

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЖОҒАРЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Тлеуов Қажымұрат Абделұлы

«Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу қателігін талдау»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering  
білім беру бағдарламасы

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЖОҒАРЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

**ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ**  
Кафедра меңгерушісі  
*[Signature]* Е. Таштаған  
«03» 06 2023 ж.

### ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу кателігін талдау»  
6B07104 – Electronic and Electrical Engineering  
білім беру бағдарламасы

Орындаған:

*[Signature]*

Қ.А. Тлеуов

Рецензия беруші

PhD доцент

Ф. Даукеев атындағы Алматы энергетика және  
Байланыс университеті

Алмуратова Н.К.

«02» 06 2023 ж.



Ғылыми жетекші

PhD докторы

ассоциат-профессор

Н.К.Смайлов

«02» 06 2023 ж.



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ЖОҒАРЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering  
білім беру бағдарламасы



**Дипломдық жұмыс орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы Глеуов Қажымұрат Абделұлы

Тақырыбы «Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу кателігін талдау».

Университет ректорының «23» қараша 2022ж. № 408-П/Ө бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» сәуір 2023ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1. Оптикалық аспаптарға арналған телескопиялық жүйелер. Ажыратымдылық шегін анықтаудың көрнекі әдісі ГОСТ 15114-78. 3. ГОСТ Р ISO 13694-2010 мәтіні Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Лазер сәулесінің қуаттылық (энергия) тығыздығының таралуын өлшеу әдістері. 2. ГОСТ Р ISO 13694-2010 мәтіні Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Лазер сәулесінің қуаттылық (энергия) тығыздығының таралуын өлшеу әдістері. 3. ГОСТ Р ISO 11551-2015 Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Оптикалық элементтермен лазерлік сәулеленудің жұтылу коэффициентін өлшеу әдістемесі.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Талшықты Брэгг торы негізіндегі датчиктер

б) Брэгг торының жазу динамикасын және параметрлердің әсерін зерттеу, олардың қасиеттері

в) Талшықты Брэгг торлары көмегімен жүргізілетін есептеулер

г) Optisystem бағдарламасының көмегімен өлшеу кателігін талдау

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

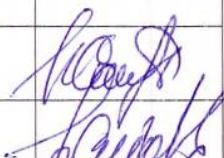
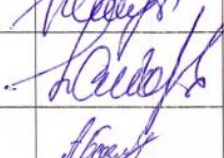

1. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // Results in Physics. – 2019. – V. 15. – P. 102542
2. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap. – San Diego, CA: Academic Press. – 1999. – 478 p.
3. Васильев, С. А. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С. А. Васильев, О. И. Медведков, И. Г. Королев, А. С. Божков, А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085-1103.
4. Free Space Optical Communication © 2017, Authors, Hemani Kaushal, V.K. Jain, Subrat Kar

Дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау

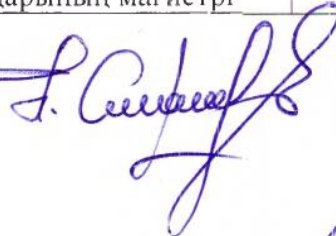
**КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Талшықты Брэгг торы негізіндегі датчиктер	07.02.2023	Орындалды
Брэгг торының жазу динамикасын және параметрлердің әсерін зерттеу, олардың қасиеттері	24.03.2023	Орындалды
Талшықты Брэгг торлары көмегімен жүргізілетін есептеулер	20.04.2023	Орындалды
Optisystem бағдарламасының көмегімен өлшеу кателігін талдау	26.04.2023	Орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Смайлов Н.К. ЭТЖҒТ каф.қауым.проф.PhD докторы.		
Теориялық ақпарат	Смайлов Н.К. ЭТЖҒТ каф.қауым.проф.PhD докторы.		
Норма бақылау	Базарбай А.М. техника ғылымдарының магистрі		

Ғылыми жетекшісі



Смайлов Н.К.  
ЭТЖҒТ  
каф.қауым.проф.PhD  
докторы

Тапсырманы орындауға алған білім алушы



Тлеуов Қ.А.

Күні

«22» желтоқсан 2022 ж.

## АНДАТПА

Дипломдық жұмыс талшықты Брэгг торы негізіндегі есептеулер мен өлшеу қателіктерін зерттеуге арналды.

Дипломдық жұмыста талшықты Брэгг торларының тарихына, қолдану салаларына шолу жасалынды. Сонымен қатар олардың жұмыс жасау принциптері, қолданылатын сенсорлар мен қолдану маңызы және талшықты Брэгг торларының артықшылықтары мен кемшіліктері жайлы әдеби шолу жасалынды. Жұмыс барысында талшықты Брэгг торының сыртқы орта әсеріне тәуелділігі және талшықты Брэгг торларының заманауи модельдерімен таныстырылды. Олардың артықшылықтары мен кемшіліктеріне сараптама жасалынды.

Дипломдық зерттеу барысында, талшықты Брэгг торына сыртқы ортаның яғни температураның әсері зерттелінді. Брэгг торының көмегімен зерттелінді. Модельдеу арқылы өлшеу қателіктерінің көздерінің табиғаты, себебі мен оларды шешу жолдары қарастырылды. Дипломдық жұмыстың тәжірбиелік бөлімінде жоғарыда аталған мәселер мен оларды шешу жолдары қарастырылды.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа была посвящена изучению расчетов и погрешностей измерений на основе волоконной брэгговской решетки.

В дипломной работе представлен обзор истории волоконных Брэгговских решеток, областей их применения. Кроме того, был проведен обзор литературы о принципах их работы, используемых датчиках и важности их использования, а также о преимуществах и недостатках волоконных брэгговских решеток. В ходе работы была введена зависимость волоконных Брэгговских решеток от влияния внешней среды и современные модели волоконных Брэгговских решеток. Анализируются их преимущества и недостатки.

В ходе дипломного исследования было изучено влияние внешней среды, температуры на волоконную брэгговскую решетку. Брэгговской решетке, были смоделированы и изучены в программе Optisystem. Путем моделирования природы источников погрешностей измерений были рассмотрены причины и пути их устранения. В практической части дипломной работы были рассмотрены выше указанные проблемы и пути их реше

## ANNOTATION

The thesis was devoted to the study of calculations and measurement errors based on the fiber Bragg grating.

The thesis provides an overview of the history of fiber Bragg gratings, areas of application. In addition, a literature review was conducted on the principles of their operation, the sensors used and the importance of their use, as well as the advantages and disadvantages of fiber Bragg gratings. In the course of the work, the dependence of fiber Bragg gratings on the influence of the external environment and modern models of fiber Bragg gratings were introduced. Their advantages and disadvantages are analyzed.

In the course of the graduation study, the influence of the external environment, temperature on the fiber. And measurement errors based on the fiber Bragg grating were modeled and studied in the Optisystem program. By modeling the nature of sources of measurement errors, the reasons and ways to solve them were considered. In the practical part of the thesis, the above problems and ways to solve them were considered.

## МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ	7
1 Талшықты-оптикалық желілер	11
1.1 Талшықты оптикалық байланыс желісі	11
1.2 Талшықты Брэгг торы	13
1.3 Талшықты Брэгг торының жұмыс істеу принципі	15
1.4 Талшықты Брэгг торында қолданылатын сенсорлар	19
1.5 Талшықты Брэгг торын пайдаланудың маңызы	23
2 Талшықты брэгг торымен жүргізілетін зерттеулер	26
2.1 Талшықты Брэгг торының толқын ұзындығының қоршаған орта температурасына тәуелділігі	27
2.2 Бір модты талшықты Брэгг торымен деформацияны және температураны өлшеу принципі	31
2.3 Талшықты брэгг торындағы өлшеу қателіктерін optisystem бағдаламасында зерттеу	36
ҚОРЫТЫНДЫ	41
ПАЙДАЛЫНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	42

## КІРІСПЕ

Соңғы он жылдықта оптикалық талшықтарды сенсорлық қосымшалар ретінде пайдалану қарқынды дамып келе жатыр. Талшықты оптикалық талшықтардың бірі талшықты Брэгг торы. Талшықты Брэгг торын көптеген салаларда пайдалану ғылымның перспективті бағыттарының бірі. Себебі Талшықты Брэгг торлары өте сезімтал және өте тар жолаққа ие болуының арқасында оптикалық фильтрлер ретінде пайдаланудың қолданбалы бағытын ашады.

Талшықты Брэгг торларына негізделген өлшеу қателіктерін талдау - бұл сезімтал элементтер ретінде талшықты Брэгг торларын қолданатын оптикалық сенсорлық жүйелердің өнімділігі мен дәлдігін зерттеуді қамтитын ғылымның қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі. Талшықты Брэгг торлары - белгілі бір толқын ұзындығының жарығын көрсететін оптикалық талшықтарға орналастырылған периодты құрылымдар, бұл оларды жоғары сезімталдық пен дәлдікті қажет ететін зондтау жүйелерінде қолдануға өте ыңғайлы етеді.

Талшықты Брэгг торларына негізделген сенсорлық жүйелердегі өлшеу қателіктерін талдау өлшеудің сенімділігі мен дәлдігін арттыру, қателік көздерін анықтау, өлшеу процесін оңтайландыру және шығындарды азайту үшін маңызды. Зерттеудің бұл бағыты қоршаған ортаны бақылау, құрылымдық жағдайды бақылау және биомедициналық зондтауды қоса алғанда, кең ауқымды салаларға айтарлықтай әсер етеді. Өлшеу қателіктерінің көздерін түсіну және талшықты Брэгг торларына негізделген сенсорлық жүйелердің өнімділігін жақсарту арқылы өлшеудің дәлдігі мен сенімділігін арттыруға болады, сайып келгенде сенсорлық қолданбалар арқылы алынған деректердің сапасын жақсартады.

Зерттеудің мақсаты: талшықты Брэгг Торына негізделген өлшеу жүйесінің өнімділігі мен дәлдігін зерттеу және жүйедегі өлшеу қателіктерінің көздерін модельдеу және талшықты Брэгг торының жұмыс жасау принциптерін анықтау.

Зерттеудің міндеттері:

- Талшықты Брэгг торына температураның әсерін зерттеу;
- Бір модты көлбеу талшықты Брэгг торында температураны және деформацияны зерттеу;
- Талшықты Брэгг торындағы өлшеу қателіктерін Optisystem бағдарламасында зерттеу.

## **1 Талшықты-оптикалық желілер**

### **1.1 Талшықты-оптикалық байланыс желісі**

Талшықты – оптикалық желілерері температура, қысым, деформация және химиялық құрам сияқты физикалық және химиялық параметрлерді анықтау және өлшеу үшін талшықты-оптикалық кабельдерді пайдаланатын құрылғылар. Бұл сенсорлар өлшенетін материалмен әрекеттесу кезінде қарқындылықтың, фазаның немесе поляризацияның өзгеруі сияқты жарық қасиеттеріне сүйенеді.

Талшықты-оптикалық сенсорлық жүйелерді өнеркәсіптік процестерді басқару, құрылыс күйін бақылау, биомедициналық зондтау және қоршаған ортаны бақылауды қоса алғанда, кең ауқымды қолданбаларда пайдалануға болады [1].

Талшықты-оптикалық желілер – бұл оптикалық талшықтарды қолданатын телекоммуникациялық желінің бір түрі, олар әйнектен немесе пластмассадан жасалған жұқа жіптер болып табылады, олар жарық импульстары арқылы ақпарат береді. Дәстүрлі мыс сым желілерімен салыстырғанда, талшықты-оптикалық желілер деректерді ұзақ қашықтыққа және жоғары жылдамдықпен жібере алады, сонымен қатар кедергі мен сигналдың жоғалуына аз сезімтал болады.

Талшықты оптика саласы қазіргі таңдағы ғылымның қарқынды дамып келе жатқан салаларының бірі. Талшықты оптика көптеген салалар үшін пайдалы болып табылатын талшықты датчиктер, лазерлер, талшықты-оптикалық байланыс желілері, медицина, метрология, спектроскопия, өнеркәсіптік өңдеу сияқты материалдарды дүниеге әкелді. Талшықты-оптикалық желілер телефон жүйелерін, кабельді теледидарды және жоғары жылдамдықты интернет байланысын қоса алғанда, әртүрлі қолданбаларда қолданылады. Олар медицина, қорғаныс және ғылыми зерттеулер сияқты салаларда да қолданылады [2].

Талшықты-оптикалық желілерді салу және техникалық қызмет көрсету күрделі және қымбат болуы мүмкін, мамандандырылған жабдықтар мен білікті техниктерді қажет етеді. Дегенмен, талшықты-оптикалық технологияның артықшылықтары оны компаниялар үшін де, тұтынушылар үшін де танымал таңдау етеді.

Талшықты-оптикалық желілердің екі негізгі түрі бар:

1) Біртербелісті немесе модты талшықты-оптикалық желілер. Желілердің бұл түрі ұзақ қашықтыққа деректерді беру үшін бір талшықты-оптикалық кабель өзегін пайдаланады. Ол сигнал сапасының нашарлауынсыз деректерді ұзақ қашықтыққа жіберуге мүмкіндік беретін бір толқын ұзындығындағы жарықты тасымалдауға арналған. Бір модты талшық әдетте суасты кабельдері мен кері байланыс желілері сияқты алыс қашықтықтағы телекоммуникацияларда қолданылады [3].



2) Мультимодты талшықты-оптикалық желілер. Желілердің бұл түрі деректерді қысқа қашықтыққа, әдетте ғимаратта немесе талшықты-оптикалық кабельдің бірнеше желілерін пайдаланады. Мультимодты талшық бір уақытта бірнеше толқын ұзындығындағы жарықты тасымалдауға арналған, бұл қысқа қашықтыққа жылдамырақ деректер жылдамдығын қамтамасыз етеді. Мультимодты талшық әдетте жергілікті желілерде (LAN) және деректер орталықтарында қолданылады.

Талшықты-оптикалық желілердің басты артықшылықтарының бірі – олардың жоғары өткізу қабілеттілігі, бұл дәстүрлі мыс кабельдеріне қарағанда жоғары деректер жылдамдығын қамтамасыз етеді. Олар сондай-ақ электромагниттік кедергілерге аз сезімтал, бұл оларды сенімдірек және деректердің жоғалуына азырақ бейім етеді. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық желілер сигнал күшейткіштерін немесе қайталағыштарды қажет етпестен деректерді ұзақ қашықтыққа жібере алады [4].

Дегенмен, талшықты-оптикалық желілерді орнату және техникалық қызмет көрсету мыс кабельдеріне қарағанда қымбатырақ болуы мүмкін. Оларды орнату және жөндеу үшін арнайы жабдық пен тәжірибе қажет, бұл қымбаттауға әкеледі. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық кабельдер мысқа қарағанда нәзік және шамадан тыс иілу немесе созылу кезінде зақымдалуы мүмкін.

Талшықты-оптикалық желі желісінің өнімділігін талдау үшін бірнеше көрсеткіштерді қолдануға болады. Оларға мыналар жатады:

1) Өткізу қабілеті. Бұл белгілі бір уақыт аралығында желі арқылы берілуі мүмкін деректер көлеміне қатысты. Өткізу қабілеттілігінің жоғарылауы деректерді берудің жоғары жылдамдығын қамтамасыз етеді.

2) Кідіріс. Бұл сызықтың бір нүктесінен екінші нүктесіне деректерді беру үшін қажет уақытты білдіреді.

3) Сигнал деңгейі. Бұл сызық бойымен берілетін сигналдың күшін білдіреді. Сигналдың жоғары деңгейі өнімділіктің жоғарылауына және қателіктердің аз болуына әкеледі. Жақсы жобаланған және қызмет көрсетілетін талшықты-оптикалық желі жылдам, сенімді және жоғары сапалы деректерді тасымалдауды қамтамасыз ете алады [5].

Талшықты-оптикалық байланыстың пайда болуы байланыс технологиясының барлық аспектілерінде төңкеріс жасады. Соңғы бірнеше онжылдықта талшықты-оптикалық датчиктер кеңінен зерттелді және деформацияны, сыну көрсеткішін, құрылымдар мен машиналардың дірілін, электр тогын, кернеуді, кедергіні, температураны, қысымды, ылғалдылықты және т. б. өлшеу сияқты әртүрлі қолданбалар үшін пайдаланылды. Бұл саладағы үлкен қадамдарға қарамастан, оптикалық айналарды, жартылай шағылыстырғыштарды және толқын ұзындығының сүзгілерін біріктіру қиын болып қала берді, өйткені оларды біріктіру қиындықтармен шығындарды арттырады. Алайда, бұл мәселе талшықты Брэгг торын қолдану арқылы шешілді, ол өздігінен зондтау жүйелерінде оңай қолдануға болатын шағылысу, дисперсия және фильтрлеудің негізгі функциясын орындай алады. Талшық

өзегінің сыну көрсеткішін өзгертетін ультракүлгін жарықты оптикалық жұту процесі Брэгг талшықты торын (ТБТ) құрайтын жарыққа сезімталдық деп аталады[6].

## 1.2 Талшықты Брегг торы

Дифракция – бірыңғай емес және онымен байланысты ортада жарықтың таралуы кезінде геометриялық оптика заңдарынан ауытқу сынды байқалатын құбылыстар жиынтығы.

Дифракция – бұл толқындардың тесік арқылы немесе кедергінің айналасында қозғалуы және таралуы. Бұл құбылыс жарық, дыбыс және су толқындары сияқты әртүрлі толқын түрлерінде байқалады. Толқындар кедергіге тап болғанда, олар бұғатталуы, жұтылуы немесе таралуы мүмкін, бірақ олар сонымен қатар иіліп, кедергінің шеттеріне таралып, дифракциялық үлгіні жасай алады. Кедергінің мөлшері мен толқын ұзындығы байқалған дифракция үлгісін анықтайды. Дифракция толқындардың негізгі қасиеті болып табылады және оптика, акустика және рентгендік кристаллография сияқты салаларда маңызды рөл атқарады. Оның оптикалық құрылғыларды жобалауда және табиғи және жасанды құрылымдардағы толқындардың әрекетін түсінуде көптеген практикалық қолданыстары бар [7].

Талшықты оптиканың қарқынды дамуына қарамастан, оптикалық негізгі құрылғыларды оптикалық талшықтармен біріктіру перспективті бағыт болғанымен шешімі жоқ мәселелерде көп болды. Алайда, ультракүлгін сәулесінің көмегімен бірмодты талшықты сыну көрсеткішін өзгерту мүмкіндігінің пайда болуымен жағдай басқаша сипатқа ие болды. Оптикалық талшықтардың фотосезімталдығы фазалық талшықтарды жасауға мүмкіндік береді. Солардың бірі Брэгг торлары деп аталатын құрылымдар, олар тікелей талшықтың өзегінде болады. Брэггтың талшықты торлары көптеген маңызды функцияларды орындай алады мысалы, үлкен тиімділік және төмен шығындармен шағылу және өту. Бұл жаңалық көптеген маңызды инновациялар үшін негіз болды .

Талшықты Брэгг торы – 1913 жылы бұл идеяны алғаш рет ұсынған физик Уильям Генри Брэггтің атымен аталған дифракциялық тордың бір түрі. Ол тегіс бетке ойылған параллель, тең қашықтықтағы ойықтардан тұрады, интерференциялық үлгілерді алу үшін саңылаулар арасындағы қашықтық мұқият бақыланады [8].

Талшықты оптиканың дамуы өткен ғасырда бастау алып, әлі күнге дейін жалғасуда. Телекоммуникациялық желілер оларды ақпараттарды жеткізу үшін пайдаланса, ал ғылымда қолданудың кең спектрін қамтитын арнайы жарық өткізгіштер әзірлеуде. Мәселен әртүрлі оптикалық өлшеуіштер, датчиктер сынды құрылғыларды өндірістерде де лабораториялардада көптеп пайдалынылуда. Детекторларды жоғары сезімталдылықпен қамтамасыз ету мақсатында қазіргі таңда талшықты Брэгг торын пайдаланады және оны көптеп

зерттеулерге көңіл бөлінуде. Брэгг торын кристалдардың құрылымын зерттеу үшін де рентгендік кристаллографияда кеңінен қолданылады. Рентген сәулелері кристалдағы атомдардың дұрыс торынан өткенде дифракцияланады және алынған дифракциялық үлгіні кристалдағы атомдардың орналасуын анықтау үшін пайдалануға болады. Брэгг торы кристалға бағытталған монохроматикалық рентген сәулесін алу үшін қолданылады және алынған дифракциялық үлгі кристалдық құрылымды анықтау үшін талданады. Брэгг торы дифракция саласындағы маңызды құрал болып табылады, бұл ғалымдарға жарықтың қасиеттері мен заттың құрылымын әр түрлі қолдану салаларында зерттеуге мүмкіндік береді[9].



1.1-сурет – Арнайы қолданысқа арналған Брэгг торы

Талшықты Брэгг торлары материалдардың құрылымы мен қасиеттерін зерттеудің қуатты құралы болып табылатын рентгендік дифракция эксперименттерінде кеңінен қолданылады. Брэгг торларының кейбір кең таралған қолданыс саларына мыналар жатады:

1. Кристалдық құрылымын анықтауда пайдаланылады. Талшықты Брэгг торында алынған дифракциялық үлгіні талдау арқылы кристалдық тордағы атомдардың орнын, атомдық жазықтықтар арасындағы қашықтықты және материалдың басқа құрылымдық қасиеттерін анықтауға болады;

2. Талшықты Брэгг торларын жартылай өткізгіш құрылғылар, күн батареялары және магниттік тасымалдаушылар сияқты бірқатар технологиялық қосымшаларда маңызды болып табылатын жұқа пленкалар мен қабаттасуларды зерттеу үшін пайдалануға болады.

3. Талшықты Брэгг торларын қолданатын рентгендік дифракция эксперименттерін жоғары қысымда, температурада және басқа да төтенше жағдайларда материалдарды зерттеу үшін пайдалануға болады.

4. Биологиялық молекулаларды талдауға қолдану. Рентгендік кристаллографияда белоктар мен нуклеин қышқылдары сияқты биологиялық молекулалардың құрылымын анықтау үшін талшықты Брэгг торларын да қолдануға болады [10].

Талшықты Брэгг торлары материалдардың құрылымы мен қасиеттерін зерттеудің әмбебап құралы болып табылады және оларды қолдану материалтану, физика, химия және биология сияқты салаларда кең таралған. Талшықты Брэгг торының мұндай көптеген салаларда пайдаланудың өзіндік себебі бар. Талшықты Брэгг торлары талшықты-оптикалық байланыс жүйелері мен сенсорларының маңызды компоненттері болып табылады. Міне, олардың кейбір негізгі сипаттамалары:

- толқын ұзындығының селективтілігі. Талшықты Брэгг торлары талшық бойындағы сыну көрсеткішінің периодының өзгеруіне байланысты жарықтың белгілі бір толқын ұзындығын көрсетеді немесе өткізеді;

- тар жолақты жұмыс. Талшықты Брэгг торы әдетте өте тар шағылысу немесе берілу жолағына ие, әдетте бірнеше нанометрге дейін болуы мүмкін.

- температура мен деформацияға сезімталдық. Талшықты Брэгг торлары шағылысқан немесе жіберілген толқын ұзындығы талшыққа қолданылатын температураның немесе кернеудің өзгеруіне жауап ретінде өзгереді. Бұл сипатты сенсорлық қолданбалар үшін пайдалануға болады.

- интеграцияның қарапайымдылығы. Талшықты Брэгг торлары тікелей оптикалық талшықтың өзегінде жасалуы мүмкін, бұл оларды оптикалық жүйелерге біріктіруді жеңілдетеді.

- төмен кірістіру шығындары. Талшықты Брэгг торлары төмен кірістіру шығындарына ие, яғни олар талшық арқылы өтетін жарықты айтарлықтай әлсіретпейді.

- жоғары шағылысу. Талшықты Брэгг торлары жоғары шағылыстыруға қол жеткізе алады, әдетте шамамен 99%. Сондықтан Брэгг торлы талшықты лазерлер сияқты қолданбалар үшін пайдалы болып табылады.

- әмбебаптық. Талшықты Брэгг торлары сенсорларды, телекоммуникацияларды, талшықты лазерлерді және оптикалық сүзгілерді қоса алғанда, кең ауқымда қолданыла алады [11].

### **1.3 Талшықты Брэгг торының жұмыс істеу принципі**

Талшықты Брэгг торы ортасында сыну көрсеткішін периодты бойлық бағытта өзгертіп отыратын оптикалық талшықтан тұрады. Яғни оптикалық талшық ортасында шағылыстырғыш тор орналасады. Ол жарықтың белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстырады, ал қалғандарын өткізеді. Бұл әсерге талшық ортасындағы сыну көрсеткішін периодты өзгеріс жасау арқылы қол жеткізіледі. Талшықты торлардың ең маңызды параметрлері сыну көрсеткіштің модуляция амплитудасының таралуы және тордың периодының бойлық осі бойымен өзгеру заңы. Бұл параметрлердің қажетті мәндерден ауытқуы спектрлік сипаттамалардың және талшықты-оптикалық байланыс желісінің жұмысын нашарлауына әкеледі [12].

Талшықты Брэгг торлары нүктелік талшықты-оптикалық қысым датчиктерінің сезімтал элементтері болып табылады (1.2-сурет). Негізінен

талшықты Брэгг торлары ультракүлгін сәулемен жазылады, және ол ось бойымен сыну көрсеткішін өзгертетін жарық өткізгізетін бөліктен тұрады. Кез келген датчиктің талшықты Брэгг торлары ені  $\sim 0.2$  нм болатын белгілі бір толқын ұзындығының жарықты шағылыстырады [13].



1.2-сурет – Талшықты Брэгг торының жұмыс жасау принципі

Оптикалық талшық арқылы таралатын сәулелену бағыттаушы және эмиссиялық деп аталатын жарық өткізгіштің өзіндік тербелістердің тіркемесіміне ие. Оптикалық талшықтың эмиссиялық тербелістері үздіксіз функцияны құрайды, ал бағыттаушылар  $\beta_i$  таралудың үздіксіз дискретті жиынтығына сәйкес келеді [27]. Сыну көрсеткішінде өзгерістер болмаған жағдайда олар бір-бірімен өзара әрекеттесусіз таралады. Сондықтан сыну көрсеткіші модуляциясының периоды таңдалған жарық диодты тербелістер арасындағы қажетті резонанстық өзара әрекеттесуін қамтамасыз ету үшін таңдалады. Бұл сыну көрсеткіші модуляциясы оптикалық талшықтың тербелістерін кері бағытта таралған негізгі тербелістермен байланыстырады. Нәтижесінде оптикалық талшық бойымен таралатын дискретті толқын ұзындығында сәулелену талшықты Брэгг торынан шағылысады. Шағылысу коэффициенті сыну көрсеткіші модуляциясының тереңдігіне байланысты, және орталық толқын ұзындығы Брэгг шартымен (1) анықталады [14]:

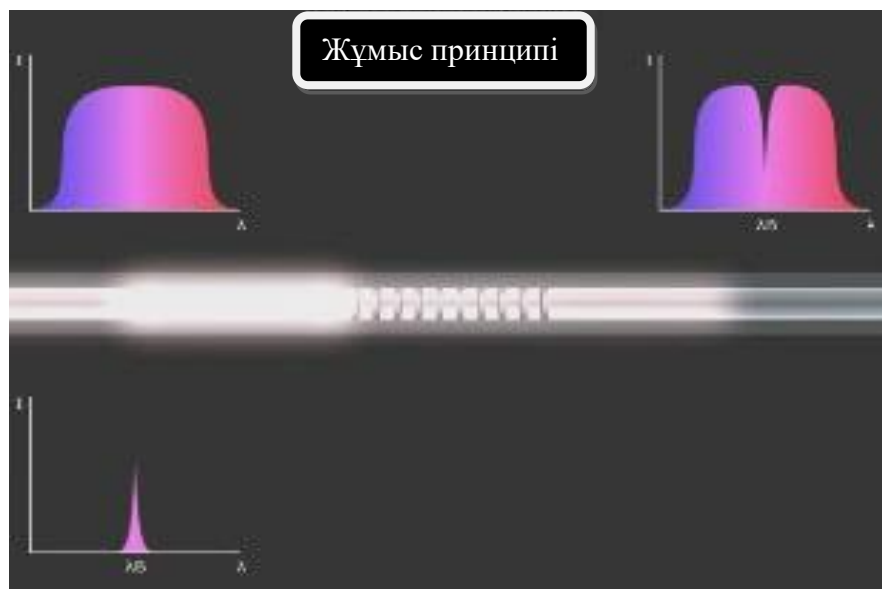
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

мұндағы  $\lambda_B$  - Брэгг резонансының толқын ұзындығы,

$n_{eff}$  - орталық толқын ұзындығына арналған негізгі талшықтың тиімді сыну көрсеткіші,

$\Lambda$  – талшықты Брэгг торының периоды.

Талшықты Брэгг торы резонанстық құрылымға ие бола отырып, ұзындығы бойынша селективті айна ретінде әрекет етеді, яғни оны бұл тар жолақты фильтр деуге болады. Бұл дегеніміз, егер жарық көзі кең жолақты көзден оптикалық талшыққа берілсе, онда тек Брэггтың толқын ұзындығы бойымен ені өте тар спектрлі жарық қана тор арқылы кері шағылысады. Қалған жарық оптикалық талшық арқылы келесі Брэгг торына ешқандай кедергісіз өтеді. Оны 1.3-суреттен жақсы көруге болады [15].



1.3-сурет – Жарықтың талшықты Брэгг торына әсері

Жоғарғы сол жақта бағытталған жарықтың спектрі, жоғарғы оң жақта Брэгг торынан өтетін жарық спектрі, ал ортасында өзегінде Талшықты Брэгг торы бар оптикалық талшықтан өтетін және шағылысқан жарықтың көрінісі. Ал төменгі сол жақта шағылысқан жарық спектрі.

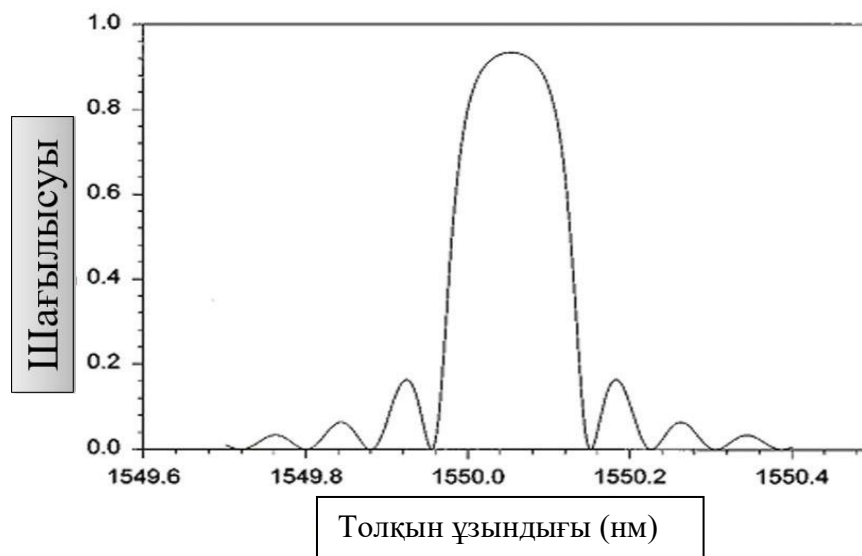
Оптикалық талшық бойымен таралатын жарық әрбір тордың бетіне сыну көрсеткішмен таралады. Егер Брэггтің шарттары орындалмаса, онда шағылысқан тордың әр бетінде жарық фазаға енбейді, ақыр соңында сөнеді. Брэгг шартын қанағаттандыратын толқын ұзындығы, тордың әр бетінен шағылысқан жарықтар жарық жиналады және таралады [16].

Талшықты Брэгг торлары бір модты талшықтың өзегіне мерзімді қарқынды лазерлік сәулеленумен жанама әсер ету арқылы жасалады. Экспозиция талшық өзегінің сыну көрсеткішінің тұрақты өсуіне әкеледі, экспозиция схемасына сәйкес бекітілген индикатордың модуляциясын жасайды. Бұл тіркелген индексті модуляция тор деп аталады.

Сынудың көрсеткішінің әр периодтық өзгеруімен жарықтың аз мөлшері шағылысады. Барлық шағылысқан жарық сигналдары тор периодының кіріс жарығының толқын ұзындығының жартысына жуықтаған кезде белгілі бір толқын ұзындығындағы бір үлкен шағылысуға біріктіріледі. Бұл Брэгг шарты деп аталады, ал бұл шағылысу пайда болатын толқын ұзындығы Брэгг толқын

ұзындығы деп аталады. Брэгг толқын ұзындығына сәйкес келмейтін жарық сигналдары фазалық сипаты негізінен мөлдір болып табылады. Бұл принцип 1-суретте көрсетілген.

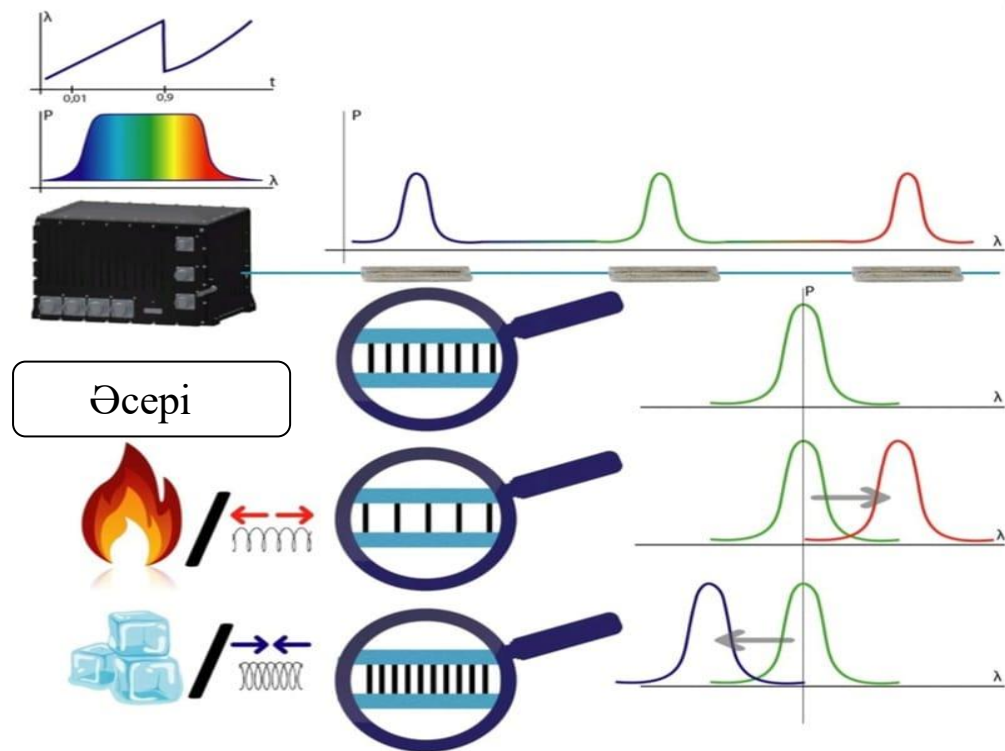
Сигналдың шамалы әлсіреуімен немесе өзгеруімен жарық тор арқылы таралады. Брэггтің шартын қанағаттандыратын толқын ұзындықтары ғана өзгеріске ұшырайды және қатты кері шағылысады. Тордың толқын ұзындығын дәл баптау және сақтау мүмкіндігі талшықты Брэгг торларының негізгі ерекшелігі мен артықшылығы болып табылады. Бұл принцип бойынша алынған спектр 1.4 - суретте көрсетілген.



1.4-сурет – Талшықты Брэгг торынан шағылысу спектрі

Дифракциялық суреттегі шыңдардың орналасуы тордағы атомдардың әртүрлі жазықтықтарында рентген сәулелері дифракцияланатын бұрыштарға сәйкес келеді. Бұл шыңдардың орналасуы мен қарқындылығы атомдардың қашықтығы мен орналасуы, сондай-ақ басқа құрылымдық қасиеттері туралы ақпарат бере алады [17].

Талшықты Брэгг торына механикалық және температуралық әсер еткенде сыну көрсеткіші мен индексінің өзгеруі орын алады, сондықтан шағылысқан жарықтың толқын ұзындығының ығысуы байқалуы мүмкін. Толқын ұзындығы ығысқан кезде температураның өзгеруін және салыстырмалы деформацияны байқауға болады. Деформация мен температураның өзгеруін бөлу үшін, екі Брэгг торларын пайдалану қажет, бірақ біреуінің механикалық әсерлерден оқшаулануын қадағалау қажет. Дәл осы тор арқылы температураның өзгеруіне байланысты толқын ұзындығының ығысуының өзгерісі жазылады. Бұл температураның екінші Брэгг торына әсерін, және датчикпен байланыстырылған материалдың жылу әсерінен кеңеюін, сәйкесінше деформациясын өлшеуге мүмкіндік береді (1.5-сурет).



1.5-сурет – Қоршаған ортаның әсеріне байланысты датчиктің жұмыс жасау принципі

Бір модты талшықты-оптикалық желіде көптеген торлар біріктірілуі мүмкін, олардың әрқайсысы белгілі бір толқын ұзындығына жауап береді, ал олардың арасындағы қашықтық торлар 10 мм-ден бірнеше шақырымға дейін болуы мүмкін [18].

#### 1.4 Талшықты Брэгг торында қолданылатын сенсорлар

Талшықты Брэгг торлары – белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстыру үшін оптикалық талшықтың сыну көрсеткішінің периодты өзгеруін пайдаланатын құрылғылар. Бұл оның сенсорларын температураны, деформацияны, қысымды және химиялық құрамды өлшеу сияқты өлшеу салаларында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Брэгг торлары әдетте ультракүлгін сәулеленудің әсерінен, электронды сәулелік жазуды немесе басқа әдістерді қолдана отырып, талшық өзегінің сыну көрсеткішіне периодты өзгерістер енгізу арқылы жасалады. Брэгг торларына негізделген датчиктерге қолданылатын тітіркендіргішке жауап ретінде өзгертін шағылысқан жарықтың толқын ұзындығын өлшеу арқылы жүргізуге болады [19].

Талшықты Брэгг торларында қолданылатын ең көп таралған сенсорлар:

1) Температура датчиктері. Бұл датчиктер температураны өлшеу үшін талшықтың термиялық кеңеюіне байланысты тордың сыну көрсеткішінің



периодының өзгеруін қолданады. Олар өнеркәсіпте, аэроғарышта және медицинада кеңінен қолданылады;

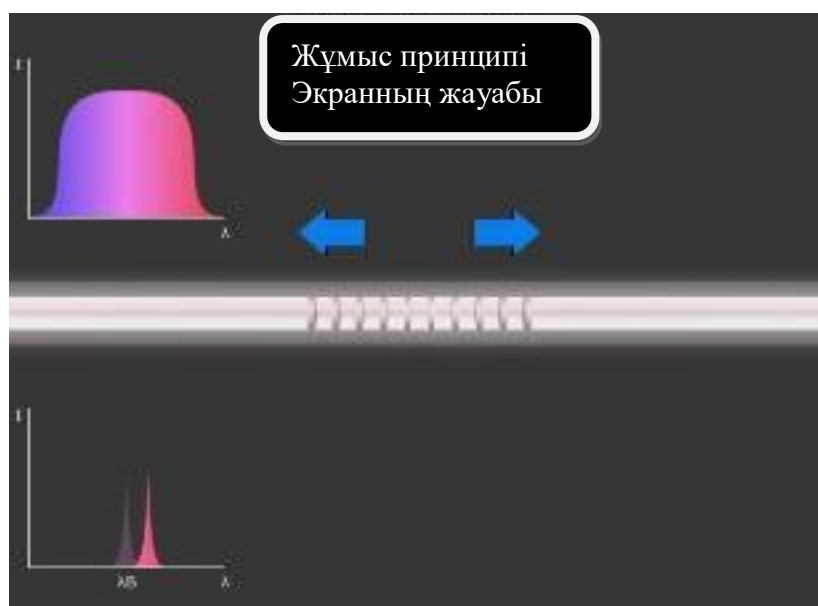
2) Деформация датчиктері. Бұл датчиктер деформацияны өлшеу үшін талшыққа қолданылатын кернеуге байланысты тордың деформация кезеңінің өзгеруін қолданады. Олар құрылымдардың күйін бақылауда, азаматтық құрылыста және геотехникалық қосымшаларда қолданылады;

3) Қысым датчиктері. Бұл датчиктер қысымды өлшеу үшін қолданылатын қысымға байланысты тордың жұмыс уақытының өзгеруін пайдаланады. Олар мұнай-газ, медициналық және аэроғарыш өнеркәсібінде қолданылады;

4) Химиялық датчиктер. Бұндай датчиктер химиялық заттардың концентрациясын өлшеу үшін талшықпен химиялық әрекеттесуге байланысты тордың эсер ету периодының өзгеруін пайдаланады. Олар азық-түлік қауіпсіздігінде және денсаулық сақтау салаларында қолданылады;

Талшықты Брэгг торлары жоғары сезімталдығы, дәлдігі және тұрақтылығы арқасында әртүрлі қолданбалар үшін сенімді және дәл шешім ұсынады.

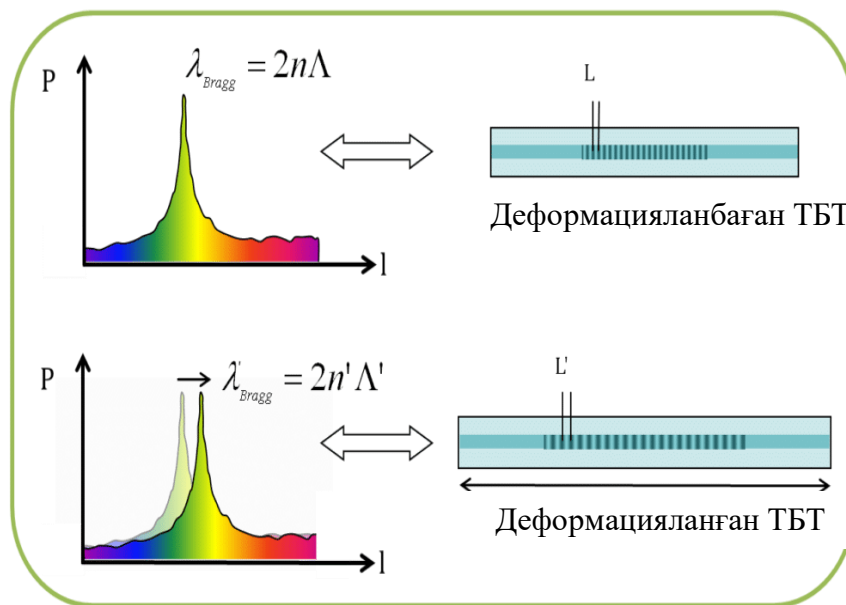
Талшықты Брэгг торлары сенсор ретінде жұмыс істеу үшін ерекше сипаттамаларға ие. Мысалы, талшық созылғанда немесе қысылғанда, ТБТ деформацияны өлшейді. Бұл оптикалық талшықтың деформациясы микроқұрылым периоды мен Брэгг толқын ұзындығының өзгеруіне әкелетіндіктен болады (сурет 1.6).



1.6-сурет – ТБТ сенсорының деформацияны тіркеуі

Сыну көрсеткіші және сыну көрсеткішінің өзгеру периоды параметрлерінің температура мен деформацияға тәуелділігіне байланысты шағылысқан компоненттің толқын ұзындығы температураға және деформацияға байланысты өзгереді (1.7-сурет). Бұл температураны немесе

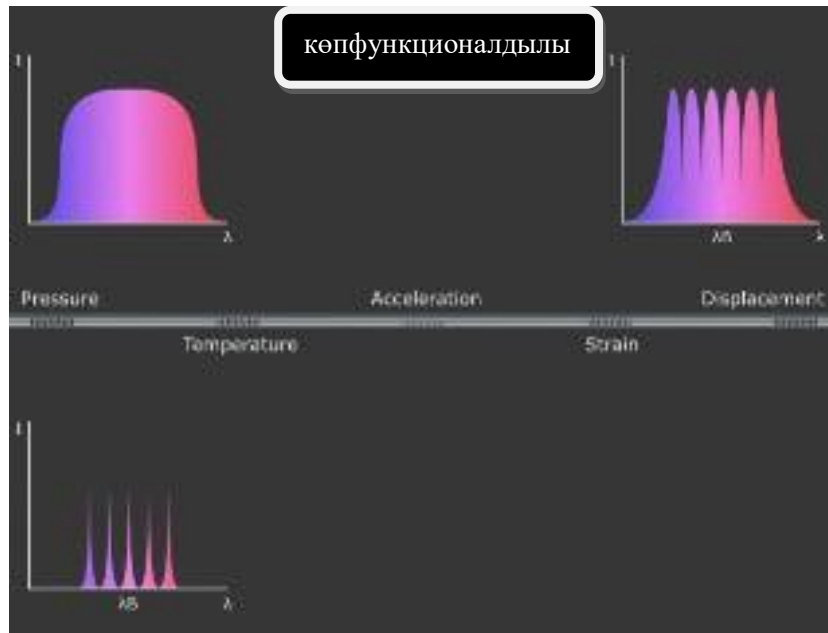
деформацияны шағылысқан толқын ұзындығы бойынша анықтауға мүмкіндік береді [20].



1.7-сурет – Деформация әсерінен Талшықты Брэгг торының өзгеруі

Брэггтың талшықты торы температураға сезімталдықта тән. Бұл жағдайда талшықты Брэгг торының толқын ұзындығының өзгеруіне әсер ететін негізгі фактор термооптикалық әсерден туындаған талшықтың сыну көрсеткішінің өзгеруі болып табылады. Сондай-ақ, микроқұрылым кезеңін өзгертетін термиялық кеңеюдің үлесі бар [21].

Бұл технологияның басты артықшылықтарының бірі – оның ішкі мультиплекстеу қабілеті. Негізінен алғанда жүздеген талшықты Брэгг торларын бір оптикалық талшыққа орналастыруға болады, олар бірнеше миллиметр қашықтықта болуы мүмкін немесе бірнеше шақырымға бөлінеді. Дұрыс орналастырылған жағдайда, осы микроқұрылымдардың әрқайсысын температурадан немесе деформациядан өзгеде параметрлерге сезімтал етуге болады. Мысалы, қысым, үдеу, қозғалыс және т.б. сенсорлар массивіне көп функциялы сипаттамалар береді. Барлық сенсорларға бір оптикалық көзбен қол жеткізуге болатындығын атап өту маңызды. Сонымен қатар, бір талшыққа көбірек датчиктерді қосу әр сенсор үшін жарық спектрінің спектрлік жолағының жеткілікті мөлшері сақталған жағдайда, шығынның азаяюы мен кедергілердің болмауына әкеледі (1.8-сурет ) [22].



1.8-сурет – Мультифункционалды Брэгг сенсоры

Талшықты Брэгг торының деформациясының тәуелділігін толқын ұзындығын дифференциалдау арқылы анықтауға болады:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial \varepsilon}\right) \Delta\varepsilon = (1 + p_e) \Delta\varepsilon \leftrightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \Delta\varepsilon \quad (1.2)$$

мұндағы  $k$  - Талшықты Брэгг торының коэффициенті;

$p_e$  - фотоэластикалық тұрақты (осьтік созылу кезінде сыну көрсеткішінің өзгеруі).

Оптикалық талшық үшін:

$$p_e \approx -0.21 \quad (1.3)$$

Бұл ТБТ-нің деформацияға сезімталдығы келесі өрнек арқылы анықталатынын білдіреді:

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varepsilon} = k\lambda_0 = 0.79\lambda_0 \quad (1.4)$$

Температураға тәуелділікте толқын ұзындығының өрнегін дифференциалдау арқылы анықтауға болады:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta(n_{ef}\Lambda)}{n_{ef}\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T}\right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (1.5)$$

мұндағы  $\alpha$  - талшықтың термиялық кеңею коэффициенті;

$\zeta$  - термооптикалық коэффициент (сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі)

Температураға сезімталдықты жеңілдету үшін бұл мәндер температура диапазоны үшін тұрақты деп болжауға болады:

$$\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\zeta = 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температураға тәуелділік келесі өрнекпен өрнектеледі:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (\alpha + \zeta)\lambda_0 = 6.3\lambda_0 \quad (1.5)$$

### 1.5 Талшықты Брэгг торын пайдаланудың маңызы

Талшықты Брэгг торлары таптырмас технология. Оның бірқатар артықшылықтарға сенсорлық және телекоммуникациялық қосымшалардың кең ауқымы үшін танымал құрылғы етеді. Талшықты Брэгг торын пайдаланудың кейбір негізгі артықшылықтарына тоқтала кетсек:

- ТБТ деформацияның, температураның және басқа параметрлердің өзгеруіне өте сезімтал. ТБТ-ны жоғары сезімталдықты қажет ететін өлшеу жүйелерінде қолдануда өте ыңғайлы;

- ТБТ кең динамикалық диапазонға ие және үлкен диапазондағы параметрлердің өзгеруін өлшей алады. Бұл қасиеті үлкен өзгерістерді өлшеу қажет қолданбалар үшін пайдалы;

- ТБТ өте кішкентай және жеңіл, сондықтан олар үлкен аумақ пен салмағы маңызды қолданбаларда қолдануға өте ыңғайлы;

- ТБТ жұмыс істеуі үшін өте аз энергия қажет, бұл дегеніміз оларды қашықтықтан немесе таратылған зондтау жүйелерінде қолдану тиімді екенін білдіртеді;

- Бірнеше ТБТ бір талшыққа жазылуы мүмкін, бұл мультиплекстеуді және бірнеше параметрлерді бір уақытта өлшеу мүмкіндігін береді;

- ТБТ электромагниттік кедергілерге қарсы иммунитетке ие, сондықтан олар электромагниттік кедергілер бар қатар жағдайларда қолдану тиімді;

- ТБТ ұзақ мерзімді тұрақтылыққа ие, олар уақыт өте тез өзгеріске ұшырамайды. Сондықтан олар ұзақ мерзімді зондтауды қажет ететін қолданбаларда пайдалану үшін маңызды [23].

Жалпы алғанда, талшықты Брэгг торын қолданудың артықшылықтары оларды қолданудың кең спектрі үшін өте әмбебап және пайдалы технологияға айналдырады. Олардың жоғары сезімталдығы, кең динамикалық диапазоны және мультиплекстеу мүмкіндігінің арқасында оларды зондтау жүйелерінде қолданады, ал олардың өлшемдері, төмен қуат тұтынуы және электромагниттік

кедергілерге қарсы иммунитеті оларды телекоммуникацияда және басқа қолданбаларда қолдану үшін пайдалы.

Талшықты Брэгг торлары бірқатар шектеулер мен мәселелерге ие, оларды жобалау және практикалық қолдануға енгізу кезінде ескеру қажет. Осы шектеулер мен мәселелердің кейбірі мыналарды қамтиды:

- Өткізу қабілеттілігі шектеулі. Талшықты Брэгг торының өткізу қабілеттілігі шектеулі, әдетте бірнеше нанометр, бұл оларды кеңірек өткізу қабілеттілігі қажет болатын белгілі бір қосымшаларда пайдалануды шектейді;

- Шектеулі динамикалық диапазон. ТБТ шектеулі динамикалық диапазонға ие және деформацияның немесе температураның шамалы өзгеруін ғана өлшей алады. Бұл үлкен өзгерістерді өлшеу қажет қосымшаларда шектеу болуы мүмкін;

- Поляризацияға сезімталдық. ТБТ кіріс жарығының поляризациясына сезімтал, бұл олардың кейбір қолданбалардағы өнімділігіне әсер етуі мүмкін. Кіріс жарық көзінің поляризация күйі ТБТ-ға сәйкес келетініне көз жеткізу үшін өте мұқият болу керек;

- Температураға сезімталдық. ТБТ температураның өзгеруіне сезімтал, бұл кейбір өлшеу жүйелерінде қателіктерге әкеледі;

- Деформацияға сезімталдық. ТБТ механикалық деформацияларға да сезімтал, бұл кейбір өлшеу жүйелерінде қателіктерге әкелуі мүмкін. ТБТ-ні мұқият калибрлеу және жобалау бұл әсерді азайтуға көмектеседі;

- Сынғыштық. ТБТ сынғыш және өңдеу және орнату кезінде оңай зақымдалады. Орнату немесе пайдалану кезінде талшықты Брэгг торының зақымдалмағанына көз жеткізу үшін өте мұқият болу керек;

- Құны. ТБТ басқа зондтау технологияларымен салыстырғанда салыстырмалы түрде қымбат, сондықтан, оларды кейбір қолданбаларда пайдалануды шектеуі мүмкін [24].

Осы шектеулер мен мәселелерге қарамастан, ТБТ әлі де телекоммуникация, зондтау және талшықты лазерлер сияқты салаларда көптеген маңызды қолданбалары бар өте пайдалы және әмбебап зондтау технологиясы болып табылады. Зерттеушілер мен инженерлер осы шектеулерді ескеріп және қолданудың кең ауқымында ТБТ өнімділігін одан әрі арттыру үшін жаңа әдістер мен технологияларды әзірлеу бойынша жұмыстарды жалғастыруда [25].

Талшықты Брэгг торлары телекоммуникацияда, зондтауда және талшықты лазерлерде көптеген қосымшаларды қолданыс тапты, бірақ олардың болашақтағы қолданысы әлі де зерттелуде.

- 1) Құрылымдардың жай-күйін бақылау. ТБТ көпірлер, ғимараттар және басқа инфрақұрылым құрылымдарының жай-күйін бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Олар кернеудің, температураның және басқа параметрлердің өзгеруін анықтай алады, ықтимал зақымдану немесе істен шығу туралы ерте ескертуді қамтамасыз етеді.

- 2) Биомедициналық зондтау. ТБТ жүрек соғу жиілігін, қан қысымын және басқа физиологиялық параметрлерді бақылау сияқты биомедициналық зондтау

қолданбаларында қолданылуы мүмкін. Оларды тіндер мен импланттардың механикалық қасиеттерін бақылау үшін де қолдануға болады.

3) Энергия жинау. ТБТ машиналар, көлік құралдары немесе жел турбиналары сияқты механикалық тербелістер арқылы энергия жинау үшін пайдаланылуы мүмкін. Кернеуден туындаған ТБТ модуляциясы сымсыз сенсорларды немесе басқа құрылғыларды қуаттандыру үшін пайдалануға болатын электр энергиясын өндіре алады.

4) Аэроғарыштық қолдану. ТБТ аэроғарыш өнеркәсібінде ұшақтардың, ғарыш аппараттарының және басқа да көлік құралдарының конструкцияларының жай-күйін бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Олар сондай-ақ биіктік немесе ғарыш сияқты төтенше жағдайларда температураны және басқа параметрлерді өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

5) Кванттық байланыс. ТБТ кванттық байланыс жүйелерінде қолданылуы мүмкін, мұнда оларды фотондарды генерациялау және манипуляциялау үшін пайдалануға болады.

6) Заттар интернетін зондтау. ТБТ-ны заттар интернетін зондтау қосымшаларында сенсор ретінде пайдалануға болады, онда олар машиналардың, инфрақұрылымның және басқа жүйелердің күйі туралы ақпарат бере алады. Олар сондай-ақ ауаның сапасын немесе судың ластануын бақылау сияқты қоршаған ортаны зондтау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Жоғарыда аталған мақсаттар салаларда талшықты Брэгг торын пайдаланудың жолдарын зерттеушілер мен инженерлер нақты мәселелерді шешу үшін осы технологияны қолданудың жаңа тәсілдерін белсенді түрде зерттеп жатыр. Зерттеулер мен әзірлемелерді жалғастыра отырып, ТБТ болашақта одан да көп қолданбаларды бағыттарын табуы мүмкін [26].

## 2 Талшықты брэгг торымен жүргізілетін зерттеулер

Қазіргі таңда температураны және деформацияны есептеу үшін талшықты Брэгг торын пайдаланады. Талшықты Брэгг торлары жоғары сезімталдығы мен дәлдігіне, төмен құнына және электромагниттік кедергілерге аз ұшыруына байланысты температураны өлшеу үшін кеңінен қолданылады. ТБТ көмегімен температураны өлшеудің негізгі принципі тордың шағылысу спектрінің орталық толқын ұзындығы болып табылатын температураға тәуелді Брэгг толқын ұзындығының ығысуына негізделген.

Зерттеуге қолданылатын материалдар:

1. VCL 4003 Votsch климаттық камерасы;
2. Брэгг торы көлбеу орналастырылған жарыққа сезімтал талшықтар;
3. 10 % су мен қамыс қантының ерітіндісі;
4. Ерітінді құюға арналған контейнер;
5. Бір модты көлбеу талшықты Брэгг торы;
6. Optisystem бағдарламасы.

Зерттеудің мақсаты: Талшықты Брэгг торына негізделген өлшеу жүйесінің өнімділігі мен дәлдігін зерттеу және жүйедегі өлшеу қателіктерінің көздерін зерттеу және талшықты Брэгг торының жұмыс жасау принциптерін анықтау.

Брэгг талшықты торы – белгілі бір толқын ұзындығындағы жарықты шағылыстыра алатын Брэгг торларының периодты құрылымын қамтитын оптикалық талшықтың бір түрі. Бұл қасиет оны қоршаған ортадағы өзгерістерді шағылысқан жарықтың толқын ұзындығын өлшеу арқылы анықтауға болатын сенсорлық қосымшалар үшін пайдалы етеді.

Бұл тұрғыда жұмыстың мақсаты – қоршаған ортадағы өзгерістерді анықтау кезінде Брэгг талшықты торына негізделген өлшеу жүйесінің дәлдігін бағалау және жүйенің жұмысына әсер етуі мүмкін өлшеу қателіктерінің көздерін анықтау. Бұл талдау өлшеу жүйесінің дизайны мен калибрлеуін жақсартуға, сондай-ақ нақты қолдану үшін өлшеу процесін оңтайландыруға көмектеседі.

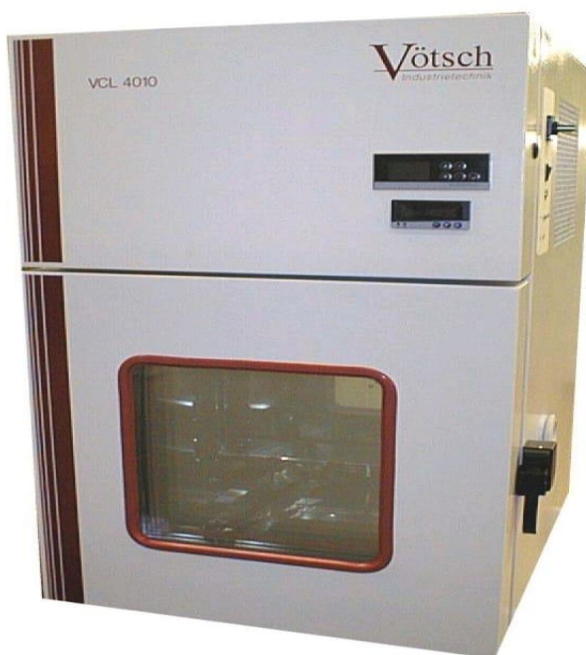
Зерттеудің міндеттері:

- Талшықты Брэгг торына температураның әсерін зерттеу;
- Бір модты көлбеу талшықты Брэгг торында температураны және деформацияны зерттеу;
- Талшықты Брэгг торындағы өлшеу қателіктерін Optisystem бағдарламасында зерттеу.

## 2.1 Талшықты Брэгг торының толқын ұзындығының қоршаған орта температурасына тәуелділігі

Зерттеу фазалық маска әдісі көмегімен жүргізілді. Зерттеу Брэгг торы көлбеу орналастырылған жарыққа сезімтал оптикалық талшықтарға жүргізілді. Олардың Брэгг торларының периодтары 540 нм және 10 нм. Сонымен қатар, оптикалық талшықтың біреуінде Брэгг торы  $3^\circ$  көлбеу орналастырылған, ал екіншісінде  $5^\circ$  көлбеу орналастырылған. Екі оптикалық талшық бір жағынан жарық көзіне, екінші жағынан оптикалық анализаторға қосылды. Кабельдің ортаңғы бөлігінің қорғаныш қабаты алынып, 10% су мен қамыс қантының ерітіндісі бар контейнерге орналастырылды. Ерітіндідегі ортаның сыну көрсеткіші 1,3479 болды. Екі оптикалық талшық орналастырылған кабель мен ерітінді VCL 4003 Votsch (2.1- сурет ) климаттық камерасына орналастырылды.

Жарық көзі бір модты оптикалық талшықпен байланысқан Брэгг торына жіберіледі. Кабель ерітіндісі бар контейнерге орналастырылған, ал кабельдің өзі климаттық камераға орналастырылды. Эксперимент  $0^\circ\text{C}$  және  $50^\circ\text{C}$  аралығында жүргізілді. Оптикалық талшықтардан өткен жарық спектрі оптикалық анализаторға келіп түседі. Зерттеуді жүргудің сызбасы 2.3 суретте көрсетілген.

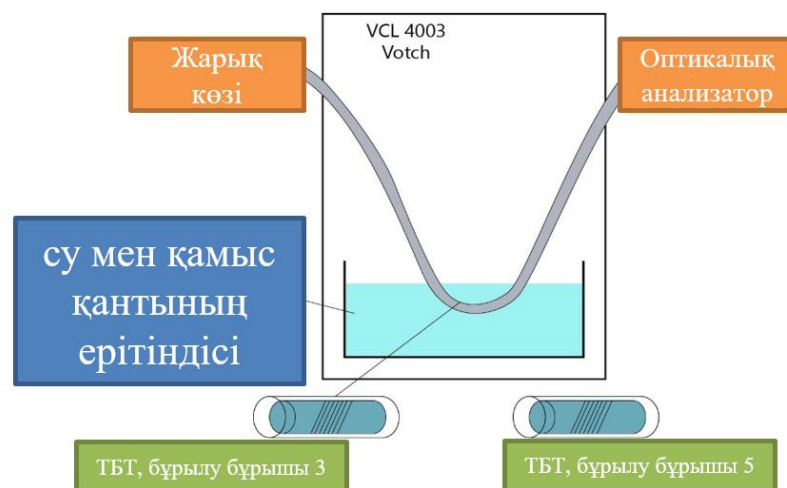


2.1-сурет – VCL 4003 Votsch Климаттық камерасы



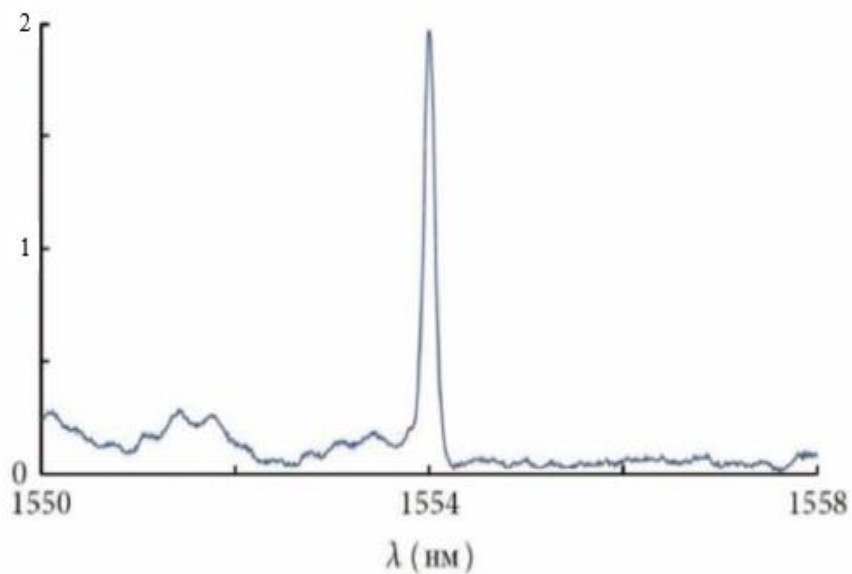


2.2 - Сурет – Жарық көзіне жалғанған оптикалық талшық орналастырылған кабель



2.3-сурет – Зерттеу құрылығының сызбасы

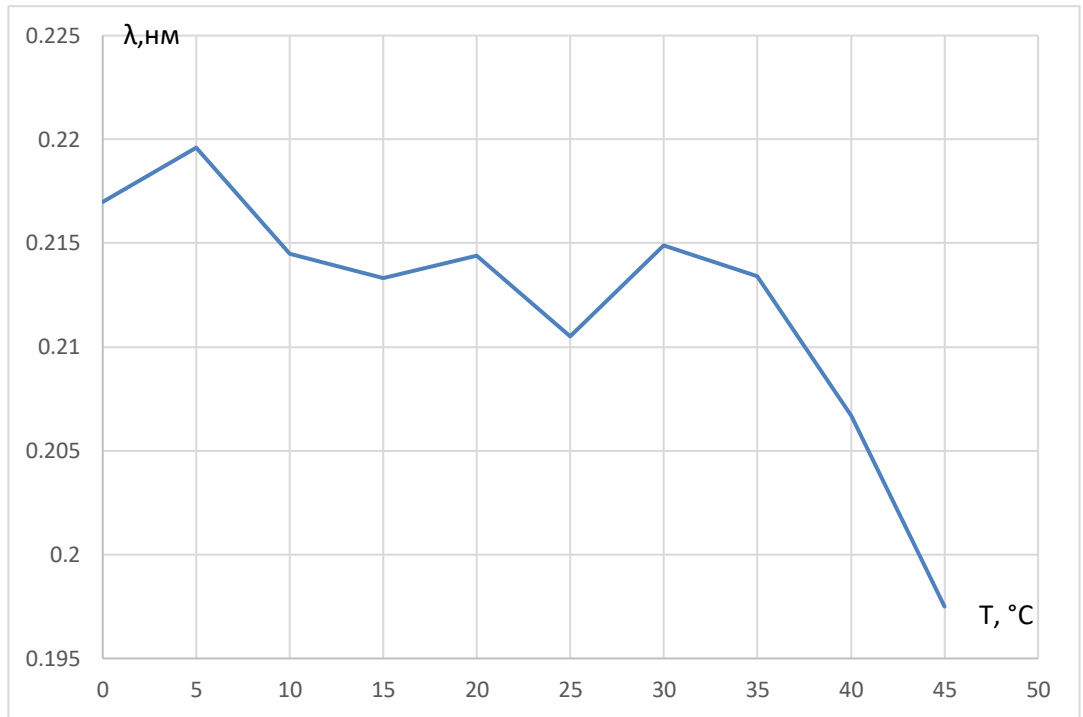
Зерттеу жүргілінгенсоң алынған нәтижелер бойынша спектр алынды. 2.4-суретте талшықты Брэгг торының толқын ұзындығы спекті көрсетілген. Суреттен толқын ұзындығының температураның өзгеруімен өзгеріп отырғанын байқауға болады. Зерттеу барысында 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 °С температурадағы ортаның  $3^\circ$  көлбеу орналастырылығын талшықты Брэгг торына қалай әсер ететіні зерттелінді. Алынған нәтиже мәндері 2.1-кестеде көрсетілген, ал температура мен толқын ұзындығы арасындағы тәуелділік 2.5-суреттегі графикте бейнеленген .



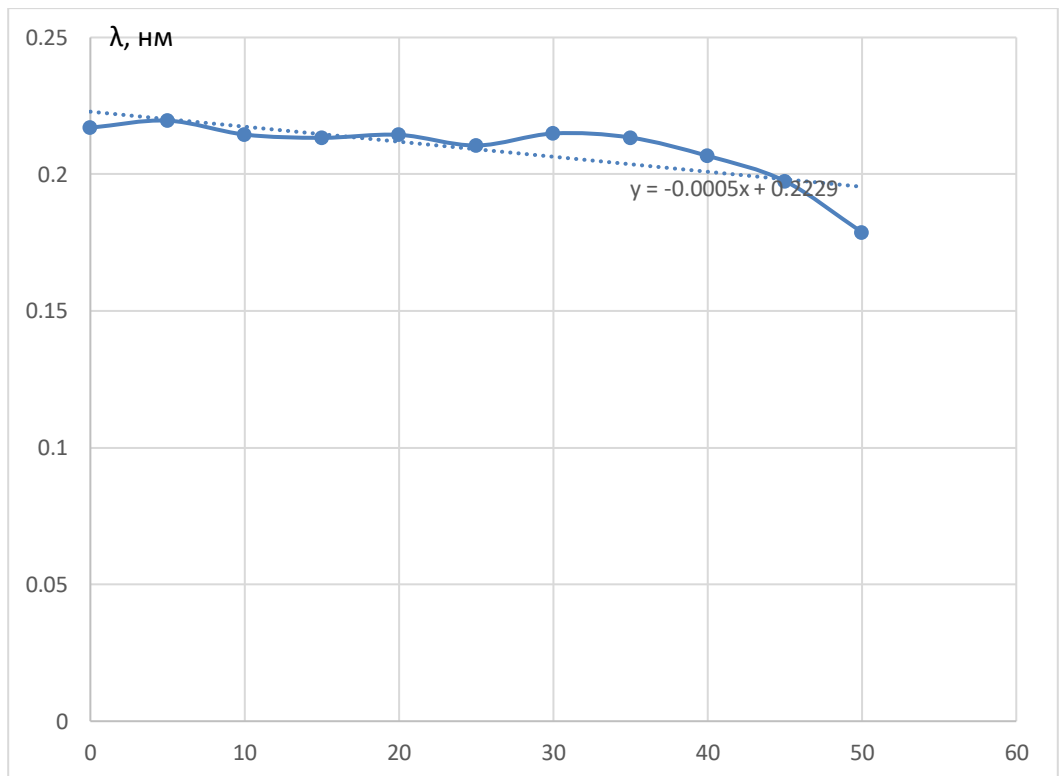
2.4-сурет – ТБТ толқын ұзындығының спектрі

Кесте 2.1 – Толқын ұзындығының қоршаған орта температурасын тәуелділігі

Қоршаған ортаның температурасы, °C	ТБТ талқын ұзындығы, нм
0	0,217
5	0,2196
10	0,2145
15	0,21331
20	0,2144
25	0,2105
30	0,2149
35	0,2134
40	0,2067
45	0,1975
50	0,1788



2.5-сурет – Толқын ұзындығының қоршаған орта температурасының тәуелділігі



2.6 -сурет – Аппроксимация тәуелділігі

Аппроксимациялық жуықтаудан кейін талшықшы Брэгг торының толқын ұзындығы қоршаған орта температурасына сызықты тәуелді екені айқын байқалды. Аппроксимациялық сызық теңдеуінен оның температураға тәуелділік табиғатын көруге болады. Температура 25 °С-қа көтерілгенде, ТБТ толқын ұзындығы өзгере бастайды. Толқын ұзындығы 30 °С-пен 40°С-аралығында айтарлықтай өзгеріске ұшырайды. 40 °С температурасында толқын ұзындығы ең жоғары мәніне жетеді.

Жарық оптикалық талшықтағы ядро арқылы өтеді. Брэгг торы талшықтың өзегінде орналастырылған. Шағылысқан жарық сенсордың тұрақты жұмысын жасайды. ТБТ температураға немесе деформацияға ұшыраған кезде, ол толқын ұзындығының ығысуына әкеледі және ТБТ "орталық толқын ұзындығының" толқын ұзындығының үлкен немесе кіші жағына жылжуына мүмкіндік береді. Толқын ұзындығының ығысу бағыты мен шамасы деформацияның немесе температураның өзгеруіне тура пропорционалды.

## **2.2 Бір модты талшықты Брэгг торымен деформацияны және температураны өлшеу принципі**

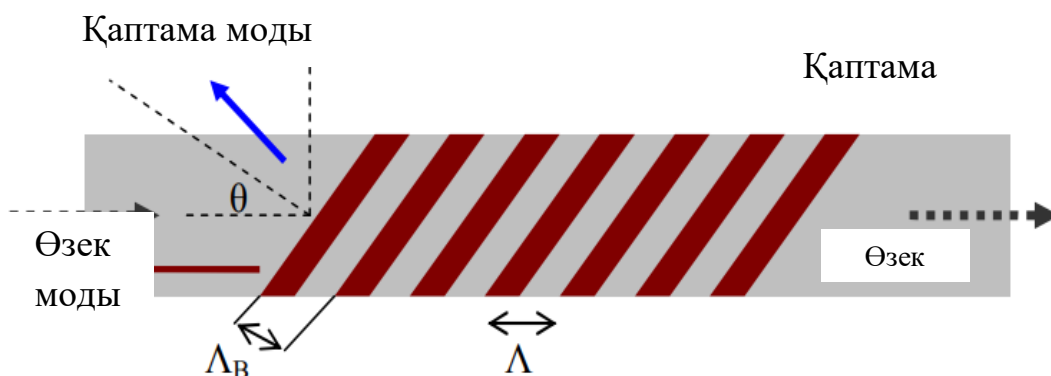
Талшықты Брэгг торлары температураға деформацияға өте сезімтал. Осындай ерекшелігі құрылыс материалдарын, ғимараттардың деформациясын анықтауға көмектеседі. Қазіргі таңда деформацияны талшықты Брэгг торынан өткен толқын ұзындығының ығысу ажыратымдылығы арқылы анықтау кең таралған. Оны фазалық ығысу деп атайды. Фазалық ығысу принципі арқылы талшықты Брэгг торының сезімталдығы арта түседі. Осы орайда көлбеу ТБТ-ның да пайдалану перспективі жоғары. Себебі, ондағы датчиктер температураны да және деформацияны да анықтауға көмектеседі. Стандартты торлар температура мен деформацияға екі түрлі сенсорлар қолданады. Ал бір параметрді есептеу барысында екінші сенсор қапталады. Алайда ғылымның дамуы бір модты талшықты Брэгг торымен екі параметрлерді де анықтауға мүмкіндік береді.

Көлбеу Брэгг талшықты торы (КБТТ) - әртүрлі зондтау және байланыс жүйелерінде қолданылатын талшықты-оптикалық құрылғының бір түрі. КБТТ жарықтың белгілі бір толқын ұзындығының шағылуын тудыратын сыну индексінің бұзылуының мерзімді құрылымын қамтитын оптикалық талшық аймағынан тұрады.

КБТТ өзегі мен қабығының жұптасу моды – бұл құрылғының температура, деформация немесе сыну көрсеткішінің өзгеруі сияқты белгілі бір сыртқы факторларға сезімталдығын арттыру үшін қолданылатын әдіс. Бұл әдіс КБТТ оптикалық талшықтың өзегі мен қабығының моды арасында жарық жібере алатындығына негізделген және оның байланыс күші құрылғыға қолданылатын сыртқы әсерлерге байланысты.

КБТТ-ны белгілі бір бұрышқа еңкейту арқылы талшықтың өзек модын белгілі бір толқын ұзындығындағы қабық модына қосуға болады. КБТТ температураның өзгеруі немесе деформация сияқты сыртқы факторларға ұшыраған кезде, жарықтың шағылысқан толқын ұзындығы ығысады, Бұл сыртқы әсердің шамасын көрсетеді. Бұл әдісте шағылысқан толқын ұзындығының ығысуын өлшеуге және сыртқы фактордың шамасын анықтау үшін пайдалануға болады.

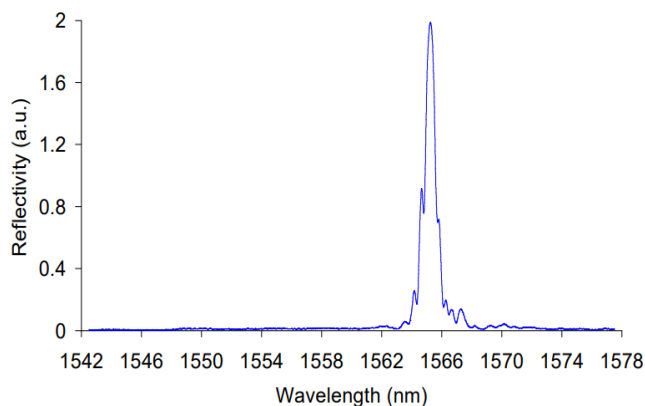
Талшықтың өзегін КБТТ қабығымен жұптастыру технологиясы – бұл құрылымның күйін бақылау, қоршаған ортаны зондтау және биомедициналық зондтау сияқты әртүрлі қосымшаларда қолдануға болатын қуатты өлшеу әдісі.



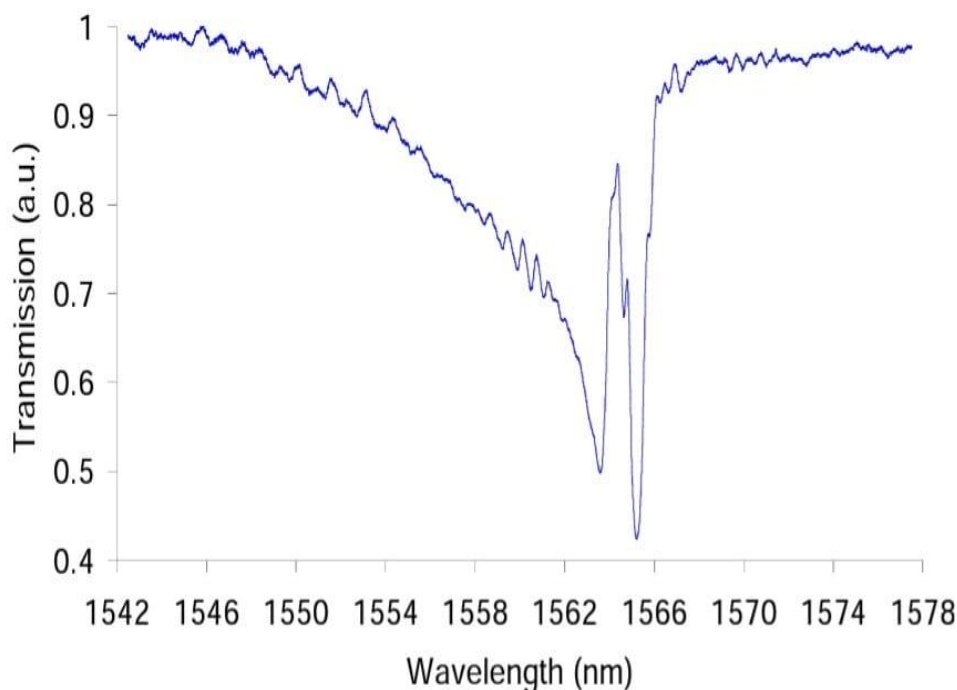
2.7-сурет – Көлбеу Брэгг талшықты торы схемасы

мұндағы:  $\Lambda$  - талшықты тордың периоды;  
 $\theta$  - жарықтың түсу бұрышы

Көлденең Брэгг талшығының ұзындығы 5 мм, ал жарық түсу бұрышы  $1,5^\circ$ . Жарық көзі ретінде толқын ұзындығы 240 нм ультракүлгін сәулесі пайдаланылды. Брэгг торынан шағылған және өткен спектрлері 2.7, 2.8 – суреттерде көрсетілген.

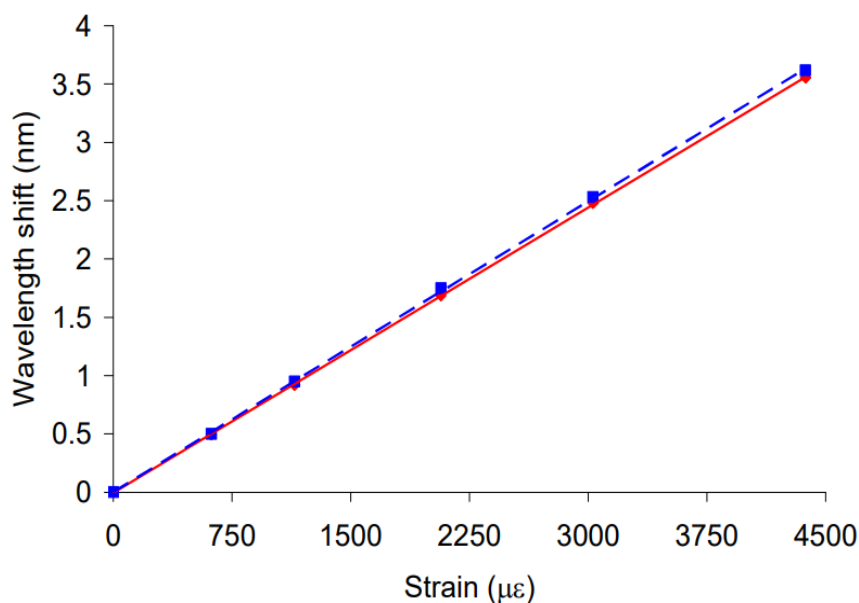


2.8-сурет – Көлбеу Брэгг талшықты торының шағылу спектрі

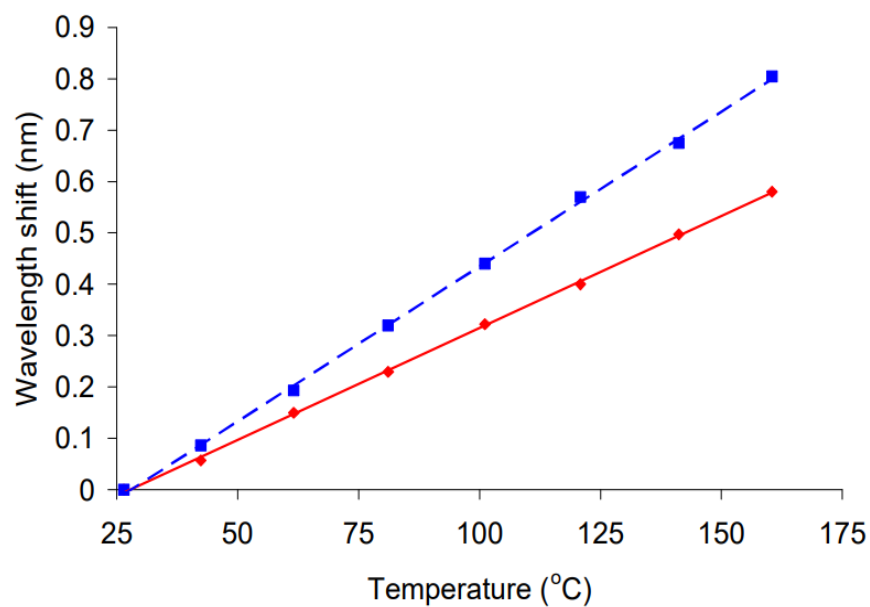


2.9-сурет – Көлбеу Брэгг талшықты торының өту спектрі

Көлбеу талшықты Брэгг торының бір жағы қозғалмайтын блокқа жалғанды, ал екінші жағы қозғалатын блокқа орнатқызылды. Осылайша оны созу арқылы деформациясын анықтай аламыз. Сосын КТБТ температураны бақылай алатын арнайы пеште орнатқызылды. Температура мен деформация әсерінен толқын ұзындығының ығысуы 2.8 және 2.9 суреттерде көрсетілген.



2.10-сурет – Деформацияның резонанстық сипаттамасы



2.11-сурет – Температураның резонанстық сипаттамасы

Мұнағы қызыл түзумен «өзек-өзек» модындағы резонанс ал көк түзулер «өзек-қапатама» модындағы резонанстар. Бұл зерттеу арқылы бір сенсор көмегімен бір спектрлік диапазонда температураны да деформацияны да өлшеуге мүмкіндік береді.

### **3 Талшықты брэгг торындағы өлшеу қателіктерін optisystem бағдаламасында зерттеу**

Талшықты Брэгг торлары әдетте оптикалық талшықты өлшеу жүйелерінде қолданылады, мұнда оларды деформация, температура және қысым сияқты әртүрлі параметрлерді өлшеу үшін пайдалануға болады. Алайда, кез-келген өлшеу жүйесі сияқты, ТБТ өлшеу қателіктеріне ұшырауы мүмкін. ТБТ - дегі өлшеу қателіктерінің көздерін жалпы екі санатқа бөлуге болады: ішкі қателер және сыртқы қателер [27].

Ішкі қателер - бұл ТБТ-ге тән қателер. Бұл қателер өндіріс процесі, талшық сапасы немесе ТБТ дизайны сияқты факторларға байланысты болуы мүмкін. ТБТ - дегі кейбір жалпы ішкі қателіктерге мыналар жатады:

1) Гетерогенді тор құрылымы. Талшықты Брэгг торы әдетте талшықта тор құрылымын жасайтын периодты жарық ағынына әсер ету арқылы жасалады. Егер тор құрылымы гетерогенді болса, бұл шағылысу қабілетінің өзгеруіне және ТБТ толқын ұзындығының сипаттамасының өзгеруіне әкелуі мүмкін;

2) Температураға сезімталдық. ТБТ температураның өзгеруіне сезімтал болуы мүмкін, бұл ТБТ толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі. Бұл сезімталдықты басқа температуралық сипаттамалары бар екінші ТБТ пайдалану арқылы азайтуға болады;

3) Деформацияға сезімталдық. ТБТ деформацияның өзгеруіне де сезімтал болуы мүмкін, бұл ТБТ толқындық сипаттамасының ығысуына әкелуі мүмкін. Бұл сезімталдықты деформацияға ұқсас реакциясы бар материалға ТБТ енгізу арқылы азайтуға болады;

Сыртқы қателер – бұл өлшеу қондырғысына қоршаған ортаның әсері сияқты сыртқы факторлардың әсерінен болатын қателер. ТБТ өлшеудегі кейбір жалпы сыртқы қателіктерге мыналар жатады:

1) Сигнал/шу қатынасы (SNR). ТБТ өлшеу дәлдігіне өлшеу жүйесінің сигнал/шу қатынасы әсер етуі мүмкін. Төмен SNR-дің өзі ТБТ-ның толқын ұзындығының сипаттамасының өзгеруіне әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде өлшеу қателеріне әкеледі;

2) Калибрлеу қателері. ТБТ өлшеу дәлдігіне өлшеу жабдығын калибрлеу қателері немесе өлшеу параметріндегі қателер сияқты калибрлеу қателері де әсер етуі мүмкін.

3) Қоршаған орта факторлары. ТБТ өлшемдеріне температура, ылғалдылық және діріл сияқты қоршаған орта факторлары әсер етуі мүмкін. Бұл факторлар ТБТ толқын ұзындығының сипаттамасында өзгерістер тудырады.

Жалпы Талшықты Брэгг торына негізделген өлшеу қателіктерінің көздерін мұқият қарастырып, осы қателіктерді азайту немесе өтеу үшін тиісті әдістерді қолдану маңызды. Бұл арнайы өлшеу жабдықтарын, калибрлеу және компенсациялық әдістерін қолдануды және ТБТ қолданылатын ортаны мұқият бақылауды қамтуы мүмкін [28].



Талшықты Брэгг торының сезімтал механизмі температураның өзгеруіне және деформацияға байланысты пайда болады, бұл Талшықты Брэгг торының орталық толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі, сондықтан тордың шағылысу және өткізу спектрлерін өзгертеді. Тордың орталық Брэгг толқын ұзындығы келесідей формуламен берілген:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (3.1)$$

мұндағы  $\lambda_B$ - талшықты Брэгг торының толқын ұзындығы;

$n_e$ - тиімді көрсеткіш;

$\Lambda$  - тор периоды.

Талшықты Брэгг торын модельдеу үшін Optisystem бағдарламасы таңдап алынды.

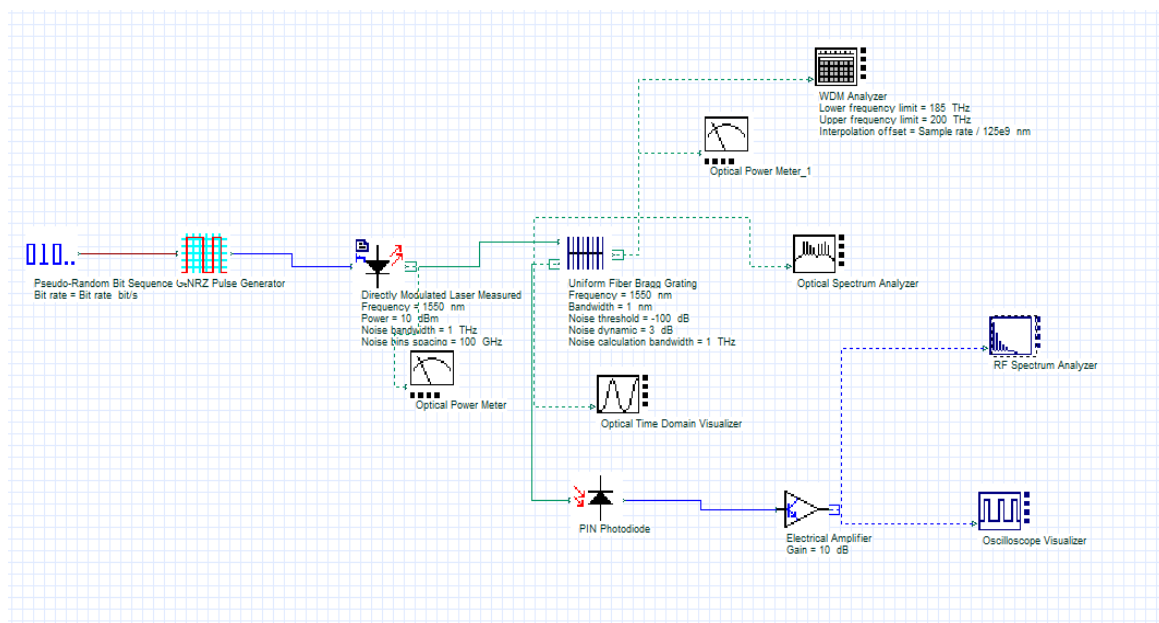
OptiSystem – оптикалық байланыс жүйелерін жобалауға, модельдеуге және талдауға арналған бағдарламалық құрал. Оны Optiwave Systems Inc компаниясы жасаған. Университеттерде, ғылыми орталықтарда және өндірістік қондырғыларда оптикалық жүйелерді зерттеу мен дамытуда кеңінен қолданылады.

OptiSystem оптикалық байланыс жүйелерінің әртүрлі түрлерін, соның ішінде талшықты-оптикалық байланыс жүйелерін, оптикалық желілерді және оптикалық кеңістіктік жүйелерді жобалауға және модельдеуге арналған құралдардың толық жиынтығын ұсынады. Ол жарық көздері, модуляторлар, детекторлар, күшейткіштер, сүзгілер, мультиплексорлар, демультимплексорлар және оптикалық талшықтар сияқты компоненттер мен модульдердің кең ауқымын қамтиды [30].

Optisystem көмегімен пайдаланушылар виртуалды ортада күрделі оптикалық байланыс жүйелерін құра алады және модельдей алады, сонымен қатар әртүрлі жұмыс жағдайларында олардың өнімділігін талдай алады. Ол көз диаграммаларын, Бер өлшемдерін, қуат спектрлерін және сигнал/шу қатынасын есептеуді (SNR) қоса алғанда, талдау құралдарының кең ауқымын ұсынады. OptiSystem сонымен қатар пайдаланушыларға параметрлерді тексеру және оңтайландыру зерттеулерін орындау арқылы дизайнын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Жалпы, OptiSystem оптикалық байланыс жүйелерін модельдеу мен талдаудың қуатты құралы болып табылады және оны бүкіл әлем бойынша зерттеушілер, инженерлер мен студенттер пайдаланады.

Модельдеу бағдарламасында бір модты температураны тіркеуге арналған оптикалық жүйе моделденді (3.1 - сурет).



3.1-сурет – Талшықты Брэгг торы бар температураны тіркеуге арналған сенсорлы жүйенің блок схемасы

Талшықты Брэгг торы бар температураны тіркеуге арналған сенсорлы жүйе келесідей құрылғылардан тұрады:

1) Psevdo-Random Bit Sequence – жалған кездейсоқ бит тізбегі генераторы: кездейсоқ бит тізбегі жылдамдығы = 1 Гбит / с тізбекті генерациялайды;

2) NRZ импульстік генераторы. Жалған кездейсоқ реттіліктен импульстік сигналдар шығарады;

3) Directly Modulated Laser Measured. Импульстік сигналдарды электрлік ауданнан оптикалық ауданға түрлендіреді. Бұл импульстік сәулелерден лазер сәулесін шығаратын тар ені бар лазер көзі. Оның толқын ұзындығы 1550 нм және қуаты 10 мВ тең.

4) Uniform Bragg Grating(біркелкі талшықты Брэгг торы). Температураның өзгерісін тіркейтін сенсор. Мұнда температураны анықтау лазерді шағылысу спектрінің сызықтық аймағына байланыстыру және толқын ұзындығының ығысуын бақылау арқылы жүзеге асырылады.

5) Optical Spectrum Analyzer (Оптикалық спектр анализаторы). Жілікке (Гц) немесе толқын ұзындығына (м) қатысты сигналдың қуатын көрсетеді;

6) Optical Time Domain Visualizer (уақыт аймағының оптикалық визуализаторы). Қуаттың уақытқа тәуелділігін бейнелейді;

7) Photo-detector PIN – сигналды оптикалық ауданнан электрлік ауданға түрлендіреді;

8) Электрлік күшейткіш – электр сигналын күшейтеді, күшейту коэффициенті 10 мВ-ке тең.

9) Oscilloscope Visualizer – сигнал амплитудасын көрсетеді;

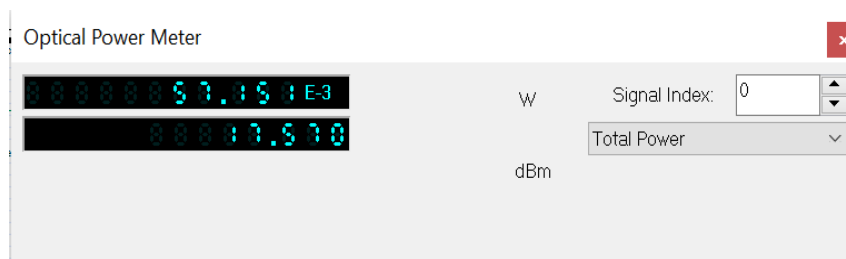
- 10) Optical Power Meter (оптикалық қуат өлшеуіш)  
11) WDM Analyzer – шу мен сигнал қатынасын және жиілік пен толқын ұзындығын есептейді.

Мұндағы:

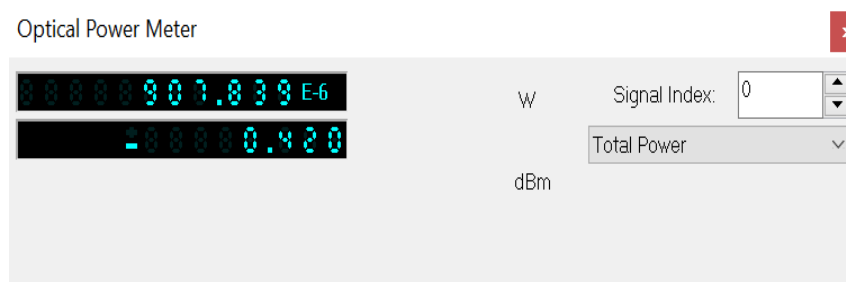
- көк сызықтар өлшеу амалын;
- қызыл электр сигналдарын;
- жасыл оптикалық сигналдарды көрсетеді.

Температураны тіркейтін талшықты торы бар жүйенің жарық көзі рөлін Directly Modulated Laser Measured лазер сәулесі атқарады. Одан әрі температура детекторы болып табылатын талшықты Брэгг торына сәуле өтеді.

Optical Power Meter - бұл визуализатор пайдаланушыға оптикалық сигналдардың орташа қуатын есептеуге және көрсетуге мүмкіндік береді. Оптикалық қуат өлшегіш компоненті оптикалық сигналдың қуатын өлшейді және нәтижені оптикалық жүйенің басқа компоненттерімен талдауға болатын электрлік сигнал түрінде шығарады. 3.2, 3.3-суреттерде кіріс және шығыс сигналдарының қуаты көрсетілген.

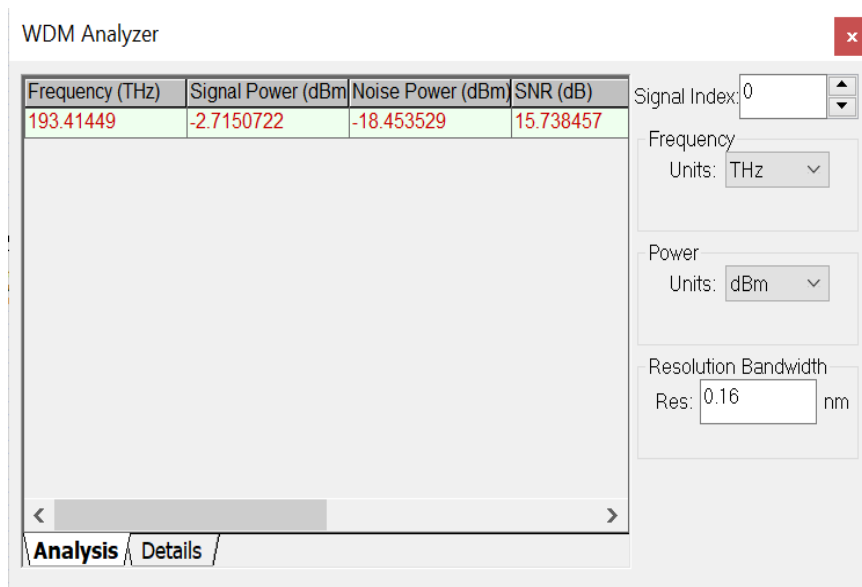


3.2-сурет – Сигналдың кіріс қуаты



3.3-сурет – Сигналдың шығыс қуаты

WDM Analyzer (Толқын ұзындығы бойынша бөлінген Мультиплексті анализатор) – бұл визуализатор визуализатор кірісіндегі әрбір WDM арнасы үшін оптикалық қуатты, шуды, SNR, OSNR, жиілікті және толқын ұзындығын автоматты түрде анықтайды, есептейді және көрсетеді.



3.4-сурет – WDM Анализаторынан алынған нәтижелер

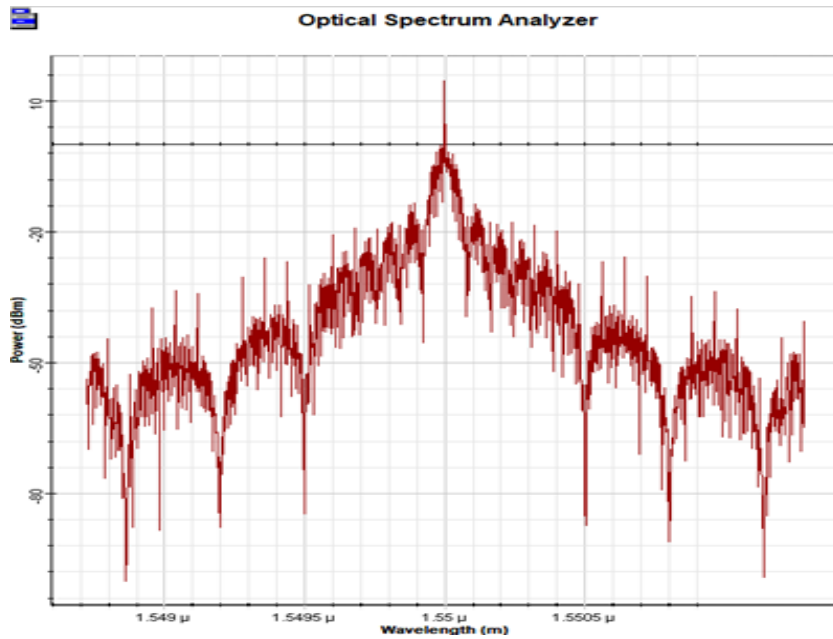
WDM өткізу қабілеттілігіне негізделген оптикалық арна үшін сигнал мен шу қуатын бағалайды.

Алынған сигнал/шу коэффициенті (SNR) келесідей есептеледі:

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left[ \frac{P_s(mW)}{P_n(mW)} \right] = P_s(dBm) - P_n(dBm) \quad (3.2)$$

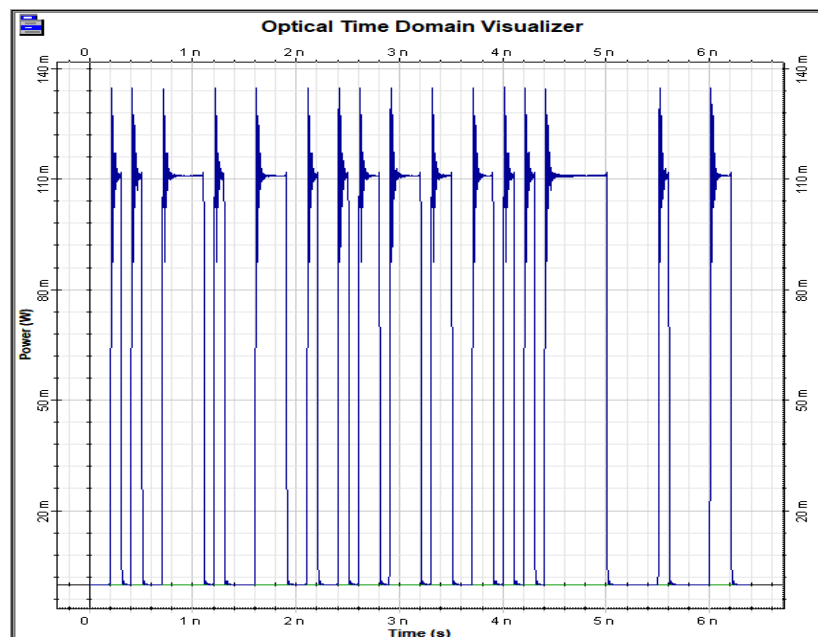
мұндағы  $P_s$  – сигнал қуаты,  
 $P_n$  – шу қуаты.

Оптикалық спектр анализатор көмегімен қуат пен толқын ұзындығының тәуелділік графигі алынды (3.5 – сурет). Ол толқын ұзындығын бақылауға мүмкіндік береді. Спектрден қуаттың толқын ұзындығының белгілі бір мәніне жеткенде төмендейтіні байқалады.



3.5-сурет – Толқын ұзындығының қуатқа тәуелділік спектрі

Optical Time Domain Visualizer – бұл визуализатор пайдаланушыға белгілі бір уақыт аралығында оптикалық сигналдарды есептеуге және көрсетуге мүмкіндік береді. Ол X және Y поляризациялары үшін сигналдың қарқындылығын, жиілігін, фазасын және альфа параметрлерін көрсете алады, сонымен қатар автокорреляция және оптикалық стробинг түрлендіргіші сияқты ультра қысқа импульстарды сипаттаудың кеңейтілген мүмкіндіктерін ұсынады. Біздің жағдайымызда 3.6 - суретте қуат пен уақыт арасындағы тәуелділік көрсетілген. Сондай ақ шу және сигналды қоса алғанда бейнеленген.

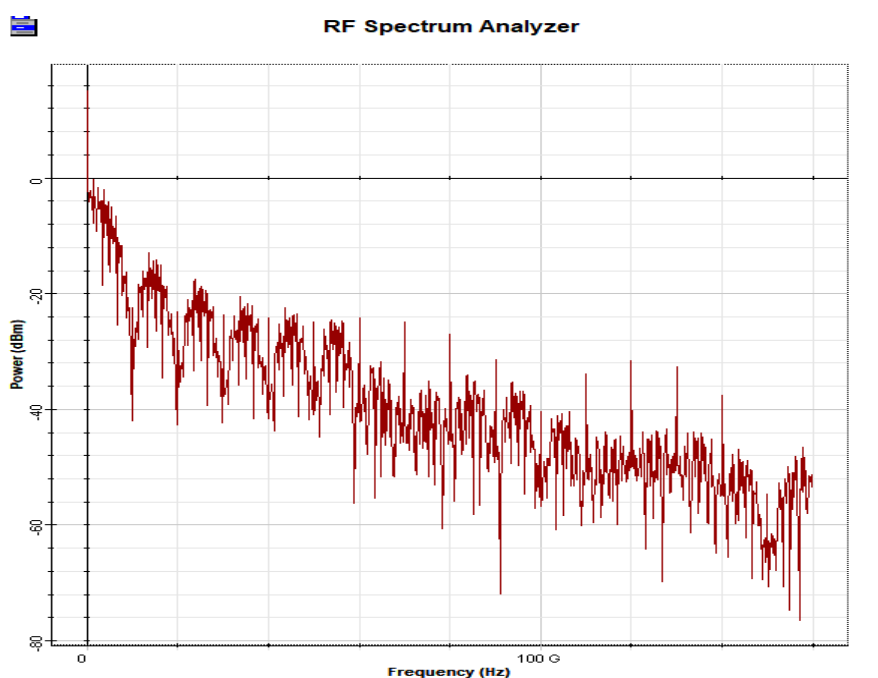


3.6-сурет – ОРТВ дисплейінегі спектр

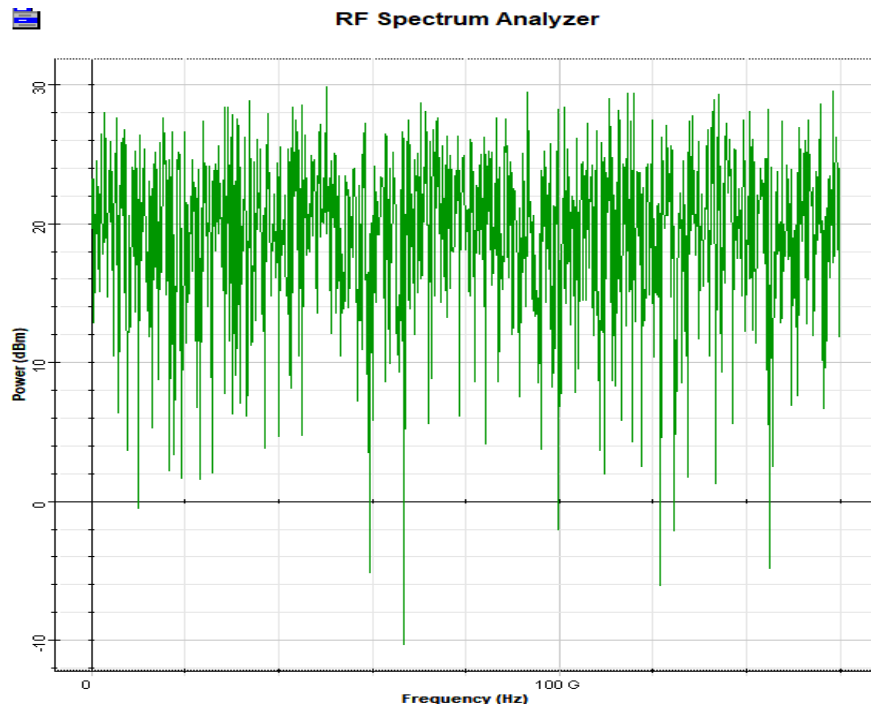
RF Spectrum Analyzer жиілік аймағында электр сигналын есептеуге және көрсетуге мүмкіндік береді. Радиожиілік спектрінің анализаторы – радиожиілік сигналының жиілік спектрін визуализациялау және талдау үшін қолданылатын құрылғы. Ол әдетте жиілік аймағындағы сигналдарды өлшеу және талдау үшін радиожиілік техникасы саласында қолданылады.

Спектр анализаторы кіріс сигналын қабылдау және оны Фурье түрлендіру деп аталатын процесс арқылы жеке жиілік компоненттеріне бөлу арқылы жұмыс істейді. Содан кейін жиілік компоненттері графикте көрсетіледі, әр компоненттің амплитудасы оның жиілігіне сәйкес келеді. Бұл график жиілік спектрі немесе қуат спектрі ретінде белгілі (3.7 , 3.8 - суреттер).

Радиожиілік спектрінің анализаторларын аналогтық және цифрлық модуляция тізбектерін, шу мен кедергі көздерін, сондай-ақ жоғары жиілікті немесе кеңейтілген спектрлі сигналдарды қоса алғанда, радио сигналдардың әртүрлі түрлерін талдау үшін пайдалануға болады. Оларды ақаулықтарды жою және радиожиілік тізбектерін жөндеу, радиожиілік құрылғыларын сипаттау және кедергі немесе рұқсат етілмеген берілістер үшін радиожиілік спектрін бақылау сияқты көптеген қосымшалар үшін пайдалануға болады.

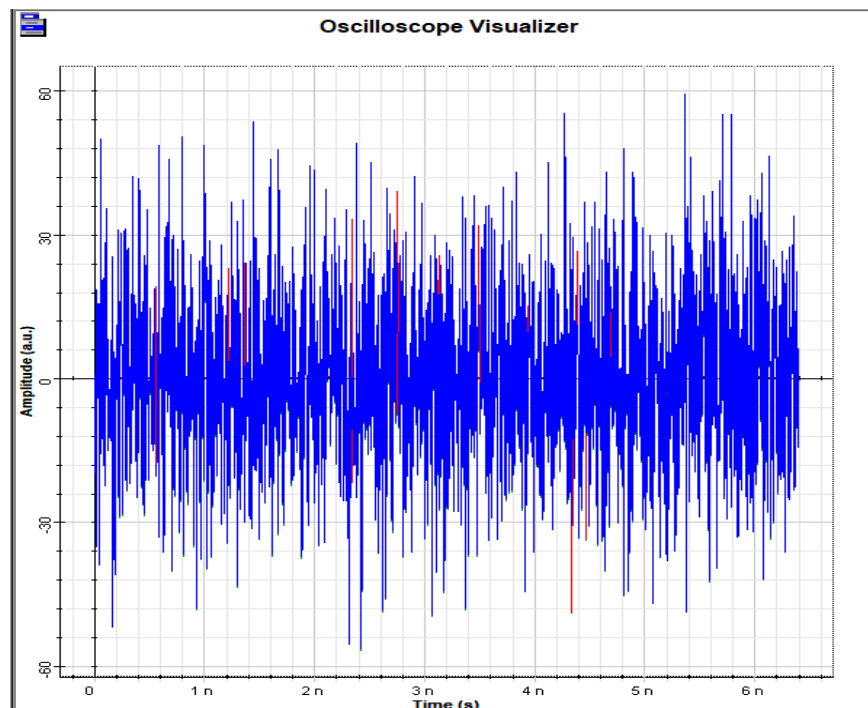


3.7-сурет – Радиожиіліктегі спектрдегі сигнал спектрі



3.8-сурет – Радиожиіліктегі спектрдегі шу спектрі

Белгілі бір уақыт аралығындағы сигнал амплитудасын анықталды. Сигнал амплитудасының ең жоғары мәні 67 а.у көрсетеді.



3.9-сурет – Амплитуданың уақытқа тәуелділігі

Жалпы алғанда температура өзгерісіне сезімтал талшықты Брэгг торлы жүйені модельдей отырып өлшеу қателіктерін анықтау дәл және сенімді

өлшеулерді қамтамасыз ету үшін маңызды екеніне көз жеткізілді. ТБТ жүйелеріндегі өлшеу қателіктерін анықтаудың бірнеше әдісі:

1. Шағылысқан спектрді тексеру. ТБТ-ден шағылысқан спектр шыққан спектрге сәйкес келетініне көз жеткізу үшін оны үнемі тексеріп отыру керек. Шағылысқан спектрдегі кез-келген күтпеген өзгерістер температураның өзгеруі немесе деформация сияқты өлшеу қателіктерін көрсетуі мүмкін.

2. Оптикалық қуатты бақылау. ТБТ жүйесінің әртүрлі нүктелеріндегі оптикалық қуатты бақылау оптикалық сигналға әсер ететін жоғалтулардан немесе басқа факторлардан туындаған өлшеу қателіктерін анықтауға көмектеседі.

3. Калибрлеуді тексеру. Өлшеу дәлдігін қамтамасыз ету үшін ТБТ жүйесін калибрлеу маңызды. Өлшенген мәндерді белгілі стандарттармен салыстыру арқылы калибрлеуді үнемі тексеру өлшеу жүйесіндегі қателерді анықтауға көмектеседі.

4. Модельдеу бағдарламалық құралын пайдалану. ТБТ жүйесін модельдеу бағдарламалық құралын пайдалану және модельдеу нәтижелерін өлшенген мәндермен салыстыру өлшеу жүйесіндегі қателерді анықтауға көмектеседі.

ТБТ жүйелерінде кез-келген ақауларды тез жоюға болады, бұл өлшеу нәтижелерінің дәл және сенімді болуын қамтамасыз етеді. Сондай-ақ, ТБТ жүйелеріне температура, деформация және дірілді қоса алғанда, қоршаған орта факторларының тұтас ауқымы әсер етуі мүмкін екенін ескеру маңызды, бұл өлшеу қателіктеріне әкелуі мүмкін. Осы Қоршаған орта факторларын үнемі бақылау және есепке алу ТБТ дәл және сенімді өлшемдерін сақтау үшін өте маңызды.

Қателерді анықтаумен қатар, жүйелеріндегі өлшеу қателіктерінің көздерін түсіну де маңызды. Кейбір жалпы қате көздеріне температураның ауытқуы, механикалық кернеулер, поляризацияға тәуелділік және оптикалық қуаттың ауытқуы жатады. Қателер көздерін түсіну арқылы бұл қателерді азайту немесе жою және өлшеу дәлдігін қамтамасыз ету үшін қадамдар жасауға болады.

Жалпы, ТБТ жүйелеріндегі өлшеу қателіктерін анықтау өлшеу нәтижелерінің дәл және сенімді болуын қамтамасыз ету үшін жүйені үнемі бақылауды, калибрлеуді және тексеруді қамтиды. Осы шараларды жүзеге асырудың арқасында кез-келген қателерді тез анықтауға және жоюға болады, бұл FBG жүйесінің дәл және сенімді өлшемдерді қамтамасыз етуін қамтамасыз етеді.



## ҚОРЫТЫНДЫ

1. Талшықты Брэгг торының толқын ұзындығының қоршаған орта температурасына тәуелділігі зерттелінді. Зерттеуді фазалық маска әдісімен климаттық камерада жүргізілді. Нәтижесінде Брэгг торының толқын ұзындығы қоршаған орта температурасына сызықты тәуелді екені айқын байқалды. Зерттеу  $0^{\circ}\text{C}$ -тан  $50^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температура шамаларында жүргізіліп,  $40^{\circ}\text{C}$  температурасында толқын ұзындығы ең жоғары мәніне жететіні анықталды.

2. Температура мен деформация параметрлері көлбеу талшықты Брэгг торында зерттелінді. Көлбеу талшықты Брэгг торын екі параметрді бір спектрлік диапазонда анықталды. Бір сенсорды пайдалану арқылы олардың резонанстық ығысу шындары алынды.

3. Температураға сезімтал талшықты Брэгг торы бар жүйе Optisystem қолданбалы бағдарламасында модельденді. Модельдеу компоненттері арқылы талшықты тор негізіндегі қателіктер мен спектрлер және сигнал қуаттары анықталды. Өлшеу қателіктері әртүрлі себептерден туындауы мүмкін. Біздің моделімізде нақты қателік көздері шу бодып табылады. Шуды анықтау әртүрлі визуализаторлар көмегімен жүргізілді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // Results in Physics. – 2019. – V. 15. – P. 102.
2. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings // San Diego, CA: Academic Press. – 1999. – 478 p.
3. Васильев С. А., Медведков О.И., Королев И. Г., Божкова А. Куркова С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение. - Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085-1103.
4. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // Results in Physics. – 2019. – V. 15. – P. 102542
5. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings // San Diego, CA: Academic Press. – 1999. – 478 p.
6. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божкова С., Куркова С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 12. – С. 1085-1103.
7. Frazao L.A., Ferreira F.M, Santos J.L. Applications of fibre optic grating technology to multi-parameter measurement // Fibre Int. Opt. -2005. -Vol. 24 - P. 227 – 244.
8. Spirin V.V, Shlyagin M.G, Miridonov S.V. Temperature-insensitive strain measurement using differential double Bragg grating technique // Opt. Laser Technol. -2001. -Vol. 33. -P. 43 - 46.
9. Dennison C. R., Wild P. M., Wilson D. R., Cripton P. A. A minimally invasive in-fiber Bragg grating sensor for intervertebral disc pressure measurements // Meas. Sci. Technol. -2008. -Vol. 19. -№ 8. -P. 85.
10. Mihailov S. J. Fiber bragg grating sensors for harsh environments // Sensors. – 2012. -Vol. - № 2. -P. 1898–1918.
11. Xu M.G, Archambault J.L, Reekie L., Dakin J.P. Discrimination Between Strain And Temperature Effects Using Dual-Wavelength Fiber Grating Sensors // Electron. Lett. -1994. -Vol. 30. -P. 1085 - 1087.
12. Cavaleiro P. M., Araujo F.M, Ferreira L.A., Santos J.L., Farahi F. Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers // IEEE Photon. Technol. Lett. -1999. -Vol. 11. -P. 635 – 1637.
13. James S W., Dockney M.L., Tatam R.P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors // Electron. Lett. -1996. -Vol. – 32. -P. 1133 - 1134.
14. Shu X.W., Liu Y., Zhao D.H., Gwandu B., Floreani F., Zhang L., Bennion I. Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement // Opt. Lett. - 2002. -Vol. 27. -P. 701- 703.
15. Shu X.W., Zhao D.H., Zhang L., Bennion I. Use of dual-grating sensors formed by different types of fiber Bragg gratings for simultaneous temperature and strain measurements // Appl. Opt. -2006. -Vol. 43. -P. 2006 - 2012.

16. Wade S.A., Forsyth D.I., Guofu Q., Chen X., Chuan T.S., Yong W., Sun T. Dual measurement of strain and temperature using the combination of Er<sup>3+</sup>-doped fibre fluorescence lifetime and a fibre Bragg grating. // *Meas. & Control*. -2001. -Vol. 34. -P.175 - 178.
17. Davis M.A., Kersey A.D. Simultaneous measurement of temperature and strain using fibre Bragg gratings and Brillouin scattering // *IEE Proc-Optoelectron*. - 1997. -Vol.144. -P. 151- 155.
18. Brady G.P., Kalli K., Webb D.J., Jackson D.A., Reekie L., Archambault J. L. Simultaneous measurement of strain and temperature using the first- and second order diffraction wavelengths of Bragg gratings // *IEE Proc -Optoelectron*. -1997. -Vol. 144. -P.156 -161.
19. Guan B.O, Tam H.Y., Chan H.L.W., Choy C.L., Demokan M. S. Discrimination between strain and temperature with a single fiber Bragg grating // *Microwave Opt. Tech. Lett*. -2002. -Vol. 33. -P. 200 - 202.
20. Frazao O., Santos J.L. Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibres // *J. Opt. A*. -2004. -Vol. 6. -P. 553 -556.
21. Zhao Z.Y., Zhang S., Yu Y.S, Zhuo Z.C., Qian Y., Cao Y.H., Zhang J., Zheng and W., Zhang Y.S. A simple temperature-independent strain sensor using a fiber Bragg grating // *Microwave Opt. Tech. Lett*. -2004. -Vol. 43. -P. 324 - 326.
22. Chen G.H.L., Liu Y., Jia H.Z., Yu J.M., Xu L., Wang W.C. Simultaneous strain and temperature measurements with fiber Bragg grating written in novel Hi-Bi optical fibre // *IEEE Photon. Tech. Lett*. -2004. -Vol. 16. -P. 221 - 223.
23. Erdogan T., Sipe J.E. Tilted fiber phase gratings // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 1996. -Vol.13. -P. 296- 313.
24. Tosi D. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors. // *Sensors*. -2017. -Vol. 17. -P. 236.
25. Xu M.G., Archambault J.-L., Reekie L., Dakin J. P. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors // *Electronics Letters*. -2015. -Vol. 30. -№3. -P. 1085–1087.
26. Liu N., Li Y., Wang Y., Wang H., Liang W., Lu P. Bending insensitive sensors for strain and temperature measurements with Bragg gratings in Bragg fibers // *Optics Express*. -2011. -Vol.19.-№15. -P.138., 2011.
27. Al-Fakih E., Osman N. A. A., Adikan F. R. M. The use of fiber bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: The state-of-the-art and ongoing research topics // *Sensors (Switzerland)*. -2012. -Vol. 12. -№10. -P. 12890–12926.
28. Wei C. L. A fiber Bragg grating sensor system for train axle counting // *IEEE Sens. J*. -2010. -Vol.10. -№12. -P.1905–1912.

## СЫН-ШІКІР

### ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тлеуов Қажымұрат Абделұлы

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

**Тақырыбы:** «Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу қателігін талдау»

Орындалды:

- а) графикалық 16 бет
- б) түсініктеме 21 бет

### ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Бұл дипломдық жұмыста талшықты Брэгг торы негізіндегі есептеулер мен өлшеу қателіктерін зерттеуге арналған.

Талшықты Брэгг торларының тарихына, қолдану салаларына шолу жасалынды. Сонымен қатар олардың жұмыс жасау принциптері, қолданылатын сенсорлар мен қолдану маңызы және талшықты. Жұмыс барысында талшықты Брэгг торының сыртқы орта әсеріне тәуелділігі таныстырылған.

Дипломдық зерттеуі барысында, талшықты Брэгг торына сыртқы ортаның яғни температураның әсері зерттелінген. Талшықты Брэгг торлары температура, деформацияға сезімталдығы бір модты көлбеу орналастырылған талшықты Брэгг торының көмегімен зерттелінді. Ал талшықты Брэгг торы негізіндегі өлшеу қателіктері Optisystem бағдарламасында модельденіп, зерттелінді. Модельдеу арқылы өлшеу қателіктерінің көздерінің табиғаты, себебі мен оларды шешу жолдары қарастырылды. Дипломдық жұмыстың тәжірбиелік бөлімінде жоғарыда аталған мәселер мен оларды шешу жолдары қарастырылды.

### ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Бағалау үшін орындалған дипломдық жұмыс «92/ A/» деген баға беруге және Тлеуов Қажымұрат 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы бойынша бакалавр академиялық дәрежесіне лайықты деп санаймын.

#### Рецензия беруші

PhD, доцент

Ғ. Даужесев атындағы Алматы энергетика және  
Байланыс университеті

Алмуратова Н.К.

«02» 02 2023 ж.

**Тақырыбы:** «Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу қателігін талдау»

Тлеуов Қажым Абделұлы

6B007104 – Electronics and Electrical Engineering

### ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Ұсынылған дипломдық жұмыс берілген тапсырмаға сәйкес келеді. Бұл қызметті дамытуда Амандықова Диана өзінің шеберлігі мен білімін көрсетті. Барлық мақсаттар мен міндеттер орындалды.

Талшықты Брэгг торларының тарихына, қолдану салаларына шолу жасалынды. Сонымен қатар олардың жұмыс жасау принциптері, қолданылатын сенсорлар мен қолдану маңызы және талшықты. Жұмыс барысында талшықты Брэгг торының сыртқы орта әсеріне тәуелділігі таныстырылған

Бірінші бөлімде Брэгг торы сенсорлары жайлы және оның жұмыс істеу принципі, артықшылықтары және мүмкіндіктері жайлы түсіндірілді.

Екінші бөлімде Брэгг торы құрылысы, жұмыс істеу принципі түсіндірілді. Жұмысты артықшылықтары мен мүмкіндіктеріне анықтама берілді.

Үшінші бөлімде Брэгг торы мүмкіндіктерімен оның бағдарламада қолданылуы арқылы өлшеу қателігінің параметрлері алынды.

Қорытындылай келе, температураға сезімтал талшықты Брэгг торы бар жүйе Optisystem қолданбалы бағдарламасында модельденді. Модельдеу компоненттері арқылы талшықты тор негізіндегі қателіктер мен спектрлер және сигнал қуаттары анықталды. Өлшеу қателіктері әртүрлі себептерден туындауы мүмкін. Біздің моделімізде нақты қателік көздері шу бодып табылады. Шуды анықтау әртүрлі визуализаторлар көмегімен жүргізілді.

Студент Тлеуов Қажымұрат Абделұлы дипломдық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқаулығымен өз бетінше жұмыс істеу қабілетін көрсетті. Бағалау үшін орындалған дипломдық жұмыс «       92/ А/       » деген баға беруге және Тлеуов Қажымұрат 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы бойынша бакалавр академиялық дәрежесіне лайықты деп санаймын.

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІ**

Ph.D. доктор,

ӘТЖТ Каф қауымдастырылған профессоры

 Смайлов Н.К.

«02» 06 2023 жыл

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

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

**Автор: Тлеуов Қажымұрат Абделұлы**

**Тақырыбы: Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу қателігін талдау**

**Жетекшісі: Нуржигит Смайлов**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.9**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.4**

**Дәйексөз (35): 0.7**

**Әріптерді ауыстыру: 27**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеністіктер: 42**

**Ақ белгілер: 0**

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

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

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

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

**Негіздеме:**

7.06.2023  
Күні

Кафедра меңгерушісі



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлеуов Қажымұрат Абделұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу кателігін талдау

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 0.9

Коэффициент Подобия 2: 0.4

Микропробелы: 42

Знаки из здругих алфавитов: 27

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

7.06.2023 г.  
Дата

Заведующий кафедрой



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Тлеуов Кажымұрат Абделұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Талшықты Брэгг торы негізінде өлшеу қателігін талдау

**Научный руководитель:** Нуржигит Смайлов

**Коэффициент Подобия 1:** 0.9

**Коэффициент Подобия 2:** 0.4

**Микропробелы:** 42

**Знаки из здругих алфавитов:** 27

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

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

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

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

Обоснование:

7.06.2023 г.  
Дата

  
проверяющий эксперт