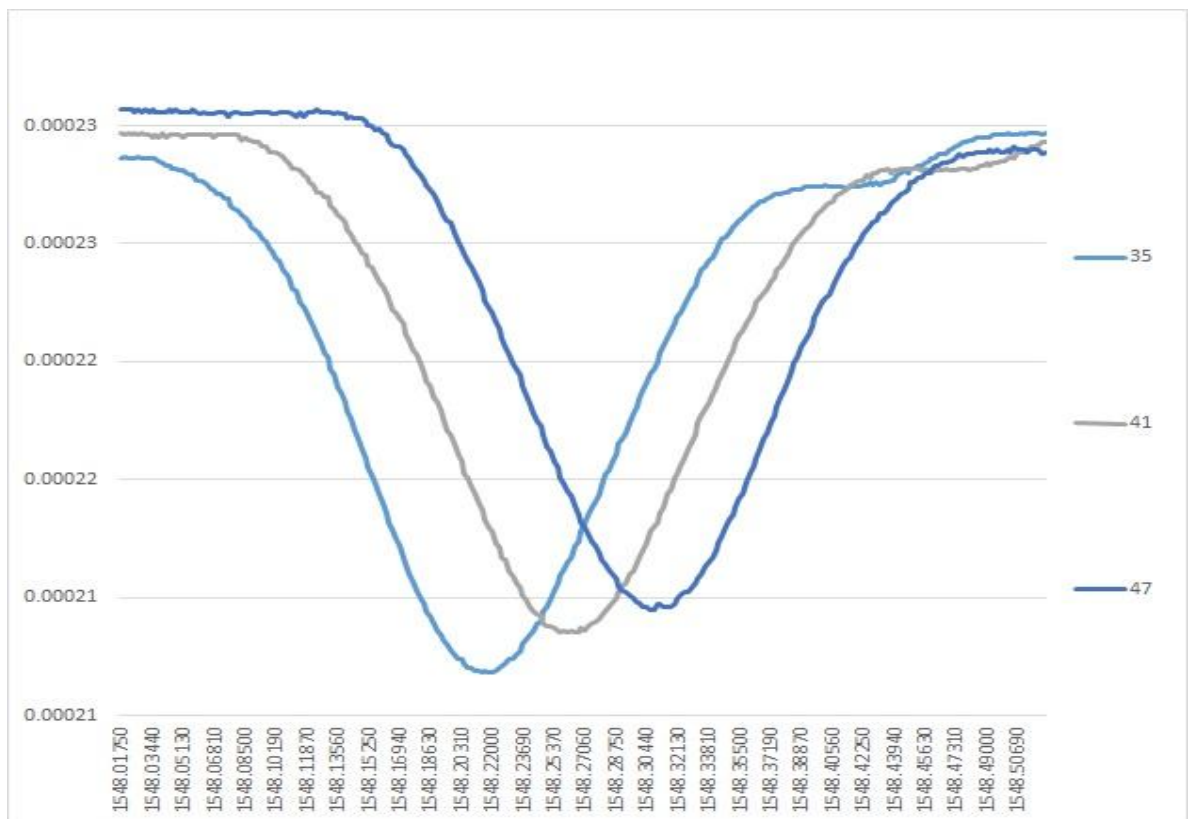
Сурет 3.10 - Әртүрлі аралықтағы өзгеріс сұлба тері, бет 2



Сурет 3.11 -  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $41^{\circ}\text{C}$ ,  $47^{\circ}\text{C}$ ,  $53^{\circ}\text{C}$  градус аралығындағы сұлба

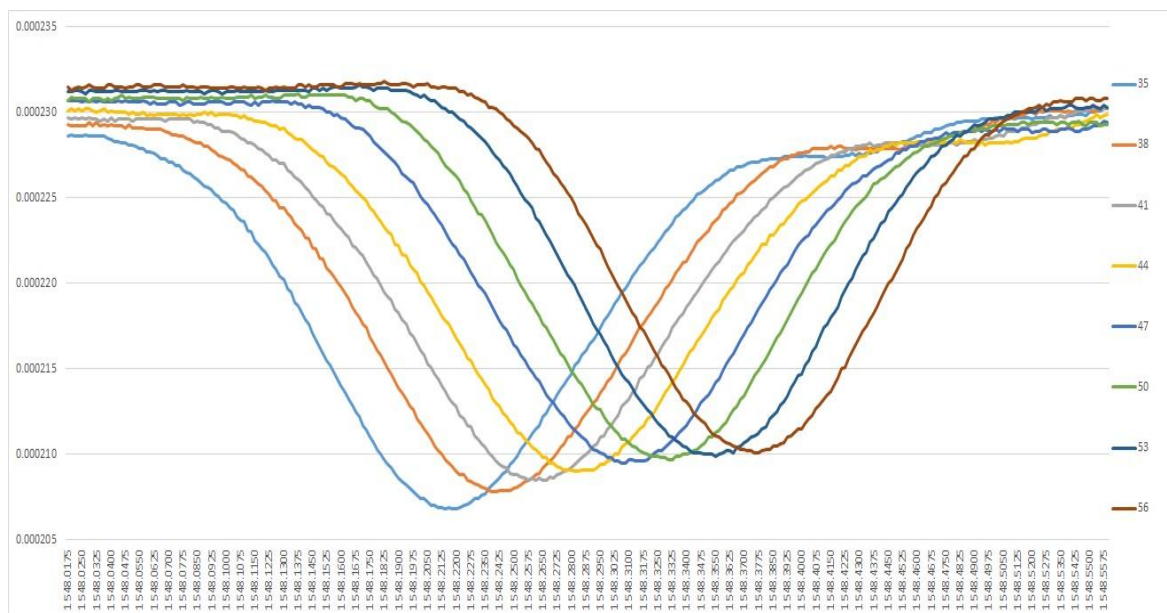


Сурет 3.12 - Өртүрлі аралықтағы өзгеріс сұлба тері



Сурет 3.13 -  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $41^{\circ}\text{C}$ ,  $47^{\circ}\text{C}$  градус аралығындағы сұлба





Сурет 3.14 - 35<sup>0</sup> С, 38<sup>0</sup> с, 41<sup>0</sup> , 44<sup>0</sup> , 47<sup>0</sup> , 50<sup>0</sup> , 53<sup>0</sup> , 56<sup>0</sup> градус аралығындағы оптикалық талшықты БТнан өткен сәулелердің спектрлік сипаттамаларының температуралық тәуелділік графигі

Температура датчигі ретінде талшықты БТ қарастырылды және олар дәстүрлі әдістерге қарағанда көп артықшылықтарымен ерекшеленеді. ТБТ шағылысу немесе өткізу спектрін алу үшін сипатталады. ТБТ температуралық сенсор ретінде қолданылуы үшін (35-65)<sup>0</sup>С диапазон аралығында пайдаланылды. Қолданылып отырған талшықты БТ осы жұмыста температураның өзгерген деңгейлеріне сезімтал болып келеді, алынған температура көрсеткіштерімен Брэгг толқын ұзындықтарының ығысуы сызықты байланыста болады. Брэгг толқын ұзындығының температураға сезімталдығы оптикалық талшықтың сыну көрсеткіші өзгерісі есебінен болады. [21]

Үшінші бөлім бойынша тұжырым - бөлімде бір импульсті эксимерлі лазермен фазалық маска әдісін пайдаланып, оптикалық талшыққа БТн жазу әдісі қарастырылды. Полимерлі қорғаныс қабатын алмастан ультракүлгін сәулелермен сыну көрсеткіштерінің торын жазу әдістерінің тиімділігі төмен. Солардың бірі дәстүрлі жазу диапазондарына (300-364 нм) қарағанда жақын ультракүлгін диапазонда (244-248 нм) стандартты полимерлі қорғаныс қабаты едәуір мөлдір болғандығына негізделген. Бірақ, бұл талшықтың фотосезімталдығы үлкенболуы үшін тағы да қосымша химиялық элементтерді легирлеуді (қосуды) талап етеді.

Жарық шоғыры кеңістіктік бөлу арқылы жазылған ТБТ интерферометрлік сұлба сымен салыстырғанда оптикалық элементтер санының аз болуынан берілген сұлба едәуір тұрақты болады. Берілген сұлба ның кемшілігі оптикалық сәулеленудің кеңістіктік когеренттілікке үлкенталап қойылуында болып тұр, себебі жарық шоғырының әртүрлі нүктелерінен шыққан сәулелер интерференцияланады.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Бөлімдерде қарастырылған қадамдау әдісі тордың жеке әр штрихтарында еркін профиль жасауға және жалпы бағытталған сыну көрсеткіштің барлық амплитудалық таралуына мүмкіндік береді, сонымен қатар ФМ қолданбастан ұзындық бойымен айнымалы период арқылы ТБТ чирп жасауға болады. Бірақ, қадамдау әдісінің бірнеше кемшіліктері бар: оптикалық талшық бойымен фокустелген сәулеленуді прецизионды механикалық келтіру қажеттігі және тордың жеке импульстермен сыну көрсеткішінің жазылуы мүмкін емес.

Сонымен қатар, талшықты БТның жазылуының арнайы әдістері, атап айтқанда, біримпульсті және көпимпульсті жазылуы қарастырылды. Оптикалық-талшықты Брэгг торларының жазбасы, бірыңғай ТБТ спектрінде бүйір максимумдары бақыланды, олардың күйі торлар ұзындығымен анықталған.

Үшінші бөлімде көп импульсті экспозициясы кезінде I типті Брэгг талшықты торлардың өсу динамикасы мен үлкенретті Брэгг резонанстық сыну көрсеткіші қарастырылған. Мультиплекстеудің WDM принципі әрбір сенсорлық элементті өзінің жеке периодымен жазылатындығына негіздейді, бұл сараптама кезінде спектрі бойынша оларды ажыратуға және сәйкесінше әрбір сенсордың жеке көрсеткіштерін бекітуге мүмкіндік береді. Массивтегі сенсордың көлемі, негізінен көздің спектрлі ені мен анализатордың динамикалық диапазонымен шектеледі.

БТ негізіндегі температура сенсоры, оларды экспериментальды жүзеге асыру, бағалау және олардың спектральдық сипаттамаларын зерттеу кеңінен қарастырылған. Кеңейтілген спектрлі жарық сәулесін талшықты БТна жіберген кезде сыну көрсеткіші айнымалысының әр сегменттен берілетін шағылысуы жарық сәулесінің белгілі бір толқын ұзындығында ғана көрінеді қолданылып отырған талшықты БТ температураның өзгерісіне сезімтал. Алынған температура көрсеткіштерімен Брэгг толқын ұзындықтарының ығысуы сызықты байланыста болады. Брэгг толқын ұзындығының температураға сезімталдығы оптикалық талшықтың сыну көрсеткіші есебінен жүзеге асады.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Thursby G., Culshaw B., Betz D.C. Multifunctional fibre optic sensors monitoring strain and ultrasound. 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 Kesavan<sup>1,?</sup>, b arun sundaram<sup>1</sup>, A k farvaze ahmed<sup>1</sup>, s parivallal<sup>1</sup>, pbiswas<sup>2</sup>, S bandyopadhyay<sup>2</sup>, k ravisankar<sup>1</sup> and umesh tiwari<sup>3</sup> 1CSIR-Structural Engineering Research Centre, Council of Scientific and Industrial Research, Chennai 600 113, India 2 Central Glass and Ceramic Research Institute, Council of Scientific and Industrial Research, Kolkata 700 032, India 3 Central Scientific Instruments Organization, Council of Scientific and Industrial Research // Chandigarh 160 030. K kesavan<sup>1,?</sup>, ((документ14) Sa.dhana. - 2015. - Vol. 40, part 2. - P. 577-590 // kesavankannan@yahoo.com MS 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 Prabhu Institute 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](http://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 брэгговские 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 Smelser C.W., Bilodeau F., Malo B., Grobncic D., Mihailov S.J. Novel phase mask Apparatus for 'Through the Jacket' inscription of FBG's in unloaded SMF-28 fiber // OSA/BGPP. - 2010. - №11. - P. 3.
- 16 Becker M., Bergmann J., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Schuster K., Kobelke J., Unger S., Bartelt H., Fernandes L.A., Marques P.V.S. Fiber Bragg Grating Inscription with DUV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference // Proc. of SPIE. - 2009. - Vol. 16, №23. - P. 19169-19178.
- 17 Федоринин В.Н., Сидоров В.И. Поляризационные оптические датчики для измерений физических величин // Журн. аналит. химии. - 2005. - Т. 55, №7. - С. 511.
- 18 Slattery S.A., Nikogosyan D.N., Brambilla G. Fiber Bragg grating inscription by high-intensity femtosecond UV laser light: comparison with other existing methods of fabrication // J. Opt. Soc. Am. B. - 2005. - Vol. 22, №2. - P. 354-361.
- 19 Nolte S., Thomas J., Voigtlander C., Becker R., Richter D., Tunnermann A. Femtosecond Laser Induced Fiber Bragg Gratings - Status and Prospects // OSA/BGPP. - 2010.
- 20 Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические датчики: учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 79 с.
- 21 Fang X., He X.Y., Liao C.R., Yang M., Wang D.N., Wang Y. A new method for sampled fiber Bragg grating fabrication by use of both femtosecond laser and CO2 laser // Opt. Express. - 2010. - Vol. 18, №3. - P. 2646-2654.
- 22 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.
- 23 Wojcik 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.

24 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. - №4. - P. 62-67.

25 Wojcic W., Жунусов К.Х., Смайлов Н.К. Исследование спектральной характеристики оптоволоконных датчиков температуры // Вестник КазНИТУ Технические науки. - Алматы, 2016. - №1(113). - С. 293-297.

26 Wojcic W., Жунусов К.Х., Смайлов Н.К. Брэггторынан жасалған температура сенсорларының сипаттамаларын зерттеу "Конкурентоспособность технической науки и образования" Посвященные 25-летию Независимости Республики Казахстан // Халықаралық Сәтбаев оқуларының еңбектері. - Алматы, 2016.

27 Ibrayev A.T., Smailov N.K. Study parameters of fiber optic temperature sensors // Научно - информационный центр "знание" сборник статей XX международная конференция "развитие науки в XXI веке". - Харьков, 2016. - Ч.1. - С. 5-8.