

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ӘОЖ 621.37:535

Қолжазба құқығында

ТОЛЕГЕНОВА АҚМАРАЛ АЛИБЕКОВНА

Көлбеу талшықты Брэгг торлары бар қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің оптогалшықты сенсоры

6D071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілер:

С.Сейфуллин атындағы ҚазАТЗУ, PhD доктор,
қауымдастырылған профессор Медетов Бекболат
Жаксылыкович

Люблин техникалық университеті,
PhD доктор, профессор Петр Артур Кисала

Қазақстан Республикасы
Алматы 2023 жыл

МАЗМҰНЫ

АНЫҚТАМАЛАР, БЕЛГІЛЕУЛЕР ЖӘНЕ ҚЫСҚАРТУЛАР	3
КІРІСПЕ	4
1 КӨЛБЕУ ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОрын ЖАСАУ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ТАҚЫРЫБЫНА ҚАТЫСТЫ ҒЫЛЫМИ ЕҢБЕКТЕРГЕ ШОЛУ	9
1.1 Көлбеу талшықты Брэгг торларының жарық сезгіштігі және торды қалыптастыру	10
1.2 Көлбеу талшықты Брэгг торының (TFBG) теориясы	29
2 ТӘЖІРБИЕЛІК ЗЕРТТЕУДІ ҰЙЫМДАСТЫРУ	39
2.1 Көлбеулік бұрыштары 6^0 және 8^0 болатын TFBG оптогалшыққа жазу қондырғысы	40
2.2 Ортаның сыну көрсеткішінің әр түрлі мәндерін алуға арналған ерітіндіні дайындау	41
2.3 TFBG спектрлерін тіркейтін эксперименттік қондырғы	43
3 ТӘЖІРБИЕЛІК ЗЕРТТЕУДІҢ ӨЛШЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ	52
3.1 Эксперимент нәтижесінде алынған спектрлерді нормалау	53
3.2 TFBG өткізу спектрі сипаттамаларының ортаның сыну көрсеткіштеріне тәуелділігін табу	55
ҚОРЫТЫНДЫ	80
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	81
ҚОСЫМША 1	88
ҚОСЫМША 2	91
ҚОСЫМША 3	99

АНЫҚТАМАЛАР, БЕЛГІЛЕУЛЕР ЖӘНЕ ҚЫСҚАРТУЛАР

Берілген диссертациялық жұмыста келесі қысқартулар, терминдер мен анықтамалар қолданылады:

ТБТ – талшықты Брэгг торы;

КТБТ – көлбеу талшықты Брэгг торы;

FBG – Fiber Bragg grating, талшықты Брэгг торы

TFBG – Tilted fiber Bragg grating, көлбеу талшықты Брэгг торы

ФМӘ – фазалық маска әдіс;

ТОС – талшықты оптикалық сенсор

ОТ – оптикалық талшық;

УК – ультракүлгін;

Λ – тордың периоды;

λ – жарықтың вакуумдағы толқын ұзындығы;

n_{eff} – жарықтың талшықтағы эффективті сыну көрсеткіші;

n_1 және n_2 – сыну көрсеткішінің минимум және максимум мәндері;

n_0 – тордың екі шетіндегі талшық өзегінің сыну көрсеткіші;

SRI – қоршаған ортаның сыну көрсеткіші

RI – сыну көрсеткіші

SPR – беттік плазмнды резонанс

СОА – спектрлік оптикалық анализатор

ЖК – жарық көзі

SLD – суперлюминесцентті диод

λ_{mask} – фазалық маска торының периоды

LPG – long period grating, ұзақ периодты торлар

MOF – microstructure optical fiber, микроқұрылымды оптикалық талшық

FSRMI – FreeSpectrum Matched Interrogation, еркін спектрге сәйкес сұрау

MFBG – multi mode fiber Bragg grating, көп модальды талшықты Брэгг торы

ETFBG – excessively tilted fibre Bragg grating, шамадан тыс көлбеу талшықты

Брэгг торы

SMF – single mode fiber, бірмодальды оптикалық талшық

MMF – multi mode fiber, көпмодальды оптикалық талшық

SPF – single polarization fiber, бір поляризациялық талшық

КІРІСПЕ

Жұмыстың жалпы сипаттамасы.

Диссертациялық жұмыста 6^0 және 8^0 көлбеу бұрыштары бар көлбеу талшықты Брэгг торларын (TFBG), олардың өткізу спектрлерін және қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелділігі бар спектрлік параметрлерді зерттейміз. Сенсорлық сенсорлық спектр ені мен минимумы сияқты бірнеше сипаттамалар қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелді болуы мүмкін екендігі көрсетілген. Сенсорлық сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелділігі көлбеу бұрыштары бойынша оқшау орналасқан (тәуелділік графиктері қиылыспайды). Спектрдің минимумының сызықтық тәуелділігі тек 8^0 көлбеу бұрышында байқалады және оның сызықтылық деңгейі ең жоғары. Бұл жұмыстың нәтижелерін оптикалық талшыққа негізделген қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің сенсорын әзірлеу үшін пайдалануға болады.

Зерттеудің өзектілігі. Оптикалық талшықтарды сенсор ретінде қолдану технологиялары XX ғасырдың ортасынан бастап ұсынылды. Сол уақыттан бастап, халықаралық нарықта талшықты-оптикалық сенсорларды (ТОС) қоршаған ортаның әсерін, қасиеттері мен параметрлерінің өзгерісін анықтау үшін пайдалану кең қолданыс тапты. Автоматтандырылған басқару жүйелерінің, жаңа технологиялық процестердің енгізілуімен, тиімді автоматтандырылған басқару жүйесіне көшу барысы қарқынды дамуына байланысты сенсорларға сұраныс артуда. Жоғары метрологиялық сипаттамалармен қоса, сенсорлар беріктілігі жоғары, төзімді, тұрақты, кіші өлшемді, жеңіл, энергоүнемді және ақпаратты өндеудің микроэлектронды құрылғылармен сәйкес жұмыс істеу қабілетіне ие болу керек. Бұл талаптарға талшықты оптикалық сенсорлар (ТОС) жоғары дәрежеде сай келеді.

Қарапайым датчиктер тек өздері орналасқан кеңістіктегі нүктедегі ортаның физикалық параметрлерін өлшей алады. Басқа сенсорларға қарағанда ТОС ерекшелігі кеңістікте ауқымды облысты қамти алады.

Аталған талшықты-оптикалық сенсорлардың дәстүрлі сенсорлардан айырмашылығы - олар пассивті, яғни, ылғалдан және электр желісінен оқшаулықты қажет ететін активті элементтері болмайды- транзистор, резистор, конденсаторлар, логикалық элементтер. Сонымен қатар, талшықты оптикалық сенсорлардың активті сенсорлардан артықшылығы:

1. электромагниттік өрістер өлшеу нәтижелеріне әсер етпейді;
2. бөгде электромагниттік сәуелердің (соның ішінде радиацияның) болмауы;
3. арналардың айқас бөгеттерінің болмауы;
4. әртүрлі өткізгіштердің жалғану тұстарында жерге тұйықтау мен ығысу кернеуімен байланысты мәселелердің болмауы;
5. электрлік қауіпсіздік пен доға пайда болу және ұшқындау мәселелерінің болмауы;
6. ортаның зиянды әсерлеріне жоғары төзімділік;

7. сигналдардың оңай мультиплексируленуі;
8. талшық бойымен кеңістікті тұтас физикалық шамаларды дәл бағалау мүмкіндігі;

9. мәлеметтерді жіберудің жоғары жылдамдығы.

Сонымен қатар, ТОС:

1. жарылысқа қауіпсіз болғандықтан жарылу қаупі бар ортада қолданыла алады;

2. жоғары механикалық беріктілікке, кіші өлшемдерге, қарапайым конструкцияға және жоғары төзімділікке ие;

3. химиялық инертті;

4. диэлектрик материалдардан жасалады, сондықтан, олардың бойымен электр тогы өтпейді;

5. қоршаған ортаның жоғары температурасына, механикалық соққыларына, дірілдеріне және т.б. әсерлеріне төзімді;

6. қашықтықтан және түйіспесіз өлшеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

Кей ТОС электрондық құрылғыларды мүлдем қолдануға болмайтын жағдайларда, немесе олардың қолданысы ауқымды қиындықтар мен шығындарды тудыратын жағдайларда (мысалы, айнымалы ток генераторы, трансформаторлар сынды жоғары вольтты электрлік аппараттарда температураны өлшеу; жоғары вольтты электр тасымалдау желілерінде ток пен кернеуді өлшеу; жылуөткізгіштігі төмен және айнымалы шағылдыру қабілетіне ие, қолжетімділігі қиын жерлерде шағын беттің температурасын жылдам өлшеу) қолданылуы мүмкін. ТОС қолдану артықшылығы - талшықтың ұзындығы қамти алатын ұзындық пен кеңістікті бір нүктеден бақылау мүмкіндігі (магистралды құбырлардағы сұйықтықтар мен газдардың, үлкен қоймалардың қысымдарының өзгеруін, азаюын, кемелердің, ұшақтардың және т.б. транспорттық құралдардың ішкі қаптамаларының саңылауларын қоршау).

ТОС оптоалшықтың бейсызық эффектілеріне, яғни жарықтың шашырау құбылыстарына негізделіп жасалған түрлері бар. Олар, оптоалшықты қоршаған ортаның температурасы немесе қысымы қай нүктеде өзгеріске ұшырағанын, бейсызық эффектілердің бірі Мандельштам-Брюллиэн мәжбүрлі шашырауына (МБМШ) негізделген, рефлектометр көмегімен анықтай алады. Бұл сенсорлармен қоса, Брэгг торына негізделген ТОС де қолданылады. Ол сенсорлардың МБМШ сенсорларынан ерекшелігі, оптоалшық бойындағы температура немесе қысымның қандай мәнге өзгергені туралы нақты мәлімет алуға болады.

Көптеген ғылыми зерттеулер нәтижесінде дәстүрлі талшықты Брэгг торына қарағанда көлбеу талшықты Брэгг торы қоршаған ортаның сыну көрсеткішін дәл өлшей алатындығы анықталды [1]. Сол себепті, осы зерттеу жұмыста қоршаған ортаның сыну көрсеткішін өлшеу үшін көлбеу талшықты Брэгг торы зерттеу объектісі ретінде қарастырылады. Осы уақытқа дейін жасалған жұмыстарда спектрдің ені мен минимумының ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігі қарастырылмаған және де бірнеше көлбеулік бұрыштары бар талшықты Брэгг торларының спектр параметрлерінің арасында

өзара оқшаулығын көрсететін параметрлер анықталмаған. Сондықтан осы зерттеу жұмысында келесідей мақсаттар қойылды.

Жұмыстың мақсаты. Жұмыстың негізгі мақсаты - Оптикалық талшықтағы орындалатын физикалық процестерге негізделе отырып, қоршаған орта параметрлерінің сенсорын әзірлеу мәселелерін зерттеу.

Жұмыстың мақсатына жету үшін төмендегідей бірнеше **мәселелерді** шешу қажет:

- Көлбеу талшықты Брэгг торынан өткен жарық сәулесі спектрінің қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігін эксперименталды зерттеу.

- Қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сызықты тәуелді болатындай TFBG спектрлік сипаттамаларын анықтау.

- Сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелділігі көлбеу бұрыштары бойынша өзара оқшау орналасуын қамтамасыз ететіндей спектрлік сипаттаманы анықтау. Көлбеу бұрыштары бойынша оқшау орналасуды қамтамасыз ететін спектрлік сипаттаманы іздеу бір талшықтың бойына әр түрлі көлбеу бұрышпен орналасқан Брэгг торларын жазуға мүмкіндік алу үшін қажет.

Зерттеу нысаны.

Көлбеу бұрыштары 6^0 және 8^0 болатын талшықты Брэгг торы

Зерттеу пәні.

Көлбеу бұрыштары 6^0 және 8^0 болатын талшықты Брэгг торлары арқылы өткен жарық сәулесінің спектріндегі өзгерістерді зерттеу және сол өзгерістерді сипаттайтын қанда да бір шамаларды анықтау

Жұмыстың ғылыми жаңалығы:

- Алғаш рет көлбеу бұрышы 6^0 және 8^0 болатын Брэгг торлары бар оптикалық талшықтар қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің сенсоры ретінде жұмыс істей алатындығы анықталды.

- Алғаш рет қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне ең жақсы сызықтық тәуелділікке ие TFBG спектрлік сипаттамалары табылды және ұсынылды,

- Алғаш рет сызықтылық қасиеті Брэгг торының көлбеу бұрышына тәуелді емес TFBG спектрлік сипаттамасын анықталды

Қорғауға ұсынылатын негізгі тұжырымдамалар:

1. Ұсынылған «сенсорлық спектр ені» атты жаңа спектрлік сипаттама көлбеу бұрышты Брэгг торлары жазылған оптоталшықтар ортаның сыну көрсеткішінің сенсоры ретінде қызмет атқара алатындығын нақтылайды.

2. «Сенсорлық спектр ені» ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділік функциясы қарастырылған 6 және 8 градус көлбеу бұрышты Брэгг торлары үшін толықтай сызықты болып табылады және бұл функциялардың мәндер облысы өзара қиылыспайды

3. «Сенсорлық спектр енінің» қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігінің сызықтылығын сипаттайтын коэффициенттің анықталу қателігі 6 градус көлбеу Брэгг торы үшін $4,6\%$, 8 градус үшін $3,7\%$ құрады. Бұл бұған дейін белгілі болған «жергілікті орта мәні» атты спектрлік сипаттамамен салыстырғанда кем дегенде $11,1$ пайыздық пунктіге төменірек. Яғни, «сенсорлық

спектр ені» сипаттамасы ортаның сыну көрсеткішінің өзгерісін дәлірек сипаттайды.

Жұмыстың теориялық және практикалық маңыздылығы

Диссертациялық жұмыстың нәтижелері көлбеу талшықты Брэгг торлары жазылған оптогалшыққа негізделген қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің сенсорын дайындауға мүмкіндік береді. Сондай ақ, қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сызықты тәуелді спектрлік сипаттамаларды ұсынады.

Нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі

Диссертациялық жұмыс нәтижелерінің сенімділігі мен негізділігі ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК-і ұсынған басылымдарда, Web of Science (Clarivate Analytics, АҚШ) және Scopus (Elsevier, Нидерланды) халықаралық ақпараттық ресурстарына кіретін журналда және халықаралық ғылыми конференцияларда жарияланымдардың болуымен және басқа авторлар алған нәтижелерге сәйкес болуымен расталады.

Автордың жеке үлесі

Автор диссертациялық жұмыстың барлық кезеңдеріндегі зерттеу жұмыстарына толықтай қатысты. Оқу жоспарының аясында Люблин техникалық университетінің ғылыми зертханасында тәжірбиелік жұмыстарын жүргізді, атап айтқанда оптогалшыққа TFBG жазу процесіне қатысты, TFBG өткізу спектрлерін алды, алынған спектрлер бойынша сипаттамаларды есептеп, талдау жұмыстарын автор жүргізді. Жұмыстың міндеттері мен жоспарын бекіту, нәтижелерді талқылау ғылыми жетекшімен бірге орындалды.

Жұмыстың апробациясы

Диссертациялық жұмыстың тақырыбы бойынша 6 ғылыми баспа жұмыс жарияланды, оны ішінде 2 жұмыс халықаралық конференцияларды тезис түрінде, 3 мақала философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК-і ұсынған ғылыми басылымдарда, 1 мақала Scopus халықаралық ақпараттық ресурстарына кіретін ғылыми басылымдарда жарияланды. Сонымен қатар, жұмыс нәтижесі бойынша 1 авторлық куәлік бар.

Thomson Reuters деректер базасы бойынша немесе Scopus халықаралық ғылыми деректер базасына енетін басылымдарда жоғары импакт-факторлы мақала:

1. Tolegenova A.A., Kisala P.A., Zhetpisbayeva A.T., Mamyrbayev O.Zh., Medetov B.Zh. Experimental determination of the characteristics of a transmission spectrum of tilted fiber Bragg gratings//Metrology and measurement systems. – 2019. – P. 581-589.

ҚР ҒЖМБ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. Толегенова А.А., Албанбай Н., Жетписбаева А.Т., Медетов Б.Ж., Исимова А.Т., Тайсариева Қ.Н. TFBG типтес оптогалшықтарды сенсор ретінде қолдану үшін қажетті спектрлік сипаттамаларды эксперимент жүзінде анықтау// Вестник КазННТУ, серия Технические науки. – 2019. - №4. – Б.55-60

2. Липская М.А., Ерішова М.Ө., Толегенова А.А., Жетписбаев К. Талшықты Брэг торының негізіндегі оптикалық сенсорлар//ҚазККА хабаршысы. – 2020. – №4(115). – 311-317 б.

3. Tolegenova A., Yerishova M., Zhetpisbayeva A., Zhetpisbayev K., Tolegenova A. Investigation of the temperature dependence of TFBG with tilt angles of 2° and 4° // Торайғыров университетінің хабаршысы. – 2022. – №2

Халықаралық конференциялар тезистері жинақтарындағы жарияланымдар:

1. Narasim D., Tolegenova A., Tergeusizova A. The spectral properties of bended tilted fiber Bragg gratings //Optical Fibers and Their Applications 2018. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – V. 11045. – P. 110450B.

2. Толегенова А.А., Исимова А.А., Албанбай Н. TFBG спектралдық сипаттамаларының ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігін эксперимент жүзінде анықтау// "Фараби әлемі" атты Халықаралық жас ғалымдар мен студенттердің конференциясы". – 2019. – 288 б.

Авторлық куәлік:

1. Толегенова А.А., Медетов Б.Ж., Жетписбаева А.Т. Определение линейных зависимостей спектральных характеристик TFBG с углом наклона 60° и 80° от показателя преломления окружающей среды. // Авторлық куәлік, 2023. №36971.

Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі

Диссертациялық жұмыс кіріспеден, үш тараудан, қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен және үш қосымшадан тұрады. Жұмыс 126 сурет, 11 формула, 4 кесте, 101 әдебиеттер тізімі мен 106 бетті қамтиды.

1 КӨЛБЕУ ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫН ЖАСАУ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ТАҚЫРЫБЫНА ҚАТЫСТЫ ҒЫЛЫМИ ЕҢБЕКТЕРГЕ ШОЛУ

1915 жылы Уильям Генри Брэгг ұлы Уильям Лоуренс Брэггпен бірге рентген сәулелері арқылы кристалдық құрылымды зерттеуге қосқан үлесі үшін физика бойынша Нобель сыйлығын алған кезде, олар бұл жаңалықтың барлық болашақ ғылыми салалар үшін маңыздылығын болжаған жоқ болатын. Кристалл геометриясы мен түсетін сәулеленудің толқын ұзындығы және интерференция максимумдары байқалатын бұрыш арасындағы байланысты анықтау және тұжырымдау кейінірек Брэгг заңы деп аталды. Бұл заң периодтық құрылымдарды құруға негіз бола алды. Оптикалық талшықтарда пайда болатын дифракция жалпы атаумен белгілі талшықты Брэгг торлары (FBG) деп аталды.

Талшықты Брэгг торы деп қарқынды оптикалық интерференция үлгісінің өзегіне әсер еткенде пайда болатын талшықтың ұзындығы бойымен сыну көрсеткішінің периодты ауытқуын айтамыз. Оптикалық талшықтағы тұрақты торлардың түзілуін алғаш рет Хилл К.О., Кавасаки В.С. және т.б. Коммуникациялық зерттеу орталығында (Оттава, Онтарио, Канада) көрсетті [2], [3]. Олар аргон иондарындағы лазердің қарқынды сәулеленуін германиймен қоспаланған талшыққа бағыттады және бірнеше минуттан кейін шағылысқан жарықтың қарқындылығы артқанын анықтады. Талшықты тордың деформациясы мен температурасын реттеу арқылы жанама түрде жүргізілген спектрлік өлшеулер ұзындығы 1 м болатын талшықтың бойынла тар жолақты Брэгг торлы сүзгінің пайда болғанын растады. Бұл нәтижені германиймен қоспаланған кварцтық жарықжолының сызықтық емес қасиеттерін зерттеу кезінде алған, және ол кейіннен "Хилл торлары" деп аталды. Сонымен қатар, германий талшығының белгісіз фотосезімталдығын анықталды. Бірнеше жылдан кейін бұл нәтиже талшықтың фотоиндукцияланған сынуының себебі және оның торларды қалыптастыру үшін пайдаланылған жарықтың толқын ұзындығына тәуелділігі туралы басқа зерттеулерге түрткі болды. Лам Д.К., Гарсид Б.К. [4] жұмысында [2] жұмыста жасалған қорытындыға сүйене отырып жарық интенсивтілігінің ауданы ұлғайған сайын тордың беріктігі артатынын көрсетті, екі фотонды процесті механизм ретінде болжаған болатын. Бастапқы эксперименттерде толқын ұзындығы 488 нм лазерлік сәуле талшықтың ұшынан шағылысып, торды құрайтын тұрғын толқын құрылымын жасады. Осы толқын ұзындығының жартысында, атап айтқанда ультракүлгін сәуледе 244 нм болатын жалғыз фотон әлдеқайда тиімдірек екені анықталды. Мельтц Г., Мюррей В., Гленн В.Х. [5] жұмыста екі сәулелі ультракүлгін толқын ұзындығын германийдің ауа-кемтік ауытқу жолағында болатындай (шамамен 244 нм) таңдап алып, германосиликат оптоталшықтың өзекшесіне қабықша жағынан әсер ету арқылы Брэгг торларын алды. Жаңа әдіспен жасалған Брэгг сүзгілерінің шағылысуы 50-55% және спектрлік ені жарты биіктікте максимум 43 ГГц дейін болды.

Уақыт бойынша талшықтардағы фотоиндукцияланған рефракцияны бақылау қазіргі уақытта оптикалық байланыс жүйелері мен сенсорлық

жүйелерде маңызды рөл атқаратын технологияның негізіне айналды. Еуропаның, Солтүстік және Оңтүстік Американың, Азияның және Австралияның көптеген университеттері мен өнеркәсіптік зертханаларында оптоалшықтың жарық сезімталдығының негізгі механизмдері мен оны пайдалану туралы зерттеулер жалғасуда. Ғылыми әдебиеттерде және тақырыптық конференцияларда, семинарларда және симпозиумдардағы материалдарда талшықты торлардың фотосезімталдығы туралы көптеген шығармалар мен еңбектер пайда болды. FBG қазір коммерциялық қолжетімді және оптикалық датчиктерде, өткізу қабілеті жоғары WDM телекоммуникация желілерінде оптикалық сигналдарды маршруттауда, фильтрлеуде, басқаруда және күшейтуде кең қолданыс тапты.

1.1 Көлбеу талшықты Брэгг торларының жарық сезгіштігі және торды қалыптастыру

Талшықтардың жарық сезгіштігі алғаш рет сурет 1-де көрсетілген эксперименттік схемада байқалады. Аргонды-ионды лазерден үздіксіз көк (488 нм) жарық толқыны номиналды бір типті оптикалық талшықтың қысқа бөлігінде іске қосылады және талшықтан шағылған жарық қарқындылығы бақыланады. Бастапқыда шағылысқан жарықтың қарқындылығы төмен, бірақ бірнеше минуттан кейін ол талшыққа түскен барлық жарық кері шағылысқанша өседі. Шағылысқан жарықтың өсуі талшыққа индекстік торды жазуға мүмкіндік беретін «фотосезімталдық» деп аталатын жаңа сызықтық емес әсердің терминдерінде түсіндірілді.



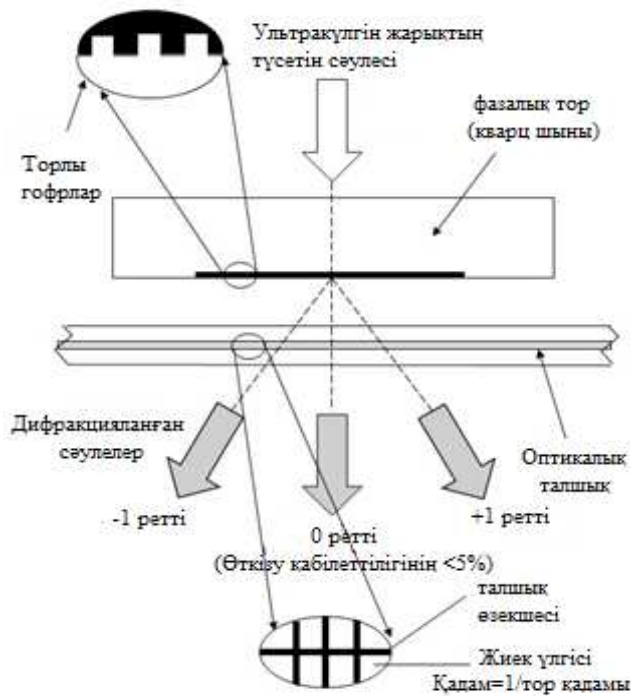
Сурет 1 – Оптикалық талшықтардағы Брэгг торларын жазуға арналған түпнұсқа құрылғының схемасы [6]

Пайымдау келесідей: талшықта таралатын когерентті жарық талшықтың ұшынан шағылысқан жарықтың аз мөлшерімен араласып, фотосезімталдық арқылы талшықтың өзекшесінде индекс торын жазатын тұрғын толқын үлгісін жасайды. Тордың беріктігі артқан сайын шағылысқан жарықтың қарқындылығы шамамен 100% қаныққанға дейін артады. Бұл алғашқы тәжірибелер аргон лазерінің толқын ұзындығында 90% шағылыстыратын тұрақты индекс торларын (Брэгг торларын) алды. Талшықты созу арқылы өлшенген Брэгг торының өткізу қабілеті өте тар (200 МГц), бұл тордың ұзындығын 1 м екенін көрсетеді [6].

Сол кезде оптикалық толқын өткізгіштердегі торлар талшықты-оптикалық байланыста қолдануға арналған құрылғыларды жасауда көптеген әлеуетті қолданбаларға ие болатыны мойындалды. Шын мәнінде, "Хилл торлары" лазер үшін кері байланыс айнасы ретінде және талшық созылған кезде деформация сенсоры ретінде пайдаланылуы мүмкін екендігі көрсетілді. Жарық сезімталдығы оптикалық талшықтардағы торларды жасау үшін тамаша құрал болғанымен, "Хилл торлары", өкінішке орай, жазылатын жарықтың толқын ұзындығына жақын диапазондағы толқын ұзындығында жұмыс істеді. Бұл фотосезімталдық шегі шамамен он жылдан кейін [5] экспериментінде еңсерілді, ол жұмыстан [4] фотосезімталдық екі фотонды процесс екенін мойындады, және сол процес германийдің 5 эВ (245 нм) оттегімен қанығуының ақау жолағындағы бір фотонды толқын ұзындығының процесі болса, әлдеқайда тиімді болар еді деп [7], [8] жұмыстарды жазылды. Олардың тәжірибесінде талшық ультракүлгін сәуленің екі қиылысатын когерентті шоқтарымен бүйірінен сәулеленеді.

[6] жұмыста талшықты Брэгг торларын бүйірлік жазуға арналған екі сәулелі интерферометр қондырғысы жиналды. Ультракүлгін сәуленің толқын ұзындығы 244 нм, ол 488 нм жартысына яғни, "Хилл торларын" жасау үшін қолданылатын көк аргон лазерлік сызығының толқын ұзындығына сәйкес келеді. Бір-бірін басатын ультра күлгін жарықтың екі сәулесі периоды интерференциялық бейнені жасап интерференцияланады, ол сәйкес индексті торды талшықтың өзекшесіне жазады. Бұл көлденең голографиялық әдіс деп аталады, себебі талшықтың қабықшасы ультракүлгін сәулеге мөлдір, ал талшықтың өзекшесі ультракүлгін сәулені қатты жұтады. Торларды жасаудың голографиялық әдісі екі негізгі артықшылыққа ие. Брэгг торларын шыны қабықты алып тастамай, талшықтың өзегіне фото басып шығаруға болады. Сонымен қатар, фотоиндукцияланған тордың периоды ультракүлгін сәуленің екі интерференциялық когерентті сәулесі арасындағы бұрышқа байланысты. Осылайша, торды жасау үшін ультракүлгін сәуле пайдаланылса да, Брэгг торлары талшықты-оптикалық байланыс пен оптикалық сенсорларда қолданылатын құрылғылар үшін қызығушылық тудыратын спектрлік аймақта әлдеқайда ұзағырақ толқын ұзындығында да жұмыс істей алады.

Тор жасау технологиясына тоқталсақ. Тарихи тұрғыдан алғанда, Брэгг торлары алғаш рет ішкі жазба [2] және голографиялық әдіс [5] көмегімен жасалған. Қазірдің өзінде сипатталған бұл әдістердің екеуі де 2- суретте көрсетілген фазалық маска әдісімен [9], [10] ығыстырылды.



Сурет 2 – Нөлдік ретті дифракциялық фазалық маска негізінде Брэгг торын жасауға арналған құрылғы [6]

Фазалық масканың жұмыс циклі 50% - ға тең етіп таңдалады. Фазалық маска амплитудасы нөлдік ретті сәуледе берілетін жарықты жалпы өткізу қабілеттілігінің 5%- дан азына дейін азайту үшін таңдалады. Бұл опциялар әдетте өткізу қабілеттілігінің 80%- дан астамы ± 1 дифракцияланған сәулеге сай келеді.

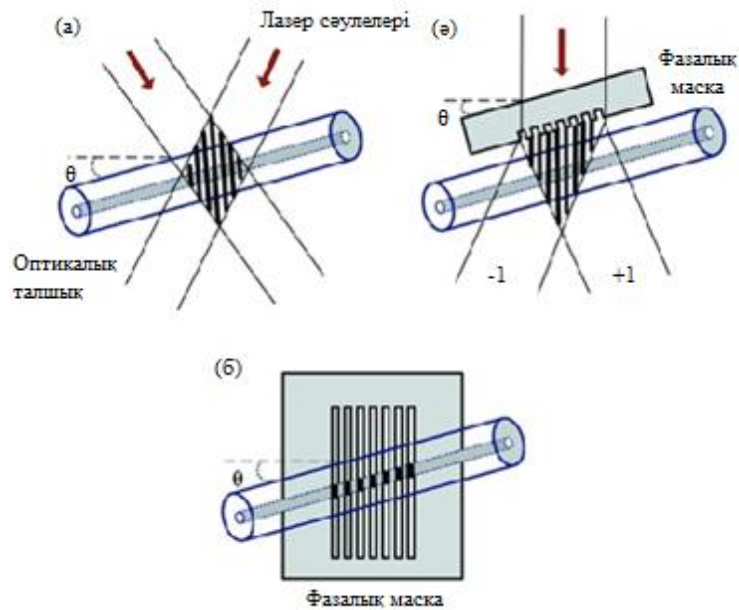
Фазалық маска ультракүлгін сәулеге мөлдір кремний диоксиді әйнегінің жалпақ табақшасынан жасалған. Жазық беттердің бірінде бір өлшемді периодты рельефтік құрылымы бар бет фотолитографиялық әдістерді қолдана отырып жазылған. Периодтық кескіндеменің пішіні профильдегі тікбұрышты толқынға жақындайды. Оптикалық талшық сурет 2-де көрсетілгендей фазаның гофрлерімен байланыста болады. Фазалық маскаға қалыпты түсетін ультракүлгін сәуле фазалық масканың периодты гофрлері арқылы өтеді және дифракцияланады. Әдетте дифракцияланған жарықтың көп бөлігі 0, +1 және -1 дифракцияланған тәртіпте болады. Дегенмен, фазалық маска фазалық маскадағы гофр тереңдігін басқару арқылы дифракцияны нөлдік ретпен басуға арналған. Іс жүзінде нөлдік ретпен жарық мөлшерін ± 1 ретке тең бөлінген жалпы жарық қарқындылығының шамамен 40% дейін азайтуға болады. ± 1 -ші дифракцияланған реттің екі сәулесі интерференцияланып, оптикалық талшықтағы сәйкес торды бейнелейтін периодтық үлгіні жасайды. Егер фазалық маска торының периоды λ_{mask} болса, онда фото басып шығару индексінің тор периоды $\lambda_{mask}/2$ болады. Бұл период фазалық масканы сәулелендіретін ультракүлгін сәуленің толқын ұзындығына тәуелді емес екенін ескеріңіз, дегенмен, азайтылған нөлдік ретті жарықты алу үшін қажет гофрлеу тереңдігі

толқын ұзындығына және кремнеземнің оптикалық дисперсиясына байланысты. Фазалық маска әдісінің артықшылығы- бұл Брэгг торларын жасау процесін едәуір жеңілдетеді, бірақ сонымен бірге жоғары сапалы торлар шығарады. Голографиялық әдіспен салыстырғанда фазалық маска әдісі фото басып шығару үшін талшықты оңай туралауды, фото басып шығару тұрақтылығының төмендеуін және ультракүлгін лазер сәулесінің когеренттілігінің төмен талаптарын қамтамасыз етеді, бұл ультракүлгін эксимерлі лазердің арзан көзін пайдалануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, фазалық маска арқылы параллель талшықтарды сәулелендіру арқылы бір экспозицияда бірден бірнеше тор жасау мүмкіндігі бар.

Төмен шығындармен жоғары тиімді торларды жасау мүмкіндігі кейбір қолданбаларда торларды пайдаланудың экономикалық орындылығы үшін өте маңызды. Фазалық маска әдісінің кемшілігі- әрбір жеке Брэгг толқын ұзындығы үшін бөлек фазалық маска қажет. Дегенмен, фотопринтинг процесі кезінде талшыққа кернеуді қолдану арқылы кейбір толқын ұзындығын реттеуге болады; бос талшықтың Брэгг толқын ұзындығы 2 нм-ге ауысады. Фазалық маска әдісі құрылғылардың жоғары өнімділігін қамтамасыз етіп қана қоймайды, сонымен қатар ол бақыланатын спектрлік жауап сипаттамалары бар торларды жасау үшін пайдаланылуы мүмкін деген мағынада өте икемді [6].

Мысалы, талшықтың ұзындығы бойынша біркелкі индекстік модуляциясы бар соңғы ұзындықтағы тордың типтік спектрлік реакциясы негізгі шағылысу шыңының екі жағында да максимумға ие. Толқын ұзындығын бөлу арқылы мультиплекстеу сияқты қосымшаларда мұндай жауап түрі қажет емес. Алайда, егер талшықтың ұзындығы бойынша индекстік модуляция профиліне қоңырау тәрізді функционалды пішін берілсе, онда бұл қайталама максимумдар басылуы мүмкін [11]. Бұл процедура аподизация деп аталады. Аподизацияланған талшықты торлар фазалық маска әдісімен жасалды және бүйірлік жапырақшалардың 30-40 дБ басылуына қол жеткізілді [12-14].

Жұмыстың негізгі объектісі болып табылатын TFBG стандартты FBG сияқты құралдар мен технологияларды қолдана отырып оптоалшыққа жазылады, яғни екі қарқынды ультракүлгін лазер сәулелері арасындағы интерференциялық үлгіде легірленген әйнектерде индукцияланған сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеруіне негізделген. Бұл негізгі идеяның бірнеше нұсқалары бар және олар [15, 16] әдебиеттерде егжей-тегжейлі сипатталған. Осы ұқсастыққа байланысты, соңғы 20 жыл ішінде FBG телекоммуникация және сенсорлық қосымшалар үшін әлемдік индустрияның дамуымен бірге жүретін барлық технологиялық жетілдірулер мен сенімділік зерттеулері TFBG-ге тікелей қатысты (соның ішінде арзан жаппай өндіріс). Сурет 3- те көрсетілген схемалар арқылы "көлбеу" FBG жасау үшін қажетті модификацияларды сипатталған.



Сурет 3 – Көлбеу бұрышына байланысты TFBG өткізу спектрлері.

Интерферометриялық схемада (сурет 3, а) жолақтардың үлгісіне қатысты талшықты еңкейту жеткілікті. Дәл осы тәсілді Мельц пен оның әріптестері 1990 жылдардың басындағы жаңа жұмысында қолданды және ол әлі де қолданылады [17-19]. Бұл тәсілдің басты артықшылығы- бұл тор периодтарын, сондай-ақ көлбеу бұрыштарды өзгертуге мүмкіндік беретін икемділік. Дегенмен, бірдей торлардың көп саны қажет болғанда, TFBG жаппай өндірісі жағдайындағыдай, талшыққа жақын орналасқан дифракциялық фазалық маска арқылы интерференциялық үлгіні жасайтын басқа тәсіл қолайлы (сурет 3, ә). Тор периоды фазалық маскамен бекітіледі және талшықтың жақындығына байланысты жоғары энергиялы импульстік эксимерлі лазерлерді, мысалы төмен когерентті ультракүлгін көздерді пайдалануға болады. Бұл жағдайда көлбеулік екі жолмен жүзеге асырылуы мүмкін: фазалық маска мен талшықты айналдыру, алдыңғы жағдайдағыдай (сонымен бірге цилиндрлік линзаны бұру керек, ол жазу жарығының қарқындылығын талшық осі бойымен фокустауға қызмет етеді) (сурет 3, ә) немесе талшықты және фазалық масканы құлаған жазу сәулесіне перпендикуляр ұстау, бірақ фазалық масканы жазу сәулесінің осіне қатысты айналдыру (сурет 3, б).

1.2 Көлбеу талшықты Брэгг торлары негізіндегі жұмыстарға әдеби шолу

Оптикалық талшықтарда пайда болатын дифракция жалпы атаумен белгілі талшықты Брэгг торлары (FBG) деп аталды. Брэггтың көлбеу талшықты-оптикалық торлары (TFBG) қысқа мерзімді торлар тобына жатады, бірақ олардың индексті модуляциялау диаграммасы талшық осіне қатысты қисаяды. Олар жарықты оптикалық талшықтың өзегінен Брэгг толқын ұзындығынан

төмен дискретті толқын ұзындығына қарай жібереді. Бұл дискретті байланыстар талшықты қабықта қарама-қарсы бағытта таралатын жарық модаларына сәйкес келетін спектрде тар әлсіреу жолақтарын жасайды [20]. Келесі [21] жұмыста жарықтың қоршаған орта интерфейсіне жақын таралуы зерттелді, бұл жолақтар сыртқы сыну көрсеткішіне сезімтал болуын көрсетті. Осылайша, Laffont және Ferdinand химия өнеркәсібінде TFBG қолдану мүмкіндігі айқын жобаланды. Химия ғалымдары 1,32–1,44 диапазонында қоршаған ортаның сыну көрсеткішін өлшеу үшін 16^0 көлбеу бұрышы бар Брэггтың көлбеу талшықты-оптикалық торларын (TFBG) енгізді. [22] жұмыстың авторлары 20 -дан 100^0 C-қа дейінгі температураның өзгеруіне сезімтал емес және $2 \cdot 10^{-4}$ ажыратымдылығымен сыртқы сыну көрсеткішінің 1-1,45 диапазонында өзгеруін анықтай алатын 4^0 көлбеу бұрышы бар Брэггтың көлбеу талшықты-оптикалық торлар сенсорын ұсынды. Ұзақ мерзімді торлармен (LPG) салыстырғанда, Брэггтың көлбеу талшықты-оптикалық торлары сезімтал, өйткені ол тек төмен ретті қабық модаларына әсер етеді [23]. Егер олардың көлбеуі әлсіз болса, оларды берілген спектрде Брэгг резонансының болуына байланысты қоршаған сыну көрсеткішін де, температураны да өлшеу үшін пайдалануға болады.

TFBG [24] зерттеуі алты ядролы микроқұрылымды оптикалық талшықтың (MOF) Ge-көспаланған өзегінде жазылған және микроқұрылымды талшыққа енгізілген сұйықтықтың сыну көрсеткішіне TFBG спектрлік сезімталдығы зерттелген. Осылайша, бұл зерттеу TFBG метрологиялық артықшылықтарын көрсетеді, бұл жоғары сыну көрсеткішінің сезімталдығын пайдалануға мүмкіндік береді. MOF құрылымын оңтайландыру арқылы сыну көрсеткішіне сезімталдықты жоғарлатуға болады.

[25] жұмыстың авторлары жетілдірілген талшықты-оптикалық сенсорларды, оның ішінде моно және поликристалды фотоэлектрлік панельдердің температурасын бақылауда жоғары сезімталдықты көрсетті. Олар панель температурасын дәстүрлі температуралық сенсорлармен салыстыра келе панель беті арқылы лезде жылу беру динамикасы туралы құнды ақпараттарды жинады. Сонымен қатар, бұл жұмыста радиациялық ағынның және көлбеу бұрышының панельдің температурасына әсері зерттелді. Шағылған толқын ұзындығы мен датчиктің шағылу коэффициенті сәулелену ағынының түсуіне тура пропорционал екені көрсетілген болатын. Күн қондырғылары үшін $6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ температура сезімталдығы жеткілікті екені зерттелді. Бұл зерттеудің ең маңызды қолданбасы күн фермаларында талшықты-оптикалық сенсор технологиясын кеңінен қолдану болып табылады, онда бірнеше панельдердің температурасын дәл бақылауға болады. Бұл жағдайда панельдің бірнеше нүктелерінде жеке термопарларды қосудың орнына, бір талшық пайдаланылады.

[26] жұмыстың авторы қарапайым талшықты-оптикалық инклинометрді ұсынды. Ол екі балқытылған конуста жазылған, сызықты талшықты Брэгг торына негізделген. Арнайы әзірленген талшық торлары екі селективті шағылыстыру жолағын көрсетеді, олардың тек біреуі иілуге сезімтал, ал екіншісі сілтеме ретінде пайдаланылады. Сонымен қатар, инклинометр 0 - 70°C жұмыс диапазонымен, 1°C рұқсатымен және ұқсас сезімталдықпен сипатталады.

Ұсынылған конфигурацияда инклинометр температурадан тәуелсіз жүктеме ұяшығы ретінде жұмыс істей алады, сонымен қатар бір уақытта көлбеу және қоршаған орта температурасын өлшей алады. Автор талшықты-оптикалық сенсор арқылы көлбеу бұрышын өлшеудің жаңа тәсілін ұсынды. Ұсынылған сенсордың спектрлік жауабы күрделі болып көрінгенімен, оны дұрыс таңдалған экспозиция уақыты профилі бар бір сканерлеу процесі арқылы оңай жасауға болады. Ұсынылған инклинометр дұрыс екендігі автормен дәлелденді.

[27] жұмыстың авторы тік маятникке біріктірілген төрт көлбеу Брэгг торының элементіне негізделген жаңа температураға тәуелсіз көлбеу торлы талшықты-оптикалық сенсорын ұсынды. Көлбеу сенсоры көлбеу бағытқа қатысты көлбеу мөлшерін және бағытын анықтауға қабілетті. Зерттеу нәтижелері TFBG сенсорының көлбеу бұрышының дәлдігі мен рұқсаты өте жақсы екенін көрсетеді (дәлдігі 0,1 және ажыратымдылығы 0,007-тан жоғары). Көлбеу сенсорының өнімділігін ауыр маятникті пайдалану арқылы оңай жақсартуға болатынын көрсетті.

[28] жұмыстың авторлары талшықты Брэгг торының (FBG) сенсорлық технологиясын қолданатын стационарлық инклинометрдің жаңа дизайнын ұсынды. Ұсынылған инклинометр жоғары сезімталдыққа ие болды. Кәдімгі инклинометрлер орнатылған кезде пайда болатын күшке байланысты олар еріксіз бұралды. Мұндай бұралу инклинометрлердің өлшеу дәлдігін төмендетті. Ұсынылған FBG негізіндегі инклинометрдің сипаттамалары бұралуға мүлдем байланысты болмады. Ауыр құрылыс алаңдары, туннельдер, мұнай ұңғымаларын бұрғылау, геологиялық бұрғылау және көмір шахтасын бұрғылау осы инклинометрдің алаңдағы қолданылуы болды.

[29] жұмыстың авторлары 3D принтерде жаңа, қарапайым және арзан көлбеу сенсорлық жүйесін басып шығарды, ол төрт FBG негізіндегі тәсілді пайдалана отырып, температура компенсациясымен биаксиалды параметрлерді өлшеуге мүмкіндік берді. Көлбеу сенсоры 3D басып шығару технологиясында қолданылатын кең таралған материал болып табылатын полилактикалық 3D принтерін қолдану арқылы ғана жобаланған және жасалған. Сондықтан дизайн қарапайым көлбеу сенсорларымен салыстырғанда арзан және өндіруге оңай деп саналады.

[30] жұмыстың авторлары бүйірлік режимге негізделген жоғары сезімтал FBG сенсорын ұсынды. Бүйірлік режимдердің асимметриялық тұрақты емес жолақтарының қалыптасуын модельдеу арқылы бұл сенсордың жұмыс қабілеттілігі дәлелденді. Эксперименттік нәтижелер көрсеткендей, бұл сенсордың максималды сезімталдығы -590,625 дБ жетуі мүмкін. Бұл сенсордың қарқындылығының өзгеруі 0,824 дБ-ден аз болды.

Электромагниттік кедергіге сәйкес төзімділік, жеңіл салмақ, жоғары сезімталдық, кең өткізу қабілеттілігі мультиплекстеу мүмкіндіктері сияқты маңызды артықшылықтарының арқасында көлбеу Брэгг торының сенсорлары соңғы үш онжылдықта айтарлықтай қызығушылық тудырды [31]. Сенсорлық және физикалық шамалардың ішінде температура мен деформация кеңінен зерттелді. Бұл жұмыста алдымен көлбеу Брэгг торының датчиктерін өлшеу

принципі қысқаша ұсынылды. Қысқаша айтқанда, көлбеу Брэгг торының мультиплекстеу мен сенсорларын желіге қосу жұмысы ұсынылды және негізгі технология ретінде толқын ұзындығын зерттеу әдістері қарастырылды.

[32] жұмыстың авторлары модуляцияланған модаға негізделген жоғары сезімтал көлбеу Брэгг торының сенсорын ұсынды. Ұсынылған модуляцияланған қарқындылықтағы модаға негізделген көлбеу Брэгг торының сыну көрсеткішінің өзгерісіне жоғары сезімталдықты ие. Бұл бұрын тіркелген талшықты сыну сенсорларының ішіндегі ең жоғары сезімталдығы болып табылады. Бұл сенсордың қарқындылығының ауытқуы 0,824 дБ-ден аз өлшемге ие.

Эллиптикалық өзегі бар микроталшықты Брэгг торы негізіндегі температуралық-компенсацияланған үш өлшемді талшықты-оптикалық магнит өрісінің датчигін [33] жұмыстың авторлары ұсынды және эксперименталды түрде көрсетті. Талшық бетінің айналасындағы ферромагнетизм нанобөлшектердің анизотропты агрегациясын тудырды. Соның нәтижесінде магнетизмге байланысты екі ортогональды поляризация модасы пайда болды. Ол үшін магнит өрісінің бағытын екі шағылысу шыңының толқын ұзындығына қатынасы арқылы анықталды. Алайда, шағылысудың екі шыңы қоршаған орта температурасына бірдей реакцияны көрсетеді. Демек, ұсынылған сенсор магнит өрісінің қарқындылығы мен бағдарын температуралық сезімталдығынсыз бір уақытта өлшей алады.

[34] жұмыстың авторлары қоршаған ортаның әр түрлі мәндегі сыну көрсеткішіне салынған ұзақ периодты талшықты торлар мен көлбеу қысқа периодты талшықты Брэгг торлары арқылы өткен жарықтың спектріндегі өзгерістерді зерттеді. Көлбеу қысқа мерзімді талшықты Брэгг торларының метрологиялық сипаттамалары оларды рефрактометрияда пайдалануға мүмкіндік беретін аналитикалық әдісті талқылады. Жұмыстың авторлары бірнеше көлбеу Брэгг торларының спектрлік реакциясын зерттеді және сыртқы сыну көрсеткішіне сипаттама берді. Көлбеу Брэгг торының сезімталдығын қолдану үшін арнайы алгоритм жасады.

[35] жұмыстың авторлары сұйықтық деңгейі мен температурасын бір уақытта өлшеуге қабілетті талшықты-оптикалық сенсорды ұсынды және көрсетті. Олар ассиметриялық талшықты Мах-Цендер интерферометрін көлбеу талшықты Брэгг торымен біріктіру арқылы зерттеуді жүргізді. Бұл зерттеу талшықты конусты ығысқан түйінді біріктіру арқылы жүзеге асырылды. Көлбеу талшықты Брэгг торы температураны анықтау қасиетін пайдалану арқылы температура компенсациясы бар сұйықтық деңгейінің сенсорына қол жеткізуге болатынын көрсетті. Толқын ұзындығының 10 пм мәні үшін сұйықтық деңгейінде 0,15 см және температурада 1,01 °С ажыратымдылыққа қол жеткізуге болатынын дәлелдеді.

[36] жұмысының авторлары көлбеу талшықты Брэгг торының (TFBG) берілу қарқындылығының TFBG поляризациялық қасиеттеріне тәуелділігін зерттеді. Қабықша модаларының поляризациялық сипаттамасы бұралуды өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін екендігін көрсетті. Бұл жұмыста бұрауға сезімтал

талшықты сенсор ұсынылды. Бұрау бұрышын матрицаның көмегімен дәл өлшеуге болатынын дәлелдеді. Осы жұмыста тиімді оптоалшықты көлбеу Брэгг торының (TFBG) бұралу сенсорын ұсынды. $\pm 180^\circ$ өлшеу диапазоны үшін 0,299 дБ/° сезімталдық алынды, бұл ағымдағы ұқсас бұралу сенсорынан 17,9 есе жоғары болды.

[37] жұмыстың авторлары 6° көлбеу талшықты Брэгг торының бетінде тұндырылған полианилин жабынына негізделген оптикалық талшықты рН сенсорын зерттеді. Зерттеу барысында рН-сезімтал пленка сенсорының реакциясын оңтайландыру үшін тұндыру уақытын қадағалай отырып, химиялық тотықтырғыш полимерлеу әдісімен синтезделді. Нәтижесінде сенсор 2–12 диапазонындағы рН өзгерістеріне жылдам жауап береді және оның сезімталдығы қабықша қалыңдығына тікелей байланысты болып табылады. Көлбеу Брэгг торы негізіндегі рН сенсорының басты қасиеттеріне биохимиялық үйлесімділігі, температураға тәуелсіздігі, ұзақ мерзімді тұрақтылығы және қашықтан нақты уақыттағы көп нүктелі зондтауы жатады.

Қарапайым конфигурациялы, сызықтық реакциясы және жоғары сезімталдығы бар бір қабырғалы көміртекті нанотүтіктермен қапталған көлбеу талшықты Брэгг торы (TFBG) бар ыстық сымды анемометрді [38] авторлары ұсынды. TFBG 1550 нм сорғы лазерін қабықша модасына тиімді қосу үшін қолданылады, ол талшық бетінде иммобилизацияланған бір қабырғалы көміртекті нанотүтіктер пленкасымен жұтылады, жарықтың жылуды түрлендіру тиімділігі жақсы.

Зерттеу жұмыстарыда [39] авторлары өзек-қабықша режиміндегі көлбеу талшықты Брэгг торын қолданылады. Өзекше және қабықша модаларының жылу сезімталдығы әртүрлі, ал деформация сезімталдығы шамамен бірдей. TFBG спектрінде өзек-өзек модасын біріктіру резонансын бақылау және TFBG спектріндегі өзек-қабықша модасын біріктіру резонансын бақылау температура мен деформациядан туындаған толқын ұзындығының ығысуын бөлуге мүмкіндік берді.

[40] нәтижелері қабық пен өзек модаларының деформацияға сезімталдығы әртүрлі, ал температураға сезімталдығы бірдей екенін көрсетеді. Осылайша, TFBG спектріндегі негізгі мода резонансын және қабықша модасының резонансын басқаруға болады, бұл температура мен деформациядан туындаған толқын ұзындығының ығысуын бөлуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері бойынша 3° бұрышпен көлбеуленген жалғыз TFBG көмегімен деформация мен температураны бір уақытта өлшеуге болады. [41] әдебиетте TFBG температура мен деформацияны өлшеу үшін FreeSpectrum Matched Interrogation (FSRMI) жүйесімен біріктірілген. Эксперименттік деректер бойынша TFBG өзекшесі мен қабықша модаларының толқын ұзындықтары температура мен деформация ұлғайған сайын ұзағырақ толқын ұзындығына сызықты түрде ығысатынын көрсетеді. FSRMI жүйесі бірнеше толқын ұзындығын бір уақытта демодуляциялауға мүмкіндік беретіндіктен, сезімталдық жүйесін жоғары дәлдікпен және жоғары анықтау жылдамдығымен көп нүктелі температура мен

деформацияны өлшеу үшін FSRMI арнасы TFBG-мен біріктіру арқылы кеңейтуге болады.

2⁰ көлбеу бұрышы бар көпмодалы Брэгг талшықты торының (MFBG) егжей-тегжейлі деформациялық және температуралық сипаттамалары [42] жұмыста теориялық тұрғыдан әзірленген және эксперименттік түрде байқалады. Нәтижелер көрсеткендей, 2⁰ көлбеу бұрышы бар MFBG деформацияға және температураға сезімталдық өткізудің әртүрлі бұрыштары үшін бірдей. 1) резонанстық ұзындықтарының қарқындылығы және 2) әртүрлі резонанстық толқындардың ұзындықтары үшін деформацияға біртекті сезімталдық сынды екі қасиетті пайдалана отырып өлбеулік бұрышы 2⁰ болатын тор негізінде ауыстырып қосылатын және қайта салынатын көп толқынды раман шеңберлі лазері іске асырылды.

Талшықты Брэгг торларының 81 градусқа дейінгі тым көлбеу құрылымдарда күшті поляризациялық тәуелді байланысы болатыны туралы [43] жұмыста жазылған. Бұл ерекше қасиет бұрауға жоғары сезімталдықты көрсететін жаңа бұру сенсорын жасау үшін пайдаланылды. Оптоташықты бұрау нәтижесінде қос сәуленің шағылу модаларының арасындағы өзара байланысымен алмасу қарқындылықты демодуляциялайтын әдісті қолданып бұру датчигін зерттеуге мүмкіндік береді.

Температурасы мен сыну көрсеткішін бір мезгілде өлшеу үшін 3⁰ көлбеу көп модты Брэгг талшықты торы (MFBG) негізіндегі сенсор [44] жұмыста көрсетілді. 3⁰ көлбеу MFBG өткізу спектріндегі толқын ұзындықтарының екі тобын көрсетеді: бірінші топ, бір өзекше модасы мен қабықша модасы арасындағы байланысқа байланысты, қоршаған сыну көрсеткішіне (SRI) де, температураға да сезімтал, ал екіншісі, өзекшенің бір модасы мен басқа модалары арасындағы байланысқа байланысты, тек қана температураға сезімтал. Толқын ұзындықтарының әртүрлі топтарындағы айқын айырмашылықтарды пайдалана отырып, авторлар бір көлбеу MFBG көмегімен осы екі параметрді бір мезгілде өлшеуді ұсынды.

Көлбеу бұрыштары әр түрлі (5⁰ және 7⁰) сыну көрсеткіші жоғары біртекті жұқа жабынды салу кезінде өтетін спектрде индукцияланған әсерлерді эксперименттік талдау [45] жұмыста зерттелді. TFBG екі түрлі қалыңдықпен қапталды. Алынған құрылымдарды өткізу спектрлері қоршаған ортаның сыну көрсеткіші (SRI) 1-1,47 диапазонында алынды. Жабынсыз торлармен салыстырғанда жабыны бар торлардың спектрлік эволюциясының айырмашылығы байқалды, осылайша жабыны бар талшықтарда SRI сезімталдығының артқанын көрсетті.

Көлбеу талшықты Брэгг торын (TFBG) және CCD-матрицаның детекторын пайдаланатын, өткізу жұмыс жолағы 60 нм дейін және 12,7 пм рұқсатымен 800 нм облыста жұмыс істейтін, толқындардың ұзындықтарын бөлетін жоғары рұқсаты бар жүйесі іске асырылды [46]. Жүйе көлбеу талшықты Брэгг торы негізіндегі температура мен деформация сенсорларының сезімталдығын тестілеуге арналды. Бұдан басқа, жүйе сұйықтық үлгілерінің сыну көрсеткішінің

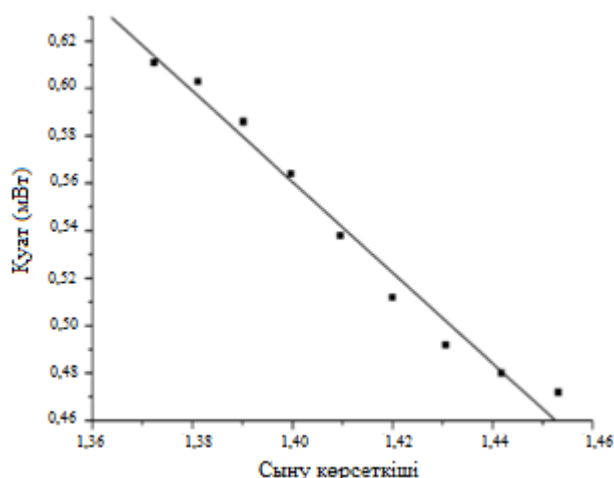
өзгеруін анықтау үшін пайдаланылды, тіпті 10^{-5} шегінде де көрсеткіштің өзгеруін өлшеу мүмкіндігін көрсетті.

[47] авторлары шамадан тыс көлбеу талшықты Брэгг торы (ETFBG) көмегімен қоршаған ортаның сыну көрсеткішін (SRI) өлшеуге негізделген сұйықтық деңгейінің сенсорын көрсетті. Сенсор төмен температураға, және де жоғары SRI сезімталдығына ие.

[48] жұмыста сыну көрсеткішінің сенсорында фторлы су қышқылымен ойылған TFBG қолданылды. Әр түрлі диаметрлі және әр түрлі ретті қабық режимдері бар TFBG зерттелінді яғни; TFBG-дің сыртқы индикаторға сезімталдығын қабық радиусын азайту арқылы айтарлықтай жақсартуға болатындығы дәлелденді. Жоғары сезімталдық пен дәлдікке 1,333 пен 1,4532 арасындағы өзгеріс арқылы қол жеткізіледі. Ұсынылған сенсор температураға тәуелсіз, бұл эксперименттік демонстрациялармен расталды.

Алдыңғы [48] жұмыстағы TFBG пайдалану арқылы авторлар [1] көлбеу талшықты Брэгг торының берілу қуатын өлшеу арқылы қоршаған ортаның сыну көрсеткішін (SRI) өлшеудің арзан, ықшам және тиімді әдісін ұсынады. Сурет 4-те жарық спектрінің қуатының 1,3723-тен 1,4532-ге дейінгі мәндері бар сыну көрсеткішінен тәуелділігі көрсетілген. Қуаттың SRI ге тәуелділігінің аппроксимация түзуі келесідей:

$$P = -1.913n + 3.239$$



Сурет 4 – Әр түрлі SRI-ге сәйкес келетін қуатты бағалау [1]

Альберто Н.Ж., Маркус К.А., Пинто Ж.Л., мен Ногиера Р.Н. [49] жұмыста көлбеу талшықты Брэгг торына негізделген үш параметрлі оптикалық сенсорды ұсынды. Негізгі моданың резонанстық толқын ұзындығының ығысуын және қосымша моданың резонансын бақылау арқылы деформация мен температураны ажырату мүмкіндігі ұсынылды. Өткізу спектрінің қалыпқа келтірілген ауданын есептеу арқылы оның сыну көрсеткішіне тәуелділігі анықталды. Ұсынылған сенсор бірнеше инженерлік салаларда, атап айтқанда биомедициналық, биологиялық және экологиялық зерттеулерде маңызды құрал бола алады.

Шен С. және басқалары өздерінің [50] жұмыстарында микрофлюидтік ағынның жылдамдығы мен бағытын бақылау сенсорын ұсынды, бұл сұйықтықтың шығынын және сезімтал элемент ретінде жартылай алтын жалатылған көлбеу бұрышты Брэгг торын (TFBG) қолданатын бағыт сенсорын көрсетті. Толқын ұзындығының ығысуы және жақын инфрақызыл аймақтағы TFBG өткізу резонанстарының амплитудасының өзгеруі TFBG бөлігінің үстіндегі наноөлшемді алтын қабатына байланысты TFBG маңындағы талшық осі бойымен ағып жатқан сұйықтықтың бағытын көрсетті. Ұзындығы 10 мм құрылғы көмегімен (және микрофлюидтік арналарға оңай енгізу үшін диаметрі 125 мкм) ағынның жылдамдығы мен бағытын біржақты анықтауға болады. TFBG-дің толқындық қасиеттері мұндай құрылғыларға 1,33-тен 1,40-қа дейінгі сыну көрсеткіштері бар сұйықтықтарда жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ұсынылған сенсорды барлық толқын ұзындығын талшық ортасынан оқшауланған негізгі тор режимінің резонанстық толқын ұзындығына байланыстыру арқылы температураға сезімтал емес етуге болады.

[51] жұмыс көлбеу талшықты Брагг торы талшықты рефрактометрге арналған. Оның сигналын автоматты түрде талдаудың жаңа математикалық әдісі ұсынылды. Сыну көрсеткішінің өзгеруі сенсордың өткізу спектрінің жанамасымен анықталатын кесу толқын ұзындығының өзгеруіне байланысты. Ұсынылған тәсілдің айрықша ерекшеліктері оның қарапайымдылығы мен өлшеудің жоғары дәлдігі болып табылады. Ұсынылған математикалық аппаратты іске асыру нәтижесінде эксперимент нәтижелері бойынша сенсордың рұқсат ету қабілеті 5×10^{-5} құрады. Бұл ретте өлшеу толық автоматты режимде жүргізілді. Ұсынылған тәсіл физика, химия және медицинада талшықты рефрактометрлерді қолдану мүмкіндіктерін ашады.

[52] жұмыста көлбеу талшықты Брэгг торы (TFBG) датчиктері үш функционалды материалмен қаптады және олардың өзек пен қабық модаларындағы амплитудалық сипаттамаларды талдау арқылы ылғалдылықты анықтау қабілеттері салыстырылды. Осы үш материалдың көмегімен ылғалдың физикалық сіңуін өлшеуге қол жеткізілген механизмдер зерттелді. Үш жабын материалы үшін беткі режимдегі резонанстық толқын ұзындығына қайта есептегенде сезімталдық дәрежесі жоғары болды. Сыналған сенсордың қамту режимдеріндегі сезімталдық ең жақсы резонанстық толқын ұзындығы 0,0112 нм салыстырмалы ылғалдылыққа жеткенін және сутегі байланыстарымен жақсы әрекеттесетін материалдың айналасындағы гидрофильді топтардың арқасында РАНР4 жабылған TFBG үшін қол жеткізілгенін көрсетті.

Гибридті көлбеу талшықты торларға негізделген сенсор (поляризациялық тор және көлбеу талшықты Брэгг торы) беттік плазмондық резонанс (SPR) негізінде ұсынылды [53]. Поляризациялық тордан және көлбеу талшықты Брэгг торынан (TFBG) тұратын гибридті көлбеу талшықты тор ультракүлгін жазу технологиясын қолдана отырып, бір модалы талшыққа жазылады, онда TFBG тығыз қабық модасының резонансын жасай алады. SPR күйді өзгертеді, ал поляризациялық тор TFBG қабығының s-поляризациялық режимін сүзе алады. Мұндай ұсынылған гибридті көлбеу талшықты-оптикалық торлар TFBG

негізіндегі SPR сенсорының сезімталдық жүйесін айтарлықтай жеңілдетеді. Эксперимент нәтижелері гибриді көлбеу талшықты торларға негізделген SPR сенсорының 522,8 нм толқын ұзындығында сыну көрсеткіші бойынша сезімталдығы бар екенін көрсетті. Ұсынылған сенсорды пайдалана отырып, авторлар 0,1 мг/мл-ден 1,0 мг/мл-ге дейінгі сезімталдық диапазонындағы гемоглобин концентрациясын және 8,144 нм/(мг/мл) сезімталдықты анықтауға қол жеткізді.

[54] жұмыста 3⁰ көлбеу бұрышы бар TFBG негізіндегі талшықты ультрадыбыстық сенсор теориялық және эксперименттік түрде ұсынылған және көрсетілген. Зонд сенсоры тұрақтылық пен бағытқа тәуелділікті қамтамасыз ететін қатты көлбеу полипропилен түтігіне оралған. Эксперименттерде ұсынылған сенсор ультрадыбыстық толқындарға (ультрадыбыстық) жоғары сезімталдыққа ие және осылайша тау жыныстарының модельдеріндегі қабаттар туралы ақпарат ала алады. Көлбеу және беттік сейсмикалық физикалық модельдерді сканерлегеннен кейін модельдердің көлденең кескініне деректерді өңдеу және қайта құру арқылы қол жеткізіледі.

[55] зерттеуде көпмодалы талшыққа (MMF) жазылған TFBG-дің көлемдік және беттік рефрактометриялық сезімталдығы стандартты SMF сезімталдығымен салыстырылады жоғары болатынын көрсетті. SMF-те алтынмен қапталған TFBG ~ 102нм / RIU сезімталдық мәнін көрсетеді. Плазмалық MMF TFBG ~ 124нм / RIU мәнімен (~22% күшейту) сезімтал және олардың спектрлік реакциясының тарлығына байланысты мультиплекстеуге жол ашады. Ұқсас беттік сезімталдық талшықтардың екі түрі үшін де алынды.

[56] мақалада айналу сенсорларынан келетін сигналдарды сұрау жүйесі қарастырылады. Олардың сенсорларын талдау жүйелері көбінесе анықтамалық қуатты өлшеуді қажет етеді. Бұл тірек қуатын өлшеу мүмкін емес бір арналы жүйелермен салыстырғанда жоғары өлшеу ажыратымдылығын алуға мүмкіндік береді. Бір арналы шешімдер жағдайында көбінесе спектрлік сипаттамалары бойынша экстремумға сәйкес келетін толқын ұзындығының ығысуы бақыланады.

[57] жұмыста қалыңдығы 1 мм шыны талшық/эпоксидті шайыр пластинасына салынған әлсіз көлбеу талшықты Брэгг торы (TFBG) негізіндегі бір мезгілде екі параметрді, қыздыру шамдарының әсерінен болатын температура мен деформацияның өзгеруін тәуелсіз өлшеуді көрсетеді. Әлсіз TFBG спектрі әртүрлі зондтау мақсаттары үшін пайдалануға болатын бірнеше пиктерден тұрады. Мұнда таңдалған шындардың термомеханикалық сезімталдық коэффициенттері арқылы деформация мен температураның өзгеруін есептеу үшін Брэгг пен бұлдыр шындарының ығысуы ескеріледі. Сонымен қатар, 3-D Гаусс температуралық профилін қолдана отырып, элементтердің толық моделін (композит + TFBG) және ішінара моделін (тек композит) анықтады. Бұл TFBG эксперименттік өлшемдерін модельдеу нәтижелерімен салыстыруға мүмкіндік берді

[58] авторлары әртүрлі концентрацияларда s-аденозил-L-гомоцистеин (AdoHcy) шағын биомолекуласын анықтау үшін Брэгг плазмондық көлбеу

талшықты биосенсорды ұсынды және эксперименталды түрде көрсетті. Биосенсор биодетектор ретінде жұмыс істейтін SET7 ақуыз-лизинметилтрансфераза арқылы беттің функционализациясымен бірге 18° TFBG талшығының бетін жабатын қалыңдығы 50 нм алтын пленкасы бар шағылысатын типті зонд түрінде жасалған. Сенсор тұрақтылық пен қайталануды қамтамасыз ететін талшықтың құрылымдық тұтастығын бұзбай жасалған. Эксперименттердің нәтижелері биосенсор тек 1 нм концентрациясы бар AdoHcy биомолекулаларын анықтай алатынын көрсетті. Сондай-ақ AdoHcy-ді әртүрлі концентрацияларда, соның ішінде 0,01; 0,1 және 10 нм-де өлшеді және нәтижелер AdoHcy концентрациясы жоғарылаған сайын AdoHcy мен SET7 арасындағы ассоциация қатынасы сәйкесінше теорияға сәйкес келетінін көрсетті.

Келесі [59] жұмыста жалпы зондтау өнімділігі мен сенімділігін жақсарту үшін үштік стратегияға сүйене отырып, аптасенсорды жасады. Бір поляризациялық талшық (SPF) биосенсордың субстраты ретінде пайдаланылады, ал демодуляция қабықша модасының резонанстық спектрінің төменгі сипаттамасын бақылауға негізделген. Бұл әдіс өте сезімтал және спектрдің жеке модаларын бақылау негізінде бірнеше ондаған есе көп толқын ұзындығының ығысуын береді. Зерттеу нәтижелері ақуызды анықтауға арналған биосенсорды жасауға септігін тигізді. Бұл озық әзірлемелер көмек көрсету орындарындағы биомедициналық өлшеулер үшін өте қызықты болуы мүмкін.

[60] жұмыс авторлары көлбеу талшықты Брэгг торын (TFBG) және гибридті функционалды графен оксиді (GO) көп қабатты көміртекті нанотүтікшелерді (MWCNT) қолданатын жоғары тиімді ылғалдылық сенсорын ұсынды. Үш өлшемді құрылымы бар ылғалдылыққа сезімтал материал MWCNT және GO негізінде синтезделді. Дәстүрлі екі өлшемді GO пленкасымен салыстырғанда, су молекулалары GO / MWCNT қабаттарындағы толқындардың және тесіктердің көп болуына байланысты тиімді сіңірілуі мүмкін. Су молекуласы ауаның орнына үш өлшемді құрылымның бүкіл кеңістігін толтырады, бұл гибридті наноматериалды сіңіру тиімділігін одан әрі арттырады. TFBG күрделі диэлектрлік өткізгіштікті өлшеу үшін шағын және сенімді платформа ретінде пайдаланылды. TFBG негізіндегі салыстырмалы ылғалдылық сенсоры да жақсы қайталану мен тұрақтылықты көрсетеді. Авторлар ұсынатын ылғалдылық сенсоры қоршаған ортаны бақылау және денсаулық сақтау салаларында әлеуетті қолданбаларға ие.

[61] мақалада авторлар көлбеу талшықты Брэгг торының беткі плазмонымен өзгертілген шағын 4-меркаптопиридин молекуласына негізделген нанометрден төмен анықтау шегі, жоғары селективтілігі және жоғары практикалық деңгейі бар жоғары тиімді сынап ионының сенсорын ұсынады және көрсетеді. TFBG-SPR сенсоры кең мода өрісінің таралуына және тар өткізу қабілеттілігіне ие, бұл сенсор бетіндегі микроскопиялық физикалық және химиялық реакцияларды сыртқы температураға әсер етпестен жоғары сезімталдықпен анықтауға мүмкіндік береді.

[62] жұмыста ерітіндідегі кадмий иондарының (Cd^{2+}) концентрациясын анықтауға арналған жоғары сезімтал плазмондық талшықты-оптикалық зонд туралы хабарланды. Бұл түпнұсқа сенсор *Acinetobacter* sp иммобилизациясы арқылы жасалған. браггтың алтынмен қапталған көлбеу талшықты торларының айналасында (TFBG). Осы мақсатта алдымен оптикалық талшықтың алтын жалатылған бетінде бактериялардың иммобилизациясының шарттары эксперименталды түрде анықталды. Содан кейін қапталған сенсорлар пробиркада сыналды. Сенсордың салыстырмалы жауап қарқындылығы 1,1 дБ-ге өзгерді, Cd^{2+} концентрациясы миллиардқа 0,1-ден 1000 бөлікке дейін өсті. Ұсынылған сынақ әдісіне сәйкес авторлар эксперименттік анықтау шегін 1 ppb-ге жақын деп бағалайды. Кадмий иондары сезімтал бетпен мықтап байланысады, сондықтан сенсор ластанған суда кездесетін Pb^{2+} , Zn^{2+} және CrO_4^{2-} -сияқты басқа ауыр металдардың иондарына қарағанда Cd^{2+} - ге әлдеқайда жоғары сезімталдықты көрсетеді, бұл жақсы селективтілікке мүмкіндік береді. Бұл шешім қоршаған ортаны бақылау мен ауыз суды бақылауда кеңінен қолданылады.

Жао Ж., Ванг Х., Сун Х. [63] жұмыста 45° көлбеу талшықтағы поляризаторға негізделген поляризациялық интерференцияның жоғары интеграциясы бар жаңа функционалды талшықты температура сенсорын ұсынды. Прототиптің дәлдігі, ажыратымдылығы, тұрақтылығы, сызықтығы мен сезімталдығы Pt100, 18B20 және поляризациялық пластинаға негізделген поляризациялық интерферометриялық талшықты температура сенсорымен (PP-PIF-TS) тексеріліп, салыстырылады. Трансформатор орамаларының температурасын бақылау схемасын қолдану мүмкіндігі тексерілді. Нәтижелер дәлдігі мен ажыратымдылығы сәйкесінше $\pm 0,1^\circ C$ және $0,01^\circ C$ -қа жететінін көрсетеді, бұл жоғары ажыратымдылыққа, жақсы интеграцияға және сенімділікке ие және қарапайым құрылымға, күшті дірілге қарсы және электромагниттік кедергілерге ие. Осылайша, ұсынылған схема жоғары кернеу, күшті магнит өрісі және температураны пассивті дәл өлшеудің басқа жағдайлары қажеттіліктерін қанағаттандыра алады.

[64] жұмыста TFBG телекоммуникация деңгейіндегі бір модалы, көп модалы оптикалық талшықтардың салыстырмалы сипаттамалары рефрактометрия және биодатчик мақсаттары үшін қолдану мүмкіндігі жазылған. Көп модалы талшықтағы TFBG қабылдау сипаттамалары көлемді рефрактометрия немесе беттік биосенсация қарастырылған кезде сәйкесінше бір модалы талшықтағы аналогтарына қарағанда жоғары немесе бірдей екенін растайды. Бұл бақылаулар сандық модельдеу арқылы расталады. Көп модалы талшықтағы TFBG бірнеше биомаркерлерді анықтауға мүмкіндік беретін жақсартылған мультиплекстеу мүмкіндіктері үшін спектрлік өткізу қабілеттілігінің төмендеуімен сипатталатын құнды практикалық артықшылықтарды ұсынады.

Удос Вү. Ой С.В. және басқалары [65] «қол-аяқ» ауруының қоздырғыштарының бірі А71 энтеровирусын анықтауға арналған көлбеу талшықты-оптикалық Брэгг торлы беттік плазмонды резонанстық (SPR-TFBG)

биосенсорын көрсетті. SPR-TFBG моноклоналды антиденемен (MAb), вирусқа жақындығы бар биорецептормен биофункционалдықтандырылған. Вирус концентрацияларынан басқа, датчик сигналы мен өлшеу дәлдігіне айтарлықтай әсер ететін сыну көрсеткішінің шуына ықпал етуі мүмкін. Сыну көрсеткішінің шуды тиімді түрде жоюы мақсатты вирустың сигналын тіркеу мүмкіндігін жақсартады.

Талшықты Брэгг торы (FBG) арқылы жасалған датчиктерде температура мен деформацияның айқас сезімталдығын ажырату мүмкін емес болады. Бұл мәселені шешудің ұсынылған жұмыстардың бірінде [66]: қысқа мерзімді торлар тобы болып табылатын көлбеу талшықты Брэгг торларының (TFBG) құрылысы болды. Негізгі мода резонансы (LP₀₁) және қаптама резонансы (LP_{mn}) өткізу спектрінде бір уақытта пайда болады. Температура мен деформацияны бір уақытта тәуелсіз өлшеу тек TFBG көмегімен мүмкін болады. Бұл зерттеуде 5° көлбеу бұрышы бар TFBG датчигінің құрылысы Optigrating 4.2.2 программасын пайдаланып, температура мен деформацияны бір уақытта өлшейді. Бірінші қадамда TFBG-ге айнымалы температура қолданылса, екінші қадамда оған өзгеретін деформация, үшінші қадамда бір мезгілде өзгеретін температура мен деформация қолданылды, ал толқын ұзындығында болатын сызықтық ығысулар Optimization көмегімен есептелген. Температура датчигін жобалау кезеңінде әртүрлі термиялық кеңею коэффициенттерімен және термооптикалық коэффициенттермен зерттеулер жүргізілді және толқын ұзындығында осы коэффициенттерден туындаған ығысулардың шамасы зерттелді. Температура мен деформацияны бір уақытта қолдану нәтижесінде пайда болатын толқын ұзындығының өзгеруі температура мен деформацияны бір мезгілде қолданбаған кезде болған толқын ұзындығының жалпы өзгеруіне тең екені байқалған.

[67] жұмыста 45° Брэгг көлбеу талшықты торын қашықтан орналастырылған талшықты сенсорларға қол жеткізу үшін және портативті сауалнама жүйесін жасау үшін толқын өткізгіш қосқыш ретінде пайдаланды. Брэгг көлбеу талшықты торы қашықтағы талшықты-оптикалық сенсорға тікелей қосылады және портативті сауалнама блогы мен сенсор арасындағы жоғары тиімді жарық өткізгіш ретінде қызмет етеді. Деформация мен температураның өзгеруі ол қашықтан орналастырылған оптикалық сенсор ретінде қызмет ететін стандартты Брэгг талшықты-оптикалық торлы сенсормен өлшенеді. Сауалнама блогынан жарық сәулесі линзалар, айналар және оптикалық коллиматор жүйесі арқылы Брэгг көлбеу талшықты торына (TFBG) енгізіледі және талшықты тор (FBG) кірісі ретінде әрекет етеді. FBG сенсорынан шағылысқан жарық сол Брэгг көлбеу талшықты торы (TFBG) арқылы сауалнама блогына оралады. Брэгг көлбеу талшықты торы (TFBG) жарық қабылдағыш және таратқыш ретінде пайдаланылады және "жарық көзін оптикалық сенсорға" және "оптикалық сенсорды детекторға" қосу үшін жүйенің негізгі бөлігін құрайды. Деформация мен температураны өлшеу қосымшалары үшін әзірленген жүйенің демонстрациялары ұсынылды және талқыланды. Сенсорлардан шағылысқан жарықтың сигнал / шу қатынасы ~ 40 дБ-ден асады

RI өлшеуге арналған қарапайым сенсор ұсынды және эксперименталды түрде [68] жұмыста көрсетті Сенсор көлбеу талшықты тор мен стандартты SMF арасына салынған шағын MMF бөлімінен тұрады. Эксперименттік нәтижелер қабық модасының шағылысуының орташа қуаты SRI жоғарылаған сайын төмендегенін көрсетеді, ал жарық көзінің ықтимал ауытқуларын жою үшін қуат берілген кезде Брэгг модасының орташа қуаты өзгеріссіз қалды. Сенсор шағылысу режимінде жұмыс істейді, бұл люменге қарағанда ыңғайлы.

[69] авторлары ұсынған жұмыста RI-дің жоғары ажыратымдылығы $1,5 \times 10^{-5}$ деңгейінде RI-де 1,360 шамасында, 1566,8 нм-де 2,5 сантиметрлік PCF және FBG қолданылған кезде қол жеткізіледі. Сонымен қатар, ұсынылған RI сенсорының температуралық сезімталдығы өте төмен. TFBG көмегімен қарқындылықты модуляциялауды толқын ұзындығының ығысуын оптикалық қарқындылықтың өзгеруіне айналдырудың пайдалы әдісі ретінде қарастыруға болады және оны арзан және оңай өндірілуіне байланысты практикалық қосымшаларда кеңінен қолдануға болады.

[70] жұмыста авторлар сыну көрсеткішін (RI) өлшеу биохимия, қоршаған ортаны бақылау және өмір туралы ғылымдар саласында үлкен маңызға ие екенін айтты. Тиісінше, RI талшықты-оптикалық сенсорлары шағын өлшем, жарық қарқындылығының өзгеруіне төзімділік, электромагниттік кедергілер, коррозияға төзімділік және т.б. сияқты артықшылықтарының арқасында кең қызығушылық тудырған.

[71] жұмыста авторлар талшықты Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық сенсорлар температураны, деформацияны және қысымды дәл, кедергісіз және сенімді қашықтықтан өлшеуді қамтамасыз етеді және олар электромагниттік кедергілерге қарсы төзімділікке ие. FBG телекоммуникацияда кеңінен қолданылады және оларды өндіру қазіргі уақытта экономикалық тұрғыдан тиімді. Датчиктер ретінде FBG азаматтық құрылыста, аэронавтикада, теміржол көлігінде, ғарышта және Әскери-теңіз күштерінде қолданылатын композициялық құрылымдарда көптеген өнеркәсіптік қосымшаларды табады.

[72] жұмыстың авторлары Брэгг тор сенсоры сыну көрсеткіші мен температураны бір уақытта және тәуелсіз өлшеу үшін тиімді қолданылатынын байқады. Микро тесіктер фемтосекундтық лазерлік микроөңдеу арқылы бұрғыланады. Өлшеу тордың резонанстық толқын ұзындығының ығысуын және оның қарқындылығын сәйкесінше өзгертуді анықтау арқылы жүзеге асырылады. ~29,50 дБ/RIU сыну көрсеткішіне сезімталдық (сыну көрсеткішінің өлшем бірлігі) жақсы сызықтықпен 1,30-дан 1,45-ке дейінгі сыну көрсеткіштерінің диапазонында қол жеткізіледі. Жүйенің жұмысы қарапайым, ыңғайлы және сенімді.

[73] жұмыста авторлар көлбеу талшықты Брэгг торы (TFBG) негізіндегі беттік плазмондық резонанс (SPR) сенсорларының сыну көрсеткішін (RI) өлшеу сипаттамаларын кезең мен тор бұрышы тұрғысынан жүйелі түрде зерттеді. Сандық талдау TFBG SPR сезімталдығы тор кезеңіне сызықтық пропорционал екенін және тор бұрышының жоғарылауымен сәл жақсарғанын көрсетті. Тордың бірдей қалыпты іске қосылу кезеңінде әртүрлі көлбеу бұрыштары бар TFBG-SPR

сенсорлары әртүрлі өлшеу диапазондарына жауап беретін түрлі қаптау модаларының реттілік диапазонына ие. Сонымен қатар, зерттеулерді TFBG-SPR сенсорларын әртүрлі периодтарымен және әртүрлі бұрыштармен жасады (5° , 7° , 10° , 12° , және 15°).

[74] жұмыстың авторлары CNT қолдану арқылы талшықты-оптикалық сезімтал құрылым сыну көрсеткіші мен температураны бір уақытта өлшеу үшін TFBG ұсынған және эксперименталды түрде көрсетті. Жан-жақты бағалай отырып, FBG-мен салыстырғанда SRI арқылы камту режимінің байланыс қарқындылығын өзгерту, CNT-мен біріктірілген TFBG ұсынған, сыну көрсеткіші төмен аймақта сезімталдықты және өлшеу диапазонын айтарлықтай арттыруы мүмкін ол шамамен 7 есе кеңейіп, $1 \sim 1,428$ аймағына ауысады. Сонымен қатар, қабық модасының белгілі бір резонансын қадағалап, содан кейін оның ең жоғары мәні мен резонанстық толқын ұзындығын шығарып, сыну көрсеткіші мен температура туралы мәндерді бір уақытта алуға болады.

FBG сенсорлық технологиясы ұзақ уақыт бойы практикалық технологиялар арасында кеңінен қолданылды. Оның бойындағы тән қасиеттер мен тән артықшылықтарына қарағанда, бұл жақын арада сөзсіз дәстүрлі зондтау технологиясын ауыстырады [75]. Алайда FBG сенсорлық технологиясының қазіргі жағдайы инженерлік талаптарға сай келуден әлі алыс, және төмендеу сияқты көптеген мәселелер әлі де шешілуі керек жүйенің құны, жаңа өлшеу механизмін зерттеу және ақылды оптикалық материалдар мен талшықты-оптикалық құрылғыларды қолдануға сұрақтарды шешу керек .

[76] жұмыста авторлар 3^0 көлбеу қасиеттері бар TFBG және оның өткізу спектрлерінде толқын ұзындығының екі түрлі тобы пайда болатынын байқады. Соның арқасында бір мезгілде температура мен сыну көрсеткішін өлшеуге қол жеткізілді. Бұл сенсорлар қарапайым және ықшам, өлшемдері тұрақты және иілуге сезімтал емес. Сонымен қатар, олар ең жақсы ажыратымдылықты қамтамасыз етеді.

[77] жұмыста авторлар кернеуге сезімтал емес бір FBG-ге негізделген векторлық қисықтық сенсоры ұсынады. Сенсорды жасау қарапайым және бізге ықтимал болып келеді. Шағылысу спектрі дөңес және ойыс иілу эксперименттерінде қарама-қарсы ауытқу бағыттарына ие, сондықтан сенсор қисықтықты векторлық өлшеуді жүзеге асыра алады. Датчиктің дөңес қисықтыққа сезімталдығы ал сенсордың ойыс қисықтыққа сезімталдығы тең $553,65 \text{ пм/м-1}$ және $-811,19 \text{ пм/м-1}$, тиісінше. Сезімталдық сенсорды қаптаманың қалыңдығын арттыру арқылы оңтайландыруға болады субстрат. Жұқа болат пластинаның үлкен қаттылығының арқасында сенсор мүмкін белгілі бір диапазонда осьтік кернеумен байланысты кедергілерді жеңу. Сонымен қатар, сенсор сыртқы RI-ге сезімтал емес. Қолайлы датчиктің тұрақтылығы оның практикалық қолданылуын жақсы.

[78] жұмыста авторлар RI сенсоры FBG-ді демодуляциялаушы элемент ретінде пайдаланады, ол PCF интермодальды интерферометрінен кейін тізбектей жалғанған. Интермодальдық PCF интерферометрі толық бүктелген, SMF-ке қосылған қысқа PCF арқылы жасалады. Рефлексияны бақылау арқылы Брэгг

толқын ұзындығындағы РСF интерференциялық спектрін ескере отырып, RI өлшемдерін қымбат емес электр өлшегішінің көмегімен жүзеге асыруға болады. Сонымен қатар, ұсынылған RI сенсорының температураға сезімталдығы өте төмен. FBG көмегімен қарқындылықты модуляциялау пайдалы әдіс ретінде қарастырылуы мүмкін толқын ұзындығының ығысуын оптикалық интенсивтіліктің өзгеруіне түрлендіру, және оның арқасында практикалық қолданбаларда кеңінен қолданылуы мүмкін.

[79] жұмыста авторлар салыстырмалы ылғалдылықтың жоғары сезімтал сенсорын ұсынды. сыну көрсеткішінің салыстырмалы ылғалдылықтың әртүрлі деңгейлеріне сезімталдығына байланысты PVA сезімтал материал ретінде пайдаланылды. Бірінші рет талшықты-оптикалық ылғалдылық сенсорында қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сезімтал жабын модаларының адгезия күші қолданылды. Оптикалық қуатты анықтау әдісі толқын ұзындығын анықтауға негізделген күрделі спектроскопиялық әдістермен салыстырғанда қарапайым және үнемді болды.

Салыстырмалы ылғалдылықтың 20% - дан 98% - на дейін әртүрлі деңгейлерінде PVA жабыны бар TFBG реакциялары зерттелді. TFBG өткізу қабілеті кірістіру сипаттамаларына байланысты екі түрлі ылғалдылық диапазонында жоғары сезімталдыққа ие болды (салыстырмалы ылғалдылық 20%-74% және 74%-98% тең болғанда). Әсіресе салыстырмалы ылғалдылықтың 86% - дан 98% - на дейінгі диапазонында. Алынған зерттеулер нәтижесінде PVA жабыны бар TFBG құрылымдық икемділігі, бір-бірін алмастыруы, ұзақ мерзімді химиялық тұрақтылығы жоғары және жылдам жауап беретін интеллектуалды материал ретінде және қалыпты жағдайдағыдай нақты уақыт режимінде салыстырмалы ылғалдылықты бақылау үшін қолданылуы мүмкін.

[80] жұмыста авторлар FBG негізіндегі кең ауқымды көлбеу сенсорын сипаттаған. Бірінші, температура сенсоры ретінде теориялық есептеулері мен талдаулары көрсетілген. Екінші, сенсордың прототипі жасалды және оның құрылымы және өлшем параметрлері егжей-тегжейлі сипатталған. Соңында, көлбеу сезімталдығын, температуралық калибрлеу үшін сенсорды кешенді пайдалану сынақтары өткізілді. Максималды бұрыштық сезімталдық 46,71 мкм құрайды, өлшеу дәлдігі 1,516 және рұқсат 0,003. Сонымен бірге келесідей артықшылықтары атап өтілді: өлшеудің жоғары дәлдігі, жоғары төзімділік және кең өлшеу диапазоны. Бұл сенсор көлбеу бұрышын статикалық басқару үшін қолайлы.

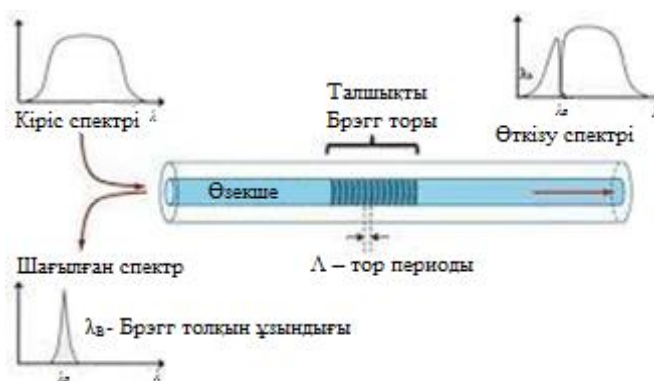
[81] жұмыста сыну көрсеткішін жақсарту үшін Брэггтың каскадты көлбеу талшықты торын ұсынды және эксперименталды түрде көрсетті. TFBG кәдімгі бір модалы талшыққа (SMF) және бірдей көлбеу бұрышы бар кішірейтілген диаметрлі SMF-ге ультракүлгін сәулеленумен жазылады, содан кейін қабық модасының бір-біріне қабаттасқан спектрлік ұштарының екі жиынтығын тудырады. Жалпы ұзындығы 18 мм болатын каскадты TFBG толқын ұзындығының кең диапазонына (100 нм-ден астам) және толқын ұзындығының тар бөлінуіне ие, бұл SMF-тегі TFBG-ге қарағанда, сыну көрсеткішін өлшеудің жоғары диапазоны мен дәлдігін қамтамасыз етеді. Жетілдірілген сенсорлық

мүмкіндіктер мен температуралық өзін-өзі калибрлеу сияқты артықшылықтары бар TFBG биохимиялық зондтау қосымшаларында үлкен сұранысқа ие.

[82] жұмыста CNT қолдану арқылы TFBG сыну көрсеткіші мен температураны бір уақытта өлшейтін талшықты-оптикалық сезімтал құрылым ұсынылған және эксперименталды түрде көрсетілген. Қалыпты TFBG көмегімен SRI анықтау ұсынылған CNT интеграцияланған TFBG-ге қарағанда айтарлықтай төмен сезімталдыққа ие. Ұсынылған әдісте өлшеу диапазоны шамамен 7 есе кеңейді. Сонымен қатар, қабық модасының белгілі бір резонансын бақылау содан кейін оның ең жоғары мәні мен резонанстық толқын ұзындығын алу, сыну көрсеткіші мен температураны бір уақытта алу мүмкіндігі туды.

1.2 Көлбеу талшықты Брэгг торының (TFBG) теориясы

Алдымен талшықты Брэгг торының құрылымы мен жарықты өткізу қасиеттеріне тоқталып кетсек. FBG электромагниттік сәулеленудің әсерінен кварц әйнегінің сыну көрсеткішін периодты түрде өзгерту арқылы пайда болатын оптикалық талшықтың өзегінде локализацияланған дифракциялық тор екені белгілі (сурет 5). FBG жалызған оптикалық талшық арқылы жарық өткенде, оның белгілі бір спектрлік диапазонда оның тордан бөлігінің немесе толық шағылуы болады. Шартты түрде FBG белгілі бір спектрі бар жарықты көрсететін айна ретінде жұмыс істейді деп айтуға болады, ал бұл диапазонға түспеген сәуле бастапқы бағытта таралуын жалғастырады. Осылайша, FBG оның шағылысу және өткізу спектрлері арқылы сипатталуы мүмкін



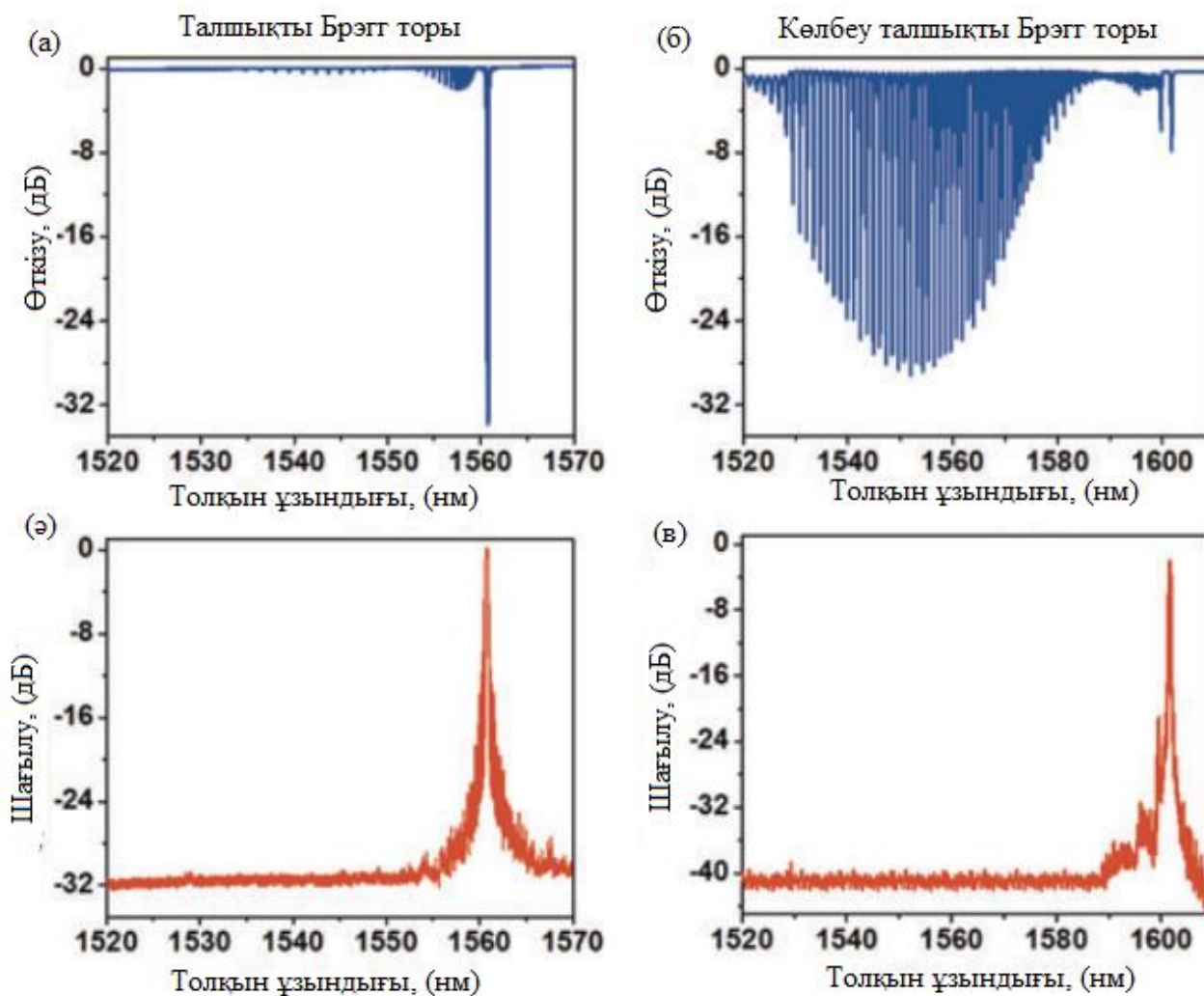
Сурет 5 – Брэгг торы бар оптикалық талшықтың көрінісі [83].

FBG негізгі параметрі-бұл Брэгг резонансының толқын ұзындығы λ_B , ол сонымен қатар тордың шағылысу және өткізу спектрлерінің орталық толқын ұзындығы болып табылады. Бұл шама (1) өрнегімен анықталады:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

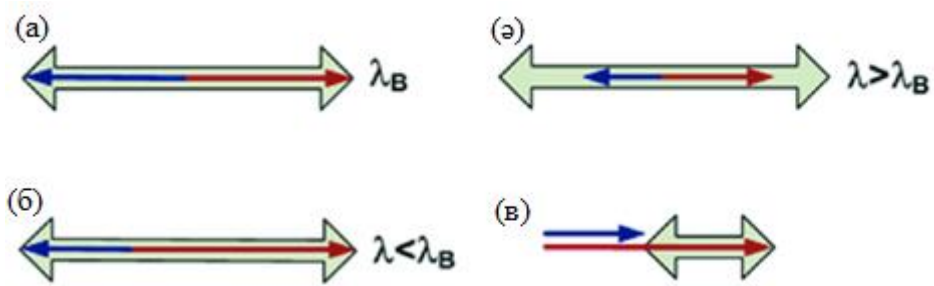
мұндағы n_{eff} - Брэгг резонансының толқын ұзындығындағы эффективті сыну көрсеткіші, Λ – тор периоды.

Көлбеу талшықты Брэгг торы немесе TFBG арқылы жарықтың өтуін талдау үшін сурет 6-да екі түрлі тордан өткен және шағылған жарықтың спектрлерін қарастырайық. Екі тордың біреуінің тор жазықтығы 10^0 көлбейген [84]. Екі жағдай бірнеше маңызды жолмен ерекшеленеді. Кәдімгі FBG бір ғана күшті резонансқа ие, яғни нақты талшықтағы осы торлы кезең үшін Брэгг шартына сәйкес келетін толқын ұзындығында берілістің төмендеуі және сол резонанс шағылысу спектрінде жалғыз шың ретінде де пайда болады. Бұл резонанс Брэгг резонансы деп аталады. Барлық спектрлерде Брэгг резонанстық толқын ұзындығы (λ_B) әрқашан ең ұзын болып табылады, өйткені бір ядролы басқарылатын режимнің тиімді индексі ең үлкен (бұл туралы қосымша ақпаратты бөлімде табуға болады). Брэгг резонансынан басқа, FBG спектрі таралу кезінде көптеген қосымша әлсіз резонанстарға ие: бұл резонанстар қабықшамен басқарылатын модалармен байланыс нәтижесінде пайда болады және шағылысқан кезде пайда болмайды, себебі, сол модалар арқылы берілетін қуат талшықтың кіріс жолынан шағылған сәулені алу үшін қолданылатын әр түрлі қосқыштар, патч-кордтардың әсерінен жоғалады. Қабықша модасындағы резонанстар жоғары спектрлік фильтрация тазалығын талап ететін FBG қосымшаларының көпшілігінде қажет емес. Тор жазықтықтарын сынау кезінде ең таңқаларлық (және жалғыз) әсер Брэгг резонансы арқылы қабық режиміндегі резонанстардың күшті күшеюі болып табылады. λ_B -ге ең жақын резонанс, әдетте оның қысқа толқынды жағындағы қабықша мода көршілеріне қарағанда күштірек "елес" мода резонансы деп аталады [85], өйткені ол Брэгг резонансының көптеген қасиеттеріне ие, бірақ іс жүзінде бірнеше төмен ретті қабық режимдерінің суперпозициясынан тұрады.



Сурет 6 – Талшықты Брэгг торы мен көлбеу талшықты Брэгг торларының өлшенген өткізу және шағылу спектрлері (өлшеулер суда жүргіліген) [84]

TFBG өткізу спектрінің 1530 нм облысында қабықша модасының үзілуі байқалады, содан кейін (қысқа толқындарға қарай) резонанстық амплитудалар күрт төмендейді. Ол басқарылатын қабықша режимінен герметикалық емес қабықша реджиміне өтуіне байланысты. Сурет 7-де көрсетілген диаграммалар арқылы осы спектрлік ерекшеліктерді Брэгг торының дифракциясының көмегімен түсіндіруге болады.



Сурет 7 – Түсетін толқын векторынан (қызыл көрсеткі) периодтық ауытқу (кең сұр қос бағытты көрсеткі) арқылы құрылымның басқа модасына (көк көрсеткі) қосылуға арналған фазалық сәйкестік диаграммалары: а) өзекшенің кері шағылысу режимі; ә) λ_B -ден үлкен толқын ұзындығындағы тыйым салынған байланыс; б) λ_B -ден қысқа толқын ұзындығындағы қабық модасымен кері байланыс; в) ұзақ мерзімді торды қолдана отырып, қабықша модасына тікелей қосылу [85]

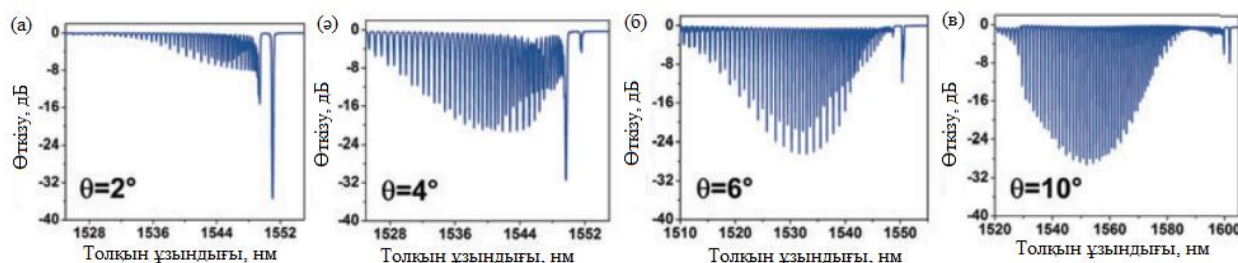
Көлемді торға түсетін жарық екі шарт орындалған кезде ғана тиімді дифракцияланады: импульсті сақтау және сәулені қалыптастыру [26, 86]. Импульстің сақталуы, фазалық синхронизм деп те аталады, дифракцияланған сәуленің толқындық векторы түскен сәуленің толқындық векторының векторлық қосындысына және тордың толқындық векторына тең болады деп болжайды. Тиімді дифракция үшін сәуленің пайда болуы одан әрі белгілі бір мөлшерде жарықтың жеке тор жазықтықтарынан алынған толқындық Вектор бағытында шашырауын талап етеді (мысалы, Френельдің жеке тор жазықтықтарынан шағылысуы арқылы). Талшық модаларының байланысы жағдайында барлық байланыстырылған өрістердің толқындық векторлары талшық осі бойымен орналасады, өйткені осьтік біртекті құрылымның бағыттаушы режимдері анықтамасы бойынша бағыттаушы оське перпендикуляр жазықтық фазалық жазықтықтарға ие және олардың шамасы $\beta_i = 2\pi N_{eff}^i / \lambda - N_{eff}^i$ анықталады, мұндағы N_{eff}^i – λ толқын ұзындығындағы «i» модасының тиімді индексі (7- суретте модалардың толқындық векторлары негізгі модалар үшін қызыл, қабық модалары үшін көк түспен көрсетілген). Сол сияқты, тордың толқындық векторының шамасы $\beta_G = 2\pi / \Lambda$ (кең сұр бағыттаушы), мұндағы Λ – талшық осі бойымен өлшенген тордың периоды. Сондықтан i режим мен j режимі арасындағы фазалық синхронизм шартын келесідей көрсетуге болады [26]:

$$\beta_i \pm \beta_G = \beta_j \quad (2)$$

\pm белгісі тордың толқындық векторының "бағыты" болмауына байланысты. FBG үшін торлар талшық осіне перпендикуляр, ал сәуленің пайда болуы шағылысқан негізгі мода ретінде жарықтың тікелей артқа қарай дифракциясын тудырады. (2) теңдеу (сурет 7, а) бойынша бұл тек β_G шамасы негізгі β_i режимінің толқындық векторының шамасынан екі есе үлкен болатын толқын ұзындығында болады. Бұл стандартты ТБТ шағылысу (және өткізу)

спектрінде байқалатын жалғыз басым шыңды түсіндіреді. Ұзын толқындарда бірдей тор үшін (2) теңдеуді қанағаттандыру мүмкін емес, өйткені толқындық векторлар тым қысқа болады (сурет 7, ә). Қысқа толқындарда β_i негізгі моданың брэгг шағылысуы үшін тым үлкен болады, бірақ қабықша модасымен байланыс болуы мүмкін, өйткені олардың тиімді индекстері кішірек және (2) теңдеу жеке қабық модаларына сәйкес келетін бірегей толқын ұзындықтарында орындалуы мүмкін (сурет 7, в). Мұндай жағдайларда өткізу спектріндегі шығындардың сәтсіздігі жарықтың осы толқын ұзындығында өзекшеден жоғалатынын көрсетеді. Кері шағылысқан қабықша модалары әдетте шағылысу спектрлерінде пайда болмайды, өйткені бұл модалар қабықша шекарасында шашырау және жұтылу арқылы айтарлықтай әлсірейді.

(2) теңдеу кез-келген тор белгілі бір толқын ұзындығында (λ_B -ден қысқа) қабықша модаларымен әрекеттесе алады деп болжағанымен сурет 6-да мұндай байланыс FBG үшін TFBG-ге қарағанда әлдеқайда әлсіз екенін көрсетеді. Бұл айырмашылықты сәуленің пайда болуымен байланысты Брэгг дифракциясының аспектісімен түсіндіруге болады: негізгі моданың жарығы FBG торының жеке жазықтықтарына тік бұрышпен түсіп, тікелей артқа, яғни өзекше бағытында шағылысады. Тор жазықтықтары қисайған кезде шағылыстар осьтен ауытқиды және әрбір тор жазықтығы қабыққа қарай аздап жарық шығарады, осылайша фазалық синхрондалған толқын ұзындығында артқа таралатын қабық модасының өсуіне ықпал етеді. Содан кейін көлбеу бұрышы сурет 8-де көрсетілгендей қабық модасының қайсысы қатты байланысатынын анықтайды [87].



Сурет 8 – Көлбеу бұрышына байланысты TFBG өткізу спектрлері [87]

FBG жағдайына оралсақ, сурет 8, а байқалған қабық модаларының шағын резонанстары бұл талшық үшін тор үлгісі өзек аймағымен шектелгендіктен пайда болады (қабық фотосезімтал емес). Сондықтан жоғалып бара жатқан Негізгі мода өрісі тордың шетіне соғылып, қабыққа қарай әлсіз дифракцияланады. Бұл ең жақсысы, бұл резонанстарды қабықтың бір бөлігін фотосезімтал етіп, тор жазықтықтары түсетін моданың көлденең қимасынан үлкен болатындай етіп жоюға болатындығын көрсетеді.

Сонымен, толқын ұзындығы қысқарған сайын синхронды жағдайды қанағаттандыратын қабықша модаларының тиімді көрсеткіші сыртқы ортаның сыну көрсеткішінен аз болуы мүмкін. Бұл орын алғанда, қабық-сыртқы орта интерфейсіндегі толық ішкі шағылысу жоғалады. 1530 нм тыс толқын

ұзындықтарында резонанстар байқалатын болады (сурет 8, в), бірақ олар әлсіз және үздіксіз жұту спектріне сәйкес келеді.

Ең алдымен, фазалық синхронизм шартын (2) негізгі мода мен "r" деп белгіленген басқа мода арасындағы резонанстық толқын ұзындығын λ_r резонанстық FBG/TFBG үшін практикалық түрде қайта жаза аламыз:

$$\lambda_r = (N_{eff}^{core}(\lambda_r) + N_{eff}^r(\lambda_r)) \Lambda / \cos(\theta) \quad (3)$$

мұндағы Λ — торды жасау үшін қолданылатын интерференциялық үлгінің периоды, θ — талшықтың көлденең қимасының жазықтығына қатысты тор жазықтықтарының көлбеу бұрышы, $N_{eff}^{core}(\lambda_r)$ — резонанс пайда болатын толқын ұзындығында (λ_r) өзекшемен басқарылатын бірмоданың тиімді көрсеткіші және $N_{eff}^r(\lambda_r)$ — бірдей толқын ұзындығындағы r модасының тиімді индексі. Дисперсияны ескеру маңызды (яғни. резонанстық толқын ұзындығындағы тиімді индекстерді қайта есептеңіз), өйткені қабықша модаларының резонанстары салыстырмалы түрде кең спектрлік диапазонда жүреді (мысалы, 10° бұрышында 100 нм-ден жоғары).

Тор резонанстарының күші (олардың қуаты бойынша шағылысу коэффициенті R) төмендейтін негізгі мода мен фазалық синхронды режим арасындағы κ байланыс коэффициентіне, сондай-ақ келесі қарапайым өрнек бойынша тордың L ұзындығына байланысты [15]:

$$R = \tanh^2(\kappa L) \quad (4)$$

FBG/TFBG резонанстарының спектрлік ені тор ұзындығының ұлғаюымен тарылады, кем дегенде шағылысу шамамен 100% жеткенше, содан кейін резонанстар кеңейе бастайды [15]. TFBG мен FBG арасындағы жалғыз айырмашылық — тор жазықтықтарының көлбеу орналасуы өзекшенің кіріс модасы мен бүкіл құрылымның әртүрлі бағытталған және сәулелену модалары арасындағы байланыс коэффициентінің мәнін өзгертеді.

Байланыс коэффициенті қарастырылып отырған модалардың электр өрістерінің көлденең компоненттері бойынша келесідей бағаланады [26]:

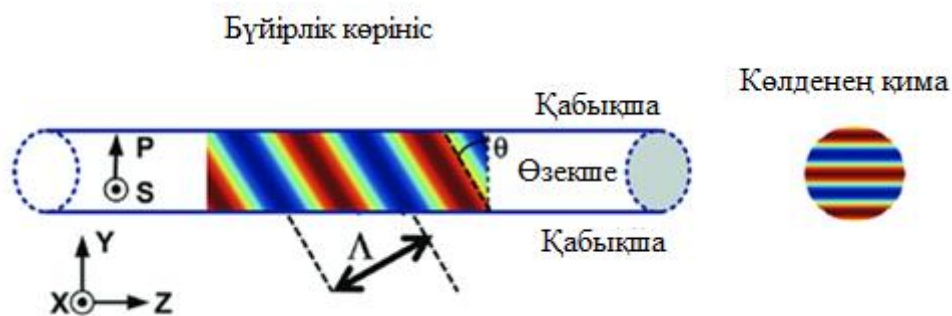
$$\kappa = C \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{core}^{\kappa} \vec{E}_r \Delta n(x, y) dx dy \quad (5)$$

мұндағы C — (E_{core} және E_r) көлденең мода өрістерінің нормалануымен байланысты пропорционалдылық константасы және $\Delta n(x, y)$ — талшықтың көлденең қимасындағы торға байланысты сыну көрсеткішінің бұзылуын сипаттайтын функция. Көптеген FBG үшін тормен байланысты сыну көрсеткішінің бұзылуы өзек аймағымен шектеледі және басқа жерлерде нөлге тең болады, осылайша (5) теңдеудегі интегралды шектейді. Сонымен қатар, кіріс өзекшенің модалары талшықтың цилиндрлік симметриясына байланысты еркін бағытта сызықтық поляризацияланған. Дегенмен, тордың ауытқуы көлбеу

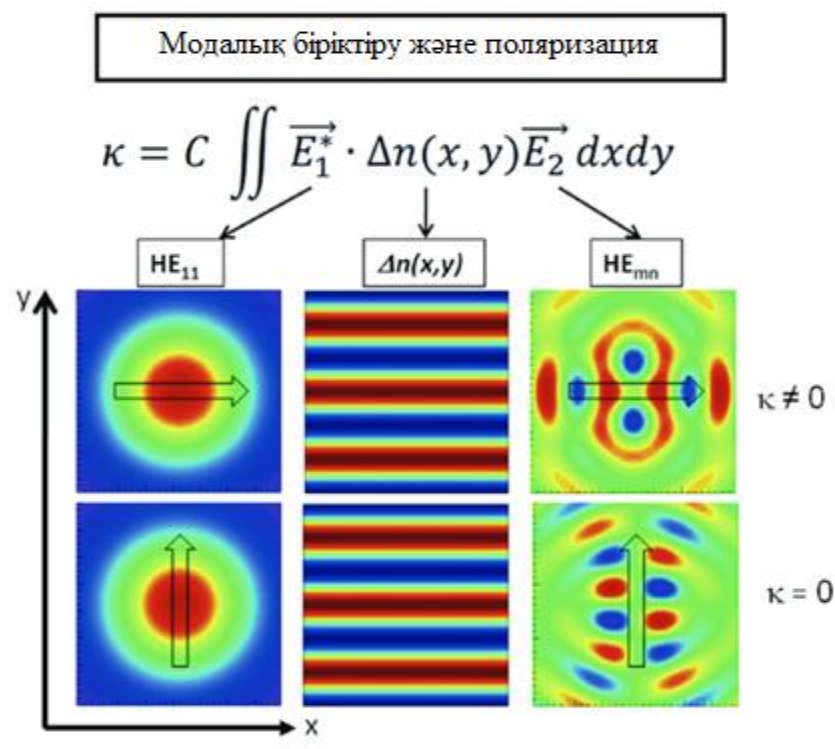
бағытына сәйкес талшықтың симметриясын бұзатын кеңістікте жақсы анықталған бағытқа ие (біз оны z бағыты бойынша талшықтың таралу осі бар $u-z$ жазықтығына ерікті түрде жатқызамыз). Сондықтан біз кіріс электр өрісі x (тор жазықтығына түсетін S-поляризацияланған жарыққа сәйкес келеді) немесе y (P-поляризацияланған) бойымен сызықтық поляризацияға ие болатын екі жағдайды бөлек қарастыра аламыз. Соңында, (5) теңдеудегі электр өрісі векторларының скалярлық көбейтіндісі x немесе y поляризациясы бар өрістер (кіріс режимінің поляризация бағытына байланысты) арасындағы қарапайым көбейтуге келеді, өйткені $\Delta n(x,y)$ шыны тензор емес. (5) теңдеудегі интеграция талшықтың $x-u$ көлденең қимасында жүзеге асырылатынын еске түсіре отырып, тордың ауытқуы әдетте FBG үшін тұрақты, бірақ TFBG үшін келесі көріністі алады [26]:

$$\Delta n(x,y) = \Delta n \cos((4\pi/\Lambda)(z \cos(\theta) + y \sin(\theta))) \quad (6)$$

Түсінікті болу үшін: кіріс модасы x бойымен поляризацияланған кезде, интеграл тек қабықша модасы электр өрісінің x компонентін қамтиды (және y -поляризацияланған кіріс модасында да осылай). Осы екі жағдайды бөлек қарастыруға болады (кіріс поляризациясының басқа күйлерін осы екі ортогональды жағдайдың суперпозициясы ретінде қарастыруға болады). Осының барлығының нәтижесінде қабықша модасының берілген ауытқу индексі (тор) үшін (5) теңдеуі күшті байланысты қамтамасыз ететін көлбеу жазықтыққа қатысты кіріс модасының поляризация бағытына байланысты әр түрлі болады (өйткені берілген қабықша модасының E_x және E_y өріс компоненттері мүлдем өзгеше). Өзекше модасының және әдеттегі жоғары ретті қабық модасының E_x және E_y компоненттері үшін сурет 10-да мысал келтірілген. Симметрия мақсатында бұл қабық модасы өзекшенің кіріс модасы S-поляризацияланған кезде ғана (яғни x бойымен) қатты қозуы мүмкін екені анық.



Сурет 9 – Талшықтағы көлбеу торға байланысты индекстің ауытқу диаграммасының бүйірлік көрінісі және көлденең қимасы (масштабта емес) [84]

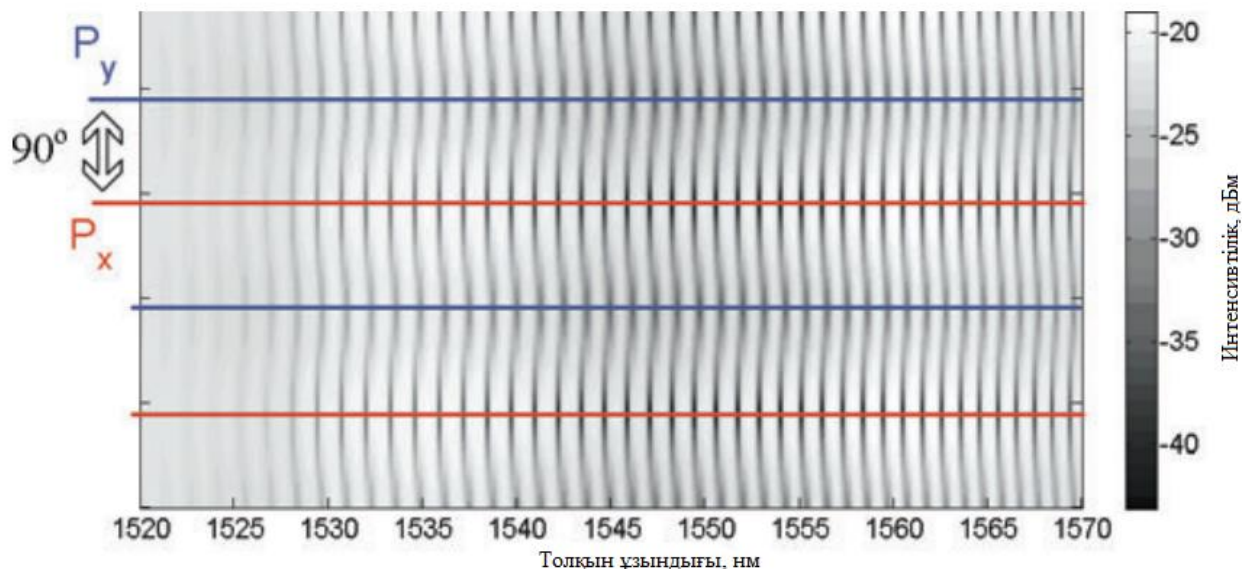


Сурет 10 – Кіріс модасының поляризациясына байланысты негізгі мода (HE_1 мен типтік жоғары ретті мода арасындағы байланыс коэффициенті үшін интеграл ішіндегі үш функцияның графикалық көрінісі [84]

Сурет 10-да модельденген модалардың электр өрістері талшықтың өзегінде орналасқан 15-тен 15 мкм²-ге дейінгі аумақта көрсетілген. Жоғарғы қатар S-поляризациясы бар кіріс жарығына, ал төменгі қатар P — поляризациясы бар жарыққа сәйкес келеді. Оң жақ бағанда сол $HE_{m,n}$ режимінің электр өрісінің x және y компоненттері көрсетілген.

Практикалық тұрғыдан алғанда, мод байланысының поляризациялық тәуелділігі негізгі моданың поляризация күйін TFBG-де дәл бақылауға болатын жағдайда ғана пайдалы болуы мүмкін. Поляризацияны сақтай отырып, талшықты пайдалану бұл мәселені шешуі мүмкін болса да, бұл шешім екі негізгі қиындықты тудырады: Қос талшықты сыну осьтерінің бірі бойымен көлбеу жазықтықты туралау қажеттілігі (бұл TFBG жазу процесін қиындатады) және сұрау поляризацияланбаған немесе нашар поляризацияланған жарықта орындалған кезде барлық резонанстарды бөлу.. Поляризацияны сақтамайтын талшықты пайдалану әлдеқайда оңай және арзанырақ. Бұл талшықтың көзі мен TFBG арасындағы аймақтары екі сәуле шағылыстырғыш болу үшін қатты бұралған немесе шектелгенге дейін мүмкін болады. Содан кейін талшықта жұмыс істейтін сызықтық поляризацияланған мода TFBG-ге поляризацияның бағыты белгісіз сызықтық күйінде де жетеді. Содан кейін поляризацияның кіріс күйінің қарапайым айналуы (поляризатор және/немесе жартылай толқындық пластинаның көмегімен) пайдаланушыларға тордағы дұрыс кіріс күйлеріне сәйкес келетін кіріс поляризациясының бұрыштарын "табуға" мүмкіндік береді

(айналу кезінде өткізу спектрін бақылау арқылы орын алады). Қабықша режимінің резонанстарының екі түрлі жиынтығы қызыл және көк түстермен ерекшеленген поляризация бұрыштарында айқын көрінеді және олар 90 градуска бөлінеді. Бұл сурет 11-дегі өлшенген мәліметтердің жиынтығы үшін көрсетілген.



Сурет 11 – Кіріс патчкордына (тік шкала) берілетін сызықтық поляризация бағытының функциясы ретінде тордың спектрлік тығыздығының графигі (көлденең орналасуына байланысты сұр рең) [87]

Жеке резонанстарды поляризация күйлеріне жатқызу қазіргі уақытта зерттелуде. Металлмен қапталған талшықтардың жағдайы үшін плазмондық әсерлер спектрлерде S және P поляризацияланған резонанстарды нақты анықтауға мүмкіндік береді.

TFBG өндіру технологиясы. TFBG жасаудың негізгі тәсілдеріне фазалық маска әдісі, сканерлеу әдісі, нүктелерді жазу әдісі және т.б. жатады. Зерттеулердің көпшілігінде фазалық маска әдісі сканерлеу әдісімен бірге қолданылды. Фазалық маска әдісінің артықшылығы мынада: TFBG тор кезеңі еңіс бұрышына тәуелсіз, демек, талшықты торларды икемді етіп жасауға болады. Кейбір зерттеушілер сонымен қатар талшықты торлардың өнімділігін айтарлықтай жақсартатын голографиялық әдісті енгізді, дегенмен тор кезеңі әдетте еңіс бұрышына байланысты. 2006 жылы [88] авторлары Ллойд айнасына негізделген интерференциялық әдіспен фотонды кристалды талшықта (PCF) TFBG жасады. Басқа ғалымдар да TFBG жасаудың бірнеше жаңа схемаларын әзірледі. 1999 жылы ультракүлгін (УК) әсер ету арқылы жарыққа сезімтал талшықты қаптау аймағында TFBG жазғаннан кейін Л.Брилланд және басқалар оның спектрлік сипаттамаларын сатылы сыну көрсеткіші профилі бар стандартты талшықта жазылған TFBG-мен салыстырды және тәуелділікті талдады [89]. Жоғары бұрышты TFBG дайындауға қатысты, 2002 жылы Дж.М. Батъято және т.б. 45 градуска тең немесе одан жоғары көлбеу бұрышы бар TFBG

сәтті жасалды, оның поляризация сипаттамаларын бұрын эксперименттік түрде P.S. Vestbрук және т.б. 2000 жылы талдаған болатын [90-91].

TFBG зерттеуіндегі теориялық прогресс. Мод пен бүйірлік сәулеленуді байланыстырудан басқа, TFBG -дің басқа да көрнекті сипаттамаларын анықтау үшін теориялық аспектке көп күш жұмсалды. TFBG спектрлік сипаттамаларын талдаудың негізгі тәсілдеріне байланысты режимдер теориясы және көлемдік ток әдісі жатады. Талшықты торлар пайда болғанға дейін де адамдар жалпақ толқынды торларды зерттеу үшін байланысты режимдер теориясын қолданды, олардың бірнеше әдістері мен тұжырымдары TFBG-мен жұмыс істеу үшін импортталуы және өзгертілуі мүмкін. 1996 жылы Т.Ердоған мен Дж. Сайп спектрлік сипаттамаларды және басқарылатын режим, қабық режимі және TFBG сәулелену режимі арасындағы режим байланысын алдын ала зерттеу үшін байланыстырылған режим теориясын қолданды [92]. Олардың теориялық есебі эксперименттік нәтижелерге жақсы сәйкес келеді және байланысты режим теориясы ұзақ мерзімді торлармен (LPG) және кейбір арнайы торлармен жұмыс істеу үшін де қолданылады. Резонанстық толқын ұзындығы, өткізу қабілеттілігі, байланыс коэффициенттері және таралу тұрақтысы үшін өрнектер, сондай-ақ олардың тор кезеңіне және тиімді сыну көрсеткішіне тәуелділігі алынды. Үш қабатты орта мен талшық геометриясының моделіне сүйене отырып, Ердоғанның зерттеу тобы мод байланысын талдаудың әмбебап теориялық негізін қамтамасыз ететін көп байланысқан мод теориясын жасады [93-95]. Жақсы қалыптасқан байланысты режим теориясына сүйене отырып, 2001 жылы Ү. Ли және бірлескен авторлар. цилиндрлік координаттар жүйесіндегі көлемдік ток әдісін қолдана отырып, фазалық сәйкестік шарты, толқын ұзындығына тәуелділік, бұрыштық үлестіру және TFBG поляризациялық тәуелділігі егжей-тегжейлі талданды [96]. Көлбеу талшықтық Брэг торына (TFBG) негізделген температуралық индикаторларды үлкен қашықтықта орналасқан және қолжетімі қиын және қауіпті әртүрлі орталардың – жарылғыш, күшті электрмагниттік сәуле шығаратын ортада, мұнай, газ трубаларындағы температураны өлшеуге, магистралды талшықты байланыс желісі жүргізілген орталардағы температурасын анықтау мақсатында кеңінен қолданылады. Сонымен, қазіргі таңда TFBG негізіндегі талшықты-оптикалық сенсорларды тиімді қолдану айтарлықтай мүмкіндіктерге ие болып отыр. Талшықты оптикалық сенсорлар өнеркәсіптік қолдануларда қарқынды процесс жүргізілуде [97].

2 ТӘЖІРБИЕЛІК ЗЕРТТЕУДІ ҰЙЫМДАСТЫРУ

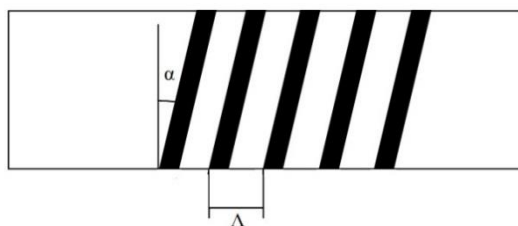
Сыну көрсеткіші көптеген химиялық және биологиялық процестерде жиі бақыланатын маңызды параметр болып табылады. Сыну көрсеткішінің мәнін анықтау үшін талшықты-оптикалық сенсорлардың ішіндегі Брэгг торларын пайдалануға болатыны белгілі. Классикалық талшықты Брэгг торлары қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне сезімтал емес, өйткені өзекте таралатын жарық қабықшаның аз тереңдігіне ғана енеді. SRI сезімталдығын, басқалармен қатар, талшықтан қабықшаны алып тастау арқылы алуға болады. Бұл сенсорлар жоғары температураның айқаспалы сезімталдығымен сипатталады. Балама әдіс – көлбеу талшықты Брэгг торлы сенсорларын пайдалану. Осы типтегі құрылымдарда өзекшеден қабықшаға жарықтың дискретті кері байланысы болуынан қабықша модалары пайда болады. Қабықша модаларының көптігі қабықшаның үлкен өлшемінің нәтижесі болып табылады. Қабықша модалары қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне өте тәуелді. Олар қабықшаның шекарасына жақын созылады; сондықтан SRI олардың тиімді сыну көрсеткішіне әсер етеді. Қабықша модалары өзекшедегі жарықтың таралуына қарама-қарсы бағытта таралады. Өткізу спектрінде олар жұқа тарак түрінде көрінеді. Тасымалдау спектрінде екі шың болады: негізгі мода мен қосалқы мода. SRI өлшеу үшін тек қабықша модаларын пайдалануға болады. Олар талшықты қабықша модасын күшейту нәтижесінде шағылысу спектрінде көрінбейді. Жеке қабықша модалары сыртқы жағдайлардың өзгеруіне әртүрлі сезімталдыққа ие. Жоғары ретті қабықша модалары SRI өзгерістеріне неғұрлым сезімтал. SRI арттыруға жататын қабықша модалары ағып кету режимдеріне кіреді, бұл кезде олар талшықты қабықшаның интерфейсында және қоршаған сыну көрсеткішінде толық ішкі шағылысу арқылы көрсетілмейді. Бұл олардың әсерлі сыну көрсеткіші қоршаған сыну көрсеткішінен үлкен екенін білдіреді.

TFBG-нің белгілі бір SRI диапазонына сезімталдығын тор жазықтықтарының көлбеу бұрышына қарай таңдауға болады. Сондай-ақ оптикалық талшықтың диаметрін өзгерту арқылы сезімталдық ауқымын өзгертуге болады. Мысалы, диаметрді азайту SRI сезімталдығын арттырады. Сондай-ақ қызықты модификациялар бар, мысалы, полигональды TFBG, бірінің артынан бірі орналасқан, әртүрлі көлбеу бұрыштары бар бірнеше торларды қамтиды. TFBG негізіндегі сенсордың қосымша сезімталдығын екі негізгі жолмен арттыруға болады. Бірінші әдісте плазмоникалық әсерге жету үшін торлы талшықты арнайы материалдармен жабу керек. Екінші әдіс қатаң бақыланатын поляризациясы бар спектрлік өлшемдерді қолдануды талап етеді. Дегенмен, бұл көптеген поляризациялар үшін спектрді қосымша өлшеуді талап етеді, бұл сенсорды түзетуді қиындатады. Көп жағдайда қарапайым эксперименттік қондырғыны қолданған дұрыс. Жақсы өлшеу қасиеттеріне спектрлік өңдеуді сәйкес таңдау арқылы қол жеткізуге болады, бұл осы зерттеудің мақсаты болып табылады. Тор ортасының өзгеруінен туындаған TFBG спектріндегі өзгерістер көптеген басылымдарда белгілі және сипатталған. Өлшенген спектрлерге негізделген параметрлерді анықтаудың белгілі әдістері де

бар, олар SRI-ге тікелей қатысты. Бұл диссертациялық жұмыста жаңа спектрлік сипаттамаларды анықтаудың жаңа әдістері ұсынылды және әдеби шолуда келтірілген алгоритмдермен салыстырылды.

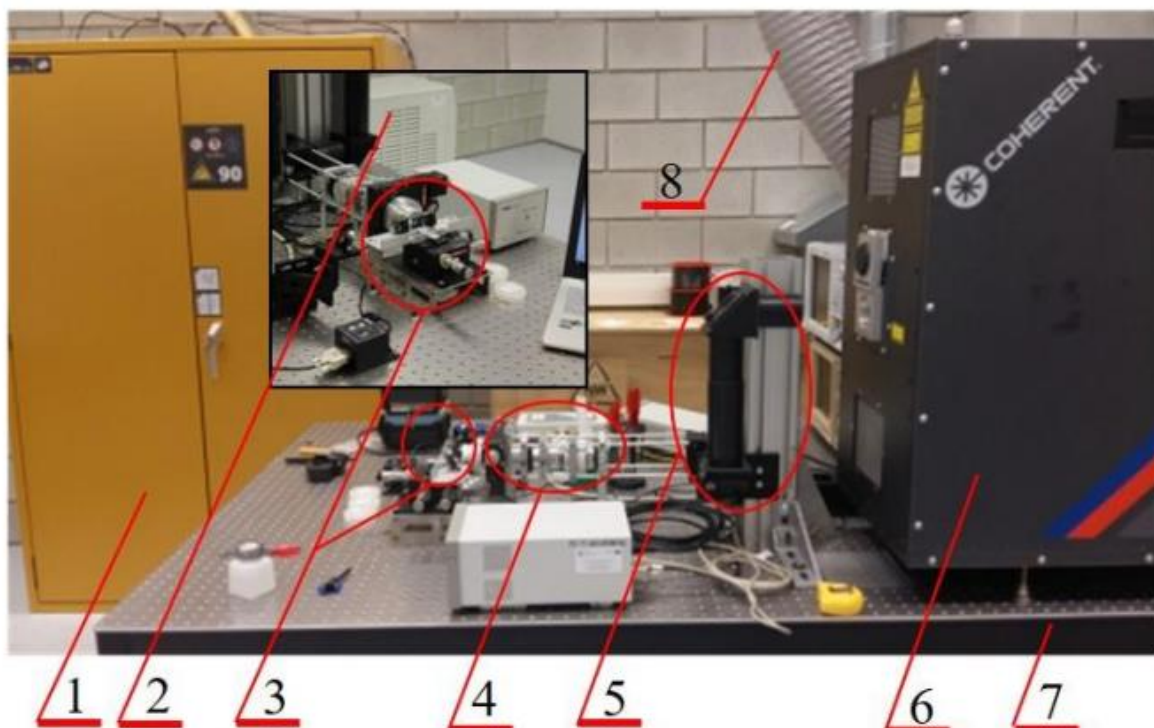
2.1 Көлбеулік бұрыштары 6° және 8° болатын TFBG оптогалшыққа жазу қондырғысы

Диссертациялық жұмыстың мақсатына орай эксперименттік жұмысты жүргізу үшін көлбеу бұрыштары (α) 6 және 8 градус болатын, ұзындығы 10 мм және периоды 540 (Λ) нм тең TFBG дайындалды (сурет 12).



Сурет 12 – TFBG типтік құрылымы

Брэгг көлбеу торы 10 күндік гидрогенизацияланған бір модальды SMF - 28 талшығында жазылды. Торды талшыққа жазу фазалық маска әдісімен 248 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін эксимерлі лазердің көмегімен жасалды. 1080 нм фазалық масканы қолдану Брэггтың толқын ұзындығы 1564,5 нм болатын құрылымды құруға мүмкіндік берді. Лазер 100 мДж қуатымен және 15 Гц қайталау жиілігімен жұмыс істеді. Торларды жазу жүйесінің жұмысын тұрақтандыру үшін бөлмеде тұрақты температура сақталды, ал эксимерлі лазерде қосымша сумен салқындату болды (сурет 13) [98].



Сурет 13 – TFBG жазу станциясы [98]

TFBG оптогалшыққа жазу станциясы келесідей компоненттерден тұрады (сурет 13): 1-эксимерлі лазерге арналған газ қондырғысы, 2-құрылымды жазу кезінде лазер параметрлерін тұрақтандыруға арналған су салқындатқыш, 3-қадамдық қозғалтқышпен жұмыс істейтін фазалық масканың айналмалы үстелі, 4-ультракүлгін сәулесін позициялау және қалыптастырудың жақтаулық жүйесі, 5-оптикалық перископ жүйесі, 6-эксимерлі лазер, 7-белсенді оптикалық үстел 8-лазерден газды шығару трубасы

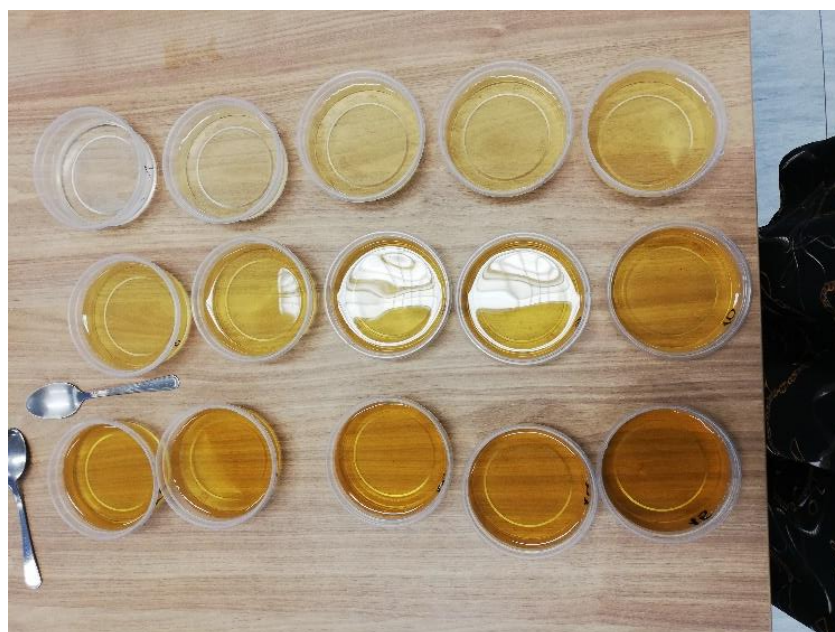
Өндірілетін құрылымдардың тиімділігін жақсарту үшін белсенді тербелістерді жоюға арналған оптикалық кестелер қолданылды. Олар жүйенің де тербелістерін жойып отырды. Осылайша алынған TFBG қоршаған ортаның әр түрлі сыну көрсеткіштеріндегі спектралды зерттеулер жүргізілді.

2.2 Ортаның сыну көрсеткішінің әр түрлі мәндерін алуға арналған ерітіндіні дайындау

Мысалы, [1] жұмыста сыну көрсеткіші 1,3723-1,4532 аралығындағы тоғыз мәнді қабылдады, [69] жұмыста 1,3330-1,4532 аралығындағы жеті мәнді қабылдады. Бұл жұмыста ортаның сыну коэффициенті қамыс қанты қосылған су ерітіндісімен берілген қанттың әртүрлі концентрациясы бар ерітіндінің 24 нұсқасы қолданылды. Нәтижесінде қоршаған ортаның сыну коэффициенті ортаның тұрақты температурасында 1,3344-тен 1,3706-ға дейінгі 24 түрлі мәнді қабылдады. Концентрация мәндері және қант массасы тұрақты [99] және 1-кестеде берілген.

Кесте 1 – Әр түрлі сыну көрсеткіштеріне ие ерітінділерді алуға арналған сипаттамалар

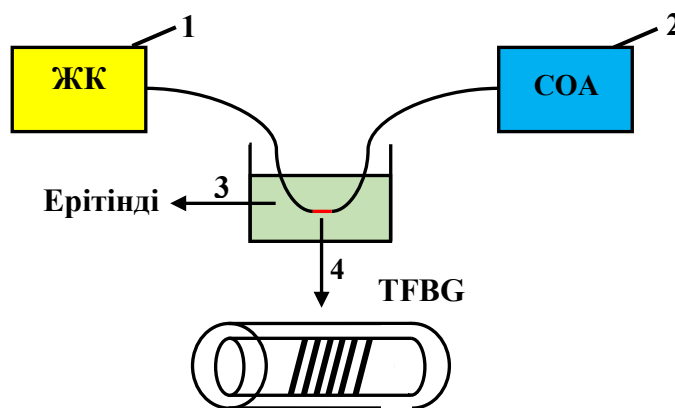
Концентрация %	Ерітінді массасы	Зат массасы (қамыс қанты)	Сыну көрсеткіші
1.	101,01	1,01	1.3344
2.	102,04	2,04	1.3359
3.	103,09	3,09	1.3374
4.	104,17	4,17	1.3388
5.	105,26	5,26	1.3403
6.	106.38	6.38	1.3418
7.	107.53	7.53	1.3433
8.	108.7	8.7	1.3448
9.	109.89	9.89	1.3464
10.	111.11	11.11	1.3479
11.	112.36	12.36	1.3494
12.	113.64	13.64	1.3510
13.	114.94	14.94	1.3526
14.	116.28	16.28	1.3541
15.	117.65	17.65	1.3557
16.	119.05	19.05	1.3573
17.	120.48	20.48	1.3590
18.	121.95	21.95	1.3606
19.	123.46	23.46	1.3622
20.	125.00	25.00	1.3639
21.	126.58	26.58	1.3655
22.	128.21	28.21	1.3672
23.	129.87	29.87	1.3689
24.	131.58	31.58	1.3706



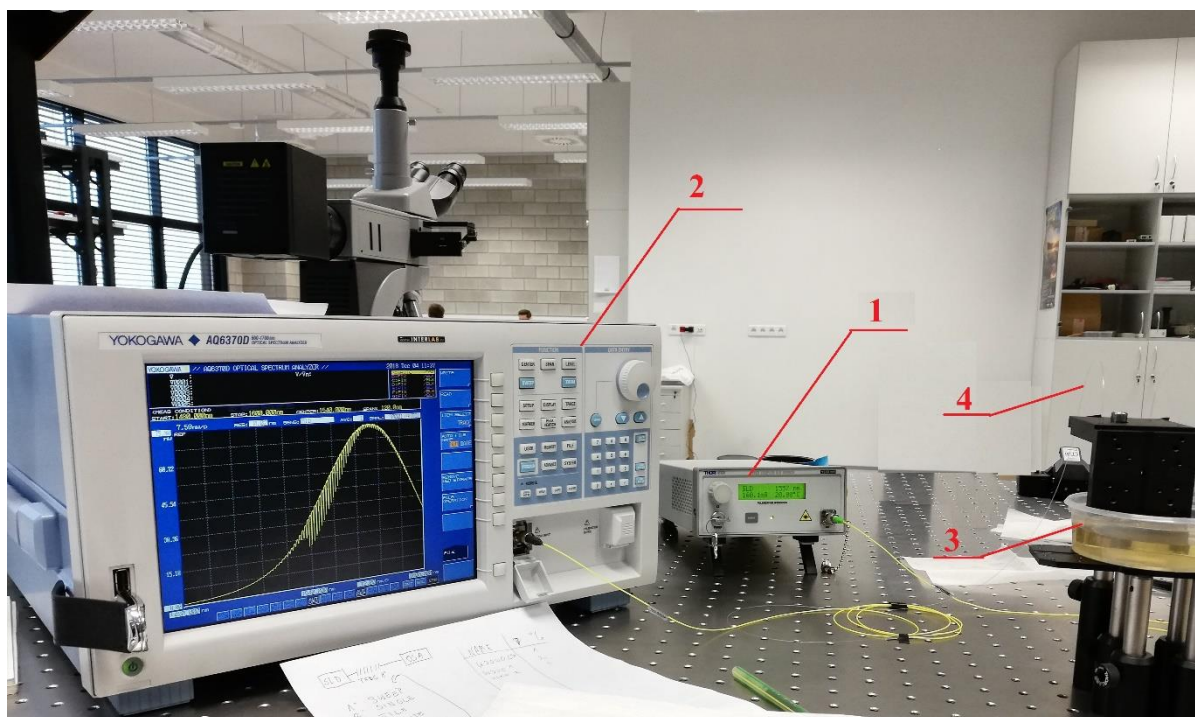
Сурет 14 – Сыну көрсеткіштері әртүрлі етіп алынған ерітінділер

2.3 TFBG спектрлерін тіркейтін эксперименттік қондырғы

Әрі қарай, біз эксперименттік қондырғыны дайындаймыз. Эксперименттік қондырғының жалпыланған жұмыс схемасы сурет 15-те көрсетілген.



Сурет 15 – Эксперименттік қондырғының схемасы: 1) Жарық көзі, 2) СОА-спектрлік оптикалық анализатор, 3) Ерітінді 4) TFBG жазылған оптоталшық [100]



Сурет 16 – Тәжірибелік қондырғының нақты түрі: 1) жарық көзі, 2) спектрлік оптикалық анализатор, 3) ерітінді, 4) TFBG жазылған оптогалшық

Біз жарықты жарық көзінен TFBG бар талшық арқылы өткіземіз және спектрлік оптикалық анализаторда өткізу спектрін аламыз. Алынған спектр сыртқы дискіге жазылады. Жарық көзі ретінде талшықты- оптикалық қосылуы бар ThorLabs fiber Coupled SLD Source (SLD) фирмасының кең жолақты жарық көзі алынды (сурет 17). S5FC сериялы SLD үстел жарық көздерінде SM немесе PM талшықтарына қосылған кең жолақты SLD бар. SLD жоғары дәлдіктегі төмен иішу шығаратын тұрақты ток көзімен жұмыс істейді, ал SLD температурасы TEC ішкі элементімен реттеледі.

Жарық көзінің беттік панеліндегі дисплей және басқару элементтері пайдаланушыға температура және ағымдағы параметрлерін көруге және түзетуге мүмкіндік береді. SLD қосылған кезде дисплей толқын ұзындығын (өлшенбеген), жұмыс қуатын (SLD басқару диодымен есептелген) және нақты SLD температурасын көрсетеді. Жүйенің микроконтроллері қозу тогы мен SLD температурасын белсенді түрде реттейді, сонымен қатар жүйенің ақауларын бақылайды. Микроконтроллерде SLD қуаты мен температурасын қашықтан реттеуге және SLD шығысын қосуға мүмкіндік беретін USB интерфейсі бар. Аналогтық кіріс құрылғының артқы жағында берілген; бұл пайдаланушыға сыртқы сигнал арқылы SOS шығысын модуляциялауға мүмкіндік береді.

Зақымдалған жағдайда, егер аналогтық кіріс пен ішкі қондырғы SLD шегінен асып кетсе, микроконтроллер шығысты өшіреді. Егер қауіпті жағдай орын алса құрылғының артқы жағындағы құлыптауды SLD шығысын өшіру үшін пайдалануға болады. SLD шығысын қосу үшін бұл құлыпты қысқа

тұйықтау керек. Үстелдік жартылай өткізгіш оптикалық күшейткіштің көмегімен шығыс қуатын арттыруға болады.

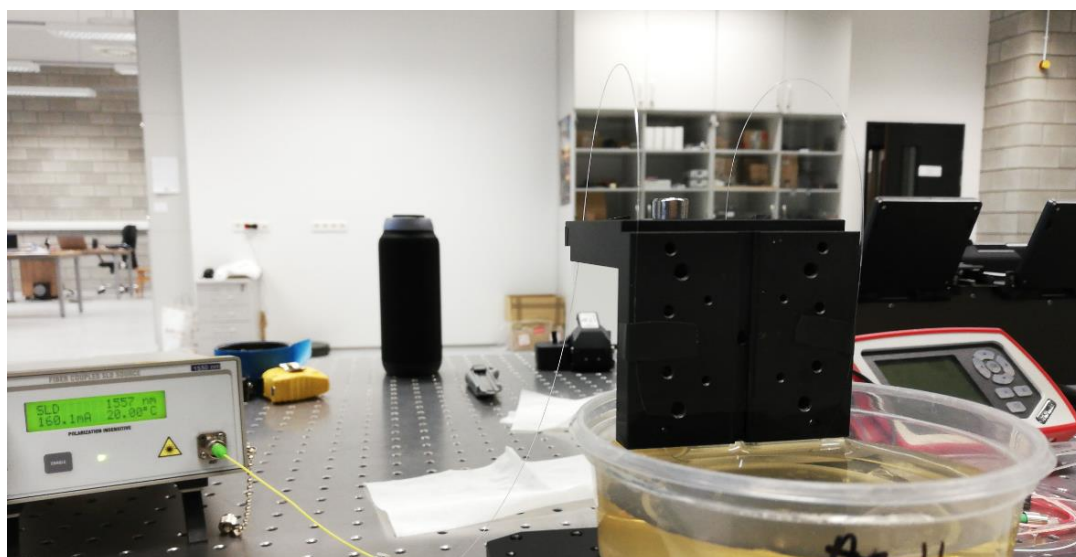


Сурет 17 – Жарық көзі: ThorLabs Fiber Coupled SLD Source

SLD контроллерінің сипаттамалары:

- * Ағымдағы ток орнату рұқсаты 0,1 мА
- * Реттеу ауқымы ~ 0 - толық қуат
- * Шу (типтік, жарық көзіне байланысты) <0,5%
- * Модуляция кірісі 0 – 5В, ток шегіне дейін масштабталған
- * Модуляция жолағының ені 250 кГц
- * Өсу/құлдырау уақыты 1,4 мкс/1,6 мкс
- * Кіріктірілген температураны бақылау жүйесі ТЕС
- * Температураны реттеу диапазоны 20-30 ° С
- * Температура тұрақтылығы <0,01 ° С
- * FC/APC коннектор түрі
- * Кіріс айнымалы тогы 100- 240В айнымалы ток, 50-60Гц
- * Өлшемдері (Ұзындығы-Ені-Биіктігі) 5,8 "-11,4 "-2,6" (146 мм x 290 мм x 66 мм)

Сурет 18-де ерітіндіге батырылған TFBG мысалы келтірілген.



Сурет 18 – Ерітіндіге батырылған TFBG мысалы.

TFBG өткізу спектрлері YOKOGAWA AQ6370D оптикалық анализаторының көмегімен жазылды (сурет 19). YOKOGAWA AQ6370D спектрінің оптикалық анализаторында модификацияның екі түрі бар: стандартты немесе жоғары өнімділік және ажыратымдылық. Бұл анализаторда өлшеу функциялары бар: Температура мен уақыттың тұрақтылығын талдау үшін белгіленген уақыт аралықтары бар деректерді сақтау режимі; спектрден OSNR сигналын алу үшін жақсартылған маркер режимі.

YOKOGAWA AQ6370D жоғары жылдамдықпен өлшеуге мүмкіндік береді, жоғары сенімділік пен өнімділікке ие. AQ6370D моделінде пайдаланушы калибрлеу көзі бар немесе онсыз конфигурацияны таңдай алады. Техникалық сипаттамалар 2-кестеде келтірілген.

Функционалдық ерекшеліктері:

- * Өлшенетін толқын ұзындығының диапазоны: 600-ден 1700 нм-ге дейін.
- * Толқын ұзындығын өлшеу дәлдігі: $\pm 0,01$ нм.
- * Толқын ұзындығы бойынша ажыратымдылық: 0,02 нм.
- * Динамикалық диапазон: 78 дБ.
- * Қуат деңгейінің диапазоны: +20 -дан -90 дБм-ге дейін.
- * Өлшеу жылдамдығы: 0,2 с (100 нм импульс).
- * Бір режимді және көп режимді талшықтармен жұмыс.
- * Жаңа талдау функциялары.

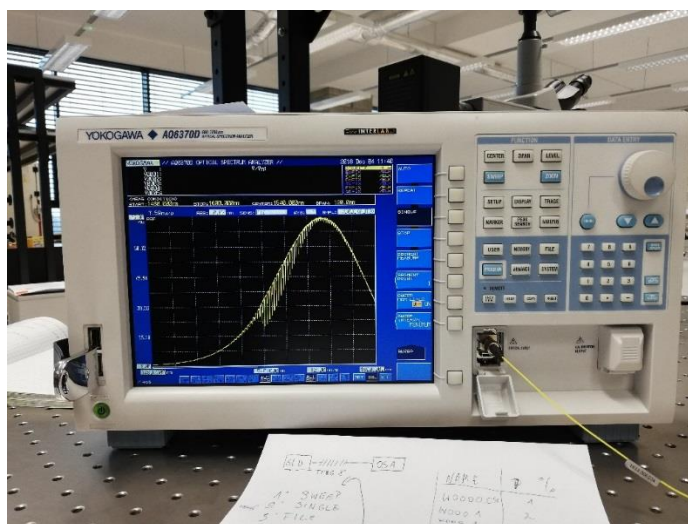
Кесте 2 – YOKOGAWA AQ6370 D спектрлік анализаторының техникалық сипаттамалары

Параметрлер / Модификация	Стандартты (-10)	Жоғары ажыратымдылық (-20)
Қолданылатын оптоалшық	SM (9/125), GI (50/125, 62,5/125)	

Толқын ұзындығын өлшеу диапазоны	600...1700 нм	
Толқын ұзындығы бойынша жайма диапазоны	0,5...1100 нм (толық диапазон), 0 нм	
Толқын ұзындығын өлшеу дәлдігі	$\pm 0,02$ нм (1520...1580 нм); $\pm 0,02$ нм (1580...1620 нм); $\pm 0,04$ нм (1450...1520 нм); $\pm 0,1$ нм (барлық диапазон)	$\pm 0,01$ нм (1520...1580 нм); $\pm 0,02$ нм (1580...1620 нм); $\pm 0,04$ нм (1450...1520 нм); $\pm 0,1$ нм (барлық диапазон)
Толқын ұзындығын өлшеу сызықтығы	$\pm 0,01$ нм (1520...1580 нм); $\pm 0,02$ нм (1450...1520 нм, 1580...1620 нм)	
Толқын ұзындығын өлшеудің қайталануы	$\pm 0,005$ нм (1 мин)	
Спектрограммадағы нүктелер саны	101...50001, AUTO	
Рұқсатты орнату	0,02, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0 нм	
Ажыратымдылықты орнату дәлдігі	$\pm 5\%$ (1450...1620 нм, ажыратымдылық $\geq 0,1$ нм, рұқсатты түзету ON, интервал номері AUTO)	
Минималды ажыратымдылық аралығы	0,001 нм	
Сәулеленудің кіріс қуатының деңгейі бойынша сезімталдық	-90 дБм (1300...1620 нм, сезімталдық — HIGH3); -85 дБм (1000...1300 нм, сезімталдық — HIGH3); -60 дБм (600...1000 нм, сезімталдық — HIGH3)	
Сезімталдық деңгейі	NORM_HOLD, NORM_AUTO, NORMAL, MID, HIGH1, HIGH2 и HIGH3	
Үлкен динамикалық диапазон режимі	SWITCH (Сезімталдық: MID, HIGH1-3)	
Сәулелену қуатын өлшеу қателігі	$\pm 0,4$ дБ (1310/1550 нм, -20 дБм қуат кезінде, сезімталдық: MID, HIGH1, HIGH2, HIGH3)	
Қуатты өлшеу шкаласының сызықтығы	$\pm 0,05$ дБ (кіріс қуаты -50-ден +10 дБм-ге дейін, сезімталдық: HIGH1, HIGH2, HIGH3)	
Толқын ұзындығынан сезімталдықтың өзгеруі	$\pm 0,1$ дБ (1520 - 1580 нм), $\pm 0,2$ дБ (1450-1520 нм, 1580-1620 нм)	
Максималды кіріс қуаты	+20 дБм (бір арна, барлық диапазон)	

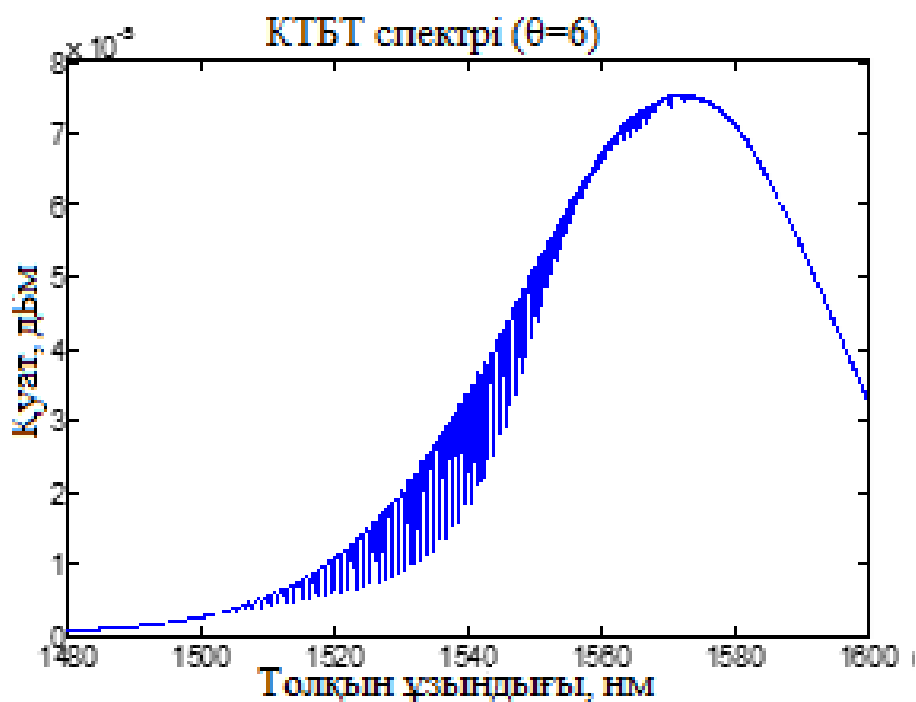
Максималды қауіпсіз кіріс қуаты	+25 дБм (толық кіріс қуаты)		
Сәулеленудің поляризациясына сезімталдық	± 0,05 дБ (1550/1600 нм); ± 0,08 дБ (1310 нм)		
Толқын ұзындығы бойынша сканерлеу уақыты	NORM_AUTO: 0.2 с, NORMAL: 1 с, MID: 2 с, HIGH1: 5 с, HIGH2: 20 с, HIGH3: 75 с		
Динамикалық диапазон	Рұқсат 0,02 нм	55 дБ (пик±0,2 нм); 37 дБ (пик ±0,1 нм)	58 дБ (пик±0,2 нм, тип. * 60 дБ); 45 дБ (пик±0,1 нм, тип. 50 дБ)
	Рұқсат 0,05 нм	73 дБ (пик±1,0 нм); 62 дБ (пик±0,4 нм); 45 дБ (пик±0,2 нм)	73 дБ (пик±1,0 нм, тип. 78 дБ); 64 дБ (пик±0,4 нм, тип. 70 дБ); 50 дБ (пик±0,2 нм, тип. 55 дБ)
	Рұқсат 0,1 нм	57 дБ (пик±0,4 нм) 40 дБ (пик±0,2 нм)	60 дБ (пик±0,4 нм, тип. 67 дБ) 45 дБ (пик±0,2 нм, тип. 50 дБ)
Кіріс коннекторынан кері шағылысу деңгейі	типтік-35 дБ (APC разъемы бар)		
Нәтижелерді сақтау	Ішкі жады	64 спектрге дейін, 64 программа	
	Сыртқы жады	USB интерфейсі бар сыртқы дискілер (HDD/flash disk), FAT32 формат	
	Ішкі жады көлемі	20000 нан астам өлшеу нәтижелерін сақтау үшін 512 Мб	
	Файл форматтары	CSV (текст.)/бинарлы, BMP, TIFF	
Деректерді талдау	Спектрлік жолақтардың енін анықтау; оптикалық құрылғыларды сынау-лазерлік диодтар, оптикалық лазерлер, оптикалық күшейткіштер, оптикалық трансиверлер; пассивті оптикалық құрылғыларды сынау: / FBG / AEG / WS / ROADM / оптикалық талшық сүзгілері; DWDM, CWDM жабдықтарын сынау; WDM сигнал пішінін талдау (OSNR); WDM-NF сүзгілерінің спектрлік талдауы; EDFA күшейткіштерінің спектрлік талдауы; оптикалық сүзгілерді спектрлік талдау, DFBLD спектрлік талдау		

	сәулелену көздері; FOLD сәулелену көздерінің спектрлік талдауы, LED сәулелену көздерінің спектрлік талдауы, SSR талдауы; сәулелену қуатын талдау; автоматты режим; көлденең маркер сызықтары арасындағы деректерді талдау; спектрдің бөлінген аймағындағы деректерді талдау; қолданбалы фотоника жабдықтары
Оптикалық қосқыштар	Оптикалық кіріс: әмбебап FC AQ9447 адаптері; кірістірілген сәулелену көзінің оптикалық шығысы: әмбебап FC AQ9441 адаптері; қосымша SC немесе ST типті қосқыштар
Кірістірілген калибрлеу көзі	Анықтамалық толқын ұзындығы көзі (толқын ұзындығын реттеу және калибрлеу үшін)
Жылыту уақыты	Кем дегенде 1 сағат (кірістірілген сәулелену көзімен өзін-өзі түзеткеннен кейін)
Сыртқы құрылғылар	GP-IB x 2 порт; RS-232; Ethernet; USB; PS/2 (пернетақта); SVGA шығыс; Аналогты шығыс; TTL кіріс/шығыс
Қашықтан басқару интерфейстері	GP-IB; RS-232; Ethernet(TCP/IP); IEEE488.1 и IEEE488.2 стандарттарын қолдау
Дисплей	10,4" СКД түрлі түсті, ажыратымдылығы 800 × 600 нүкте
Өлшемдері	425 × 222 × 450 мм
Салмағы	19,0 кг
Электрмен жабдықтау	100–240 В, 50/60 Гц
Пайдалану және сақтау шарттары	Өлшеу үшін тамаша температура: +18-ден +28 °С-қа дейін; жұмыс температурасы: +5-тен +35 °С-қа дейін; сақтау температурасы: -10-дан +50 °С-қа дейін; ылғалдылығы 80% аспайтын жағдайда (конденсациясыз)

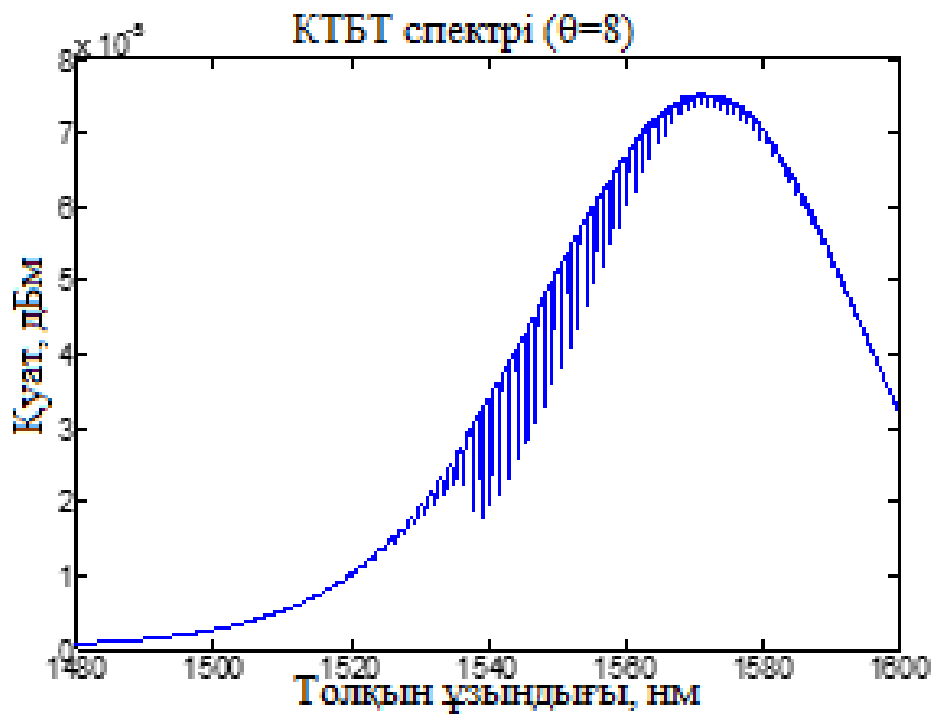


Сурет 19 – YOKOGAWA AQ6370D фирмасының оптикалық анализаторы

1.3344-тен 1.3557-ге дейінгі сыну көрсеткіштері үшін көлбеу бұрыштары 6° және 8° TFBG үшін спектрлік анализатор 1480 нм-ден 1600 нм-ге дейінгі толқын ұзындығы диапазонына, ал 1.3573-тен 1.3706-ға дейінгі сыну көрсеткіштері үшін 1500 нм-ден 1580 нм-ге дейінгі толқын ұзындығы диапазонына орнатылды. Сыну көрсеткішінің $n=1.3344$ кезіндегі мәні үшін үшін алынған нормаланбаған спектрлердің мысалы 20-21 суреттерде келтірілген. Қалған сыну көрсеткіштерінің мәндері үшін алынған нормаланбаған спектрлерді қосымша 2-ден көруге болады.



Сурет 20 – $n=1.3344$ кезінде көлбеу бұрышы 6° болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі



Сурет 21 – $n=1.3344$ кезінде көлбеу бұрышы 8° болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

3 ТӘЖІРБИЕЛІК ЗЕРТТЕУДІҢ ӨЛШЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Көлбеу талшықты Брэгг торлары бар сенсорларды қолданып ортаның сыну көрсеткішінің өзгерісін өлшеу процесі TFBG белгілі бір параметрлерінің сыну көрсеткішімен корреляциясына байланысты. Ол үшін калибрлеу жүргізіп, спектрден алынған сипаттама мен сыну көрсеткіші арасындағы байланысты анықтайды. Өткен бөлімде жасалған әдеби шолуға негізделе отырып спектрді демодуляциялаудың келесідей әдістерін атап өтуге болады:

- Қабықшаның жеке модаларының толқын ұзындықтарының ығысуын анықтау;

- Қабықша модаларының кесу ұзындықтарын анықтау;

- Қабықша модаларының диапазонында өткізу спектрінің өзгеретін параметрлерін анықтау [69]. Қабықшаның жеке модаларының толқын ұзындықтарының ығысуын анықтау тек тар өткізу жолағына қолданылады. Сыну көрсеткіші мен толқын ұзындығының ығысуы арасындағы тәуелділік бейсызық сипатқа ие, және модалар жойылғанша сыну көрсеткішіне сезімталдық ұлғаяды. Бір мезгілде негізгі Брэгг резонансының ығысуын қадағалау арқылы жоғарыда аталған әдісте температураға сезбеушілікке қол жеткізуге болады. Қабықша модаларының ығысуы мен активті аумақтың модаларының ығысуы бір температуралық мәнге ие деп болжауға болады. Бұл әдіс көпмодалы көлбеу талшықты Брэгг торларының өткізу толқын ұзындықтарының ығысуын бағалау арқылы сыну көрсеткішін анықтауда қолданылады.

Сыну көрсеткішінің аз мәнге өзгерісі қабықша модасының толқын ұзындығының орналасуын аз мәнге ғана ығыстырады. Себебі, ауытқуға жақын мода қоршаған ортаға тереңірек таралады. Сыну көрсеткішінің өзгерісіне жоғары сезімталдықты алу үшін сол ауытқуға жақын моданы таңдау керек. Алайда, сыну көрсеткіші мен толқын ұзындығының орналасуы арасындағы бейсызық байланыстың жоғары болуы көп калибрлеу нүктесін қажет етеді. Алдыңғы екі әдісті күрделі деп атауға болады, себебі олар қабықша модасының бүкіл спектрлік диапазонын қолданады да, қарастырылатын тордың ең кең сыну көрсеткішінің диапазонын анықтай алады.

Қабықша модасының өткізу спектрінің диапазонындағы өзгерістер сыну көрсеткішінің мәнін көрсете алады. Ол өзгерістер көлбеу талшықты Брэгг торы арқылы өткен жарықтың қуаты бойынша өлшенеді. Сонымен қатар, жарық көзінің қуаты эталон ретінде өлшенуі мүмкін. Өткізу немесе шағылу спектрлерін өлшеуге негізделген әдістер жарық көзінің аз ғана өзгерісіне де сезімтал. Сонымен қатар, оптикалық талшықтың орналасуы да қосымша қателіктерді тудыруы мүмкін. Сыну көрсеткішімен корреляцияланатын параметр көлбеу талшықты Брэгг торының орташа квадраттық ауытқуын бағалау болып табылады, ол келесі теңдеу арқылы анықталады [69]:

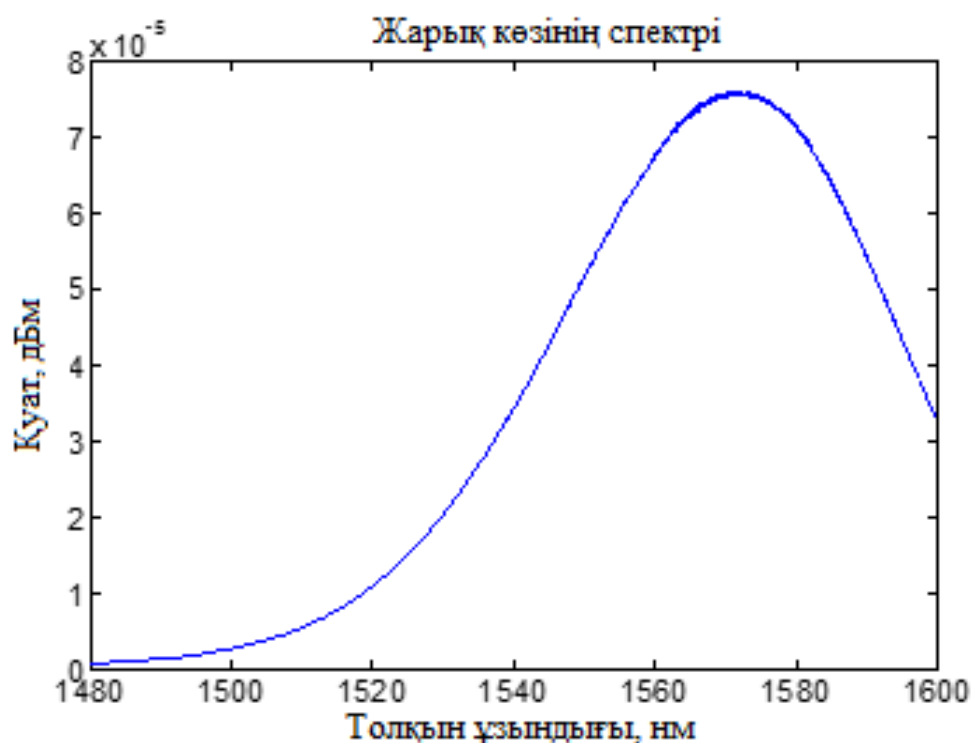
$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T}_i)^2} \quad (7)$$

Дәстүрлі бағалаудан ерекшелігі, бұл жердегі T_i – орта мәні емес, Савицки-Голей әдісін қолдану арқылы тегістелген спектрлер. Сәйкесінше бұл мән таратудың бүкіл спектріндегі орта мән болып табылмайды, яғни қабықша пиктерін ескермейтін жергілікті мән.

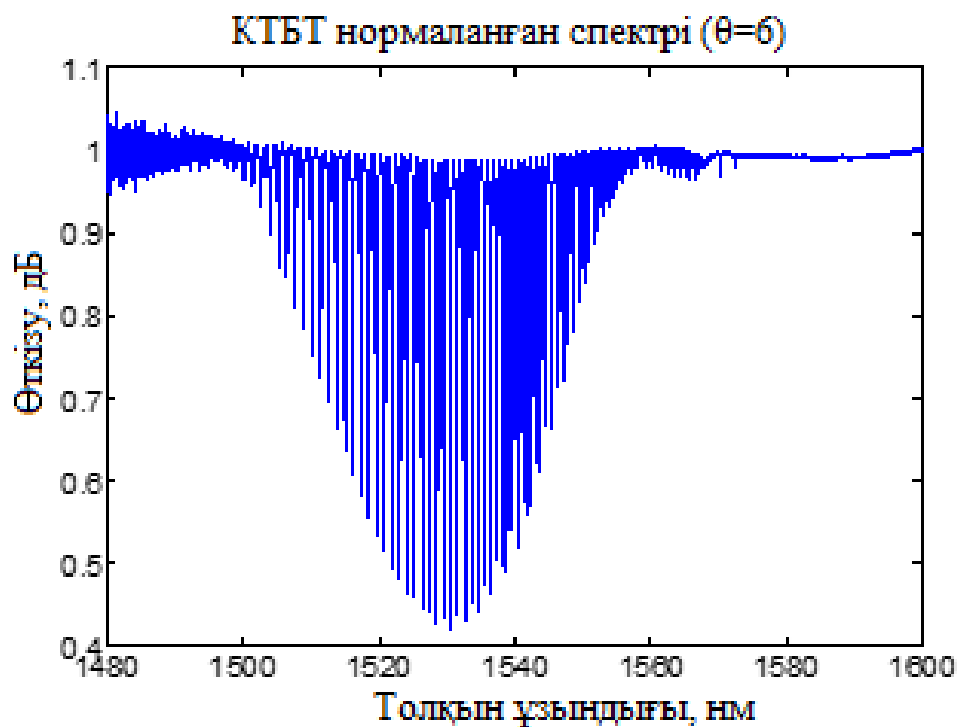
Алынған спектрлердің тегістелген сипаттамасын анықтап, оның сыну көрсеткішіне тәуелділігінің сызықтылық деңгейі (7) теңдеуі бойынша 15,7% құрады. Диссертациялық жұмыста [69] жұмыста келтірілген зерттеу әдісінде алынған спектрге жүргізілген есептеулерді қолдана отырып, сыну көрсеткішіне сызықты тәуелділікке ие спектрлік сипаттаманы анықтау жұмыстары жүргізілді.

3.1 Эксперимент нәтижесінде алынған спектрлерді нормалау

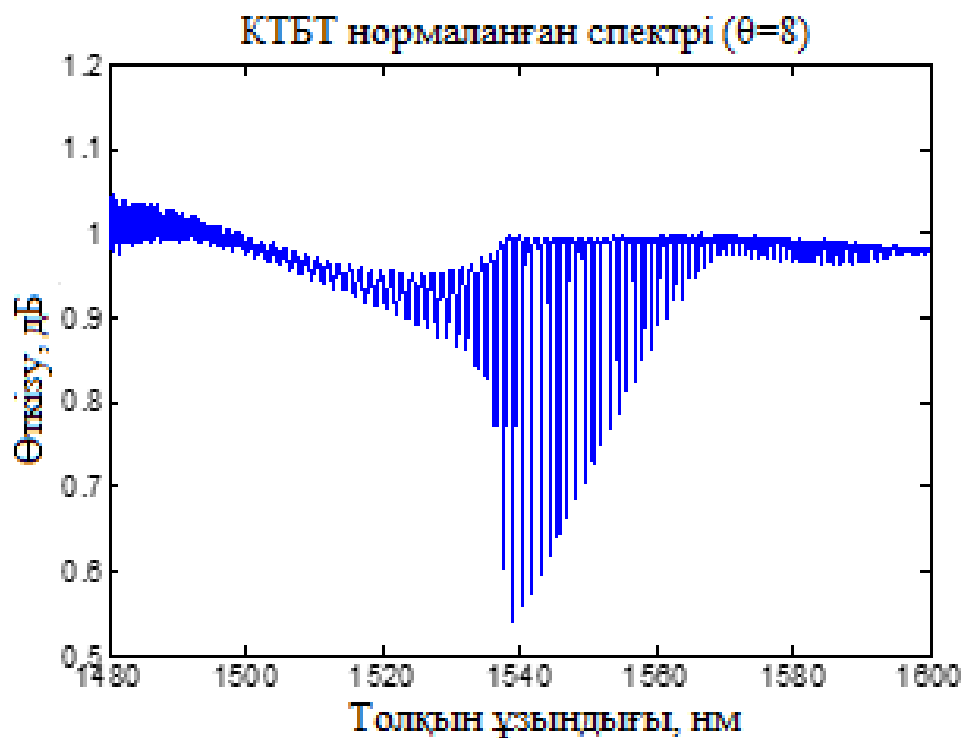
Жоғарыда келтірілген зерттеу әдісін қолдана отырып, келесідей міндет қойылды: міндеті TFBG өткізу спектрінің сипаттамаларының ортаның сыну көрсеткіштеріне тәуелділігін табу. Ең алдымен экспериментте алынған нормаланбаған спектрлерге (сурет 20-21) нормалау жүргіземіз. Нормаланған графиктер TFBG арқылы өткен жарық спектрлерінің жарық көзінің спектріне (сурет 22) қатынасы арқылы алынды. Нормаланған спектрлердің мысалы 23-24 суреттерде келтірілген. Сыну көрсеткішінің басқа мәндері үшін алынған нормаланған спектрлер қосымша 3-те келтірілген.



Сурет 22 – Жарық көзінің спектрі



Сурет 23 – $n=1.3344$ кезінде көлбеу бұрышы 6° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі



Сурет 24 – $n=1.3344$ кезінде көлбеу бұрышы 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

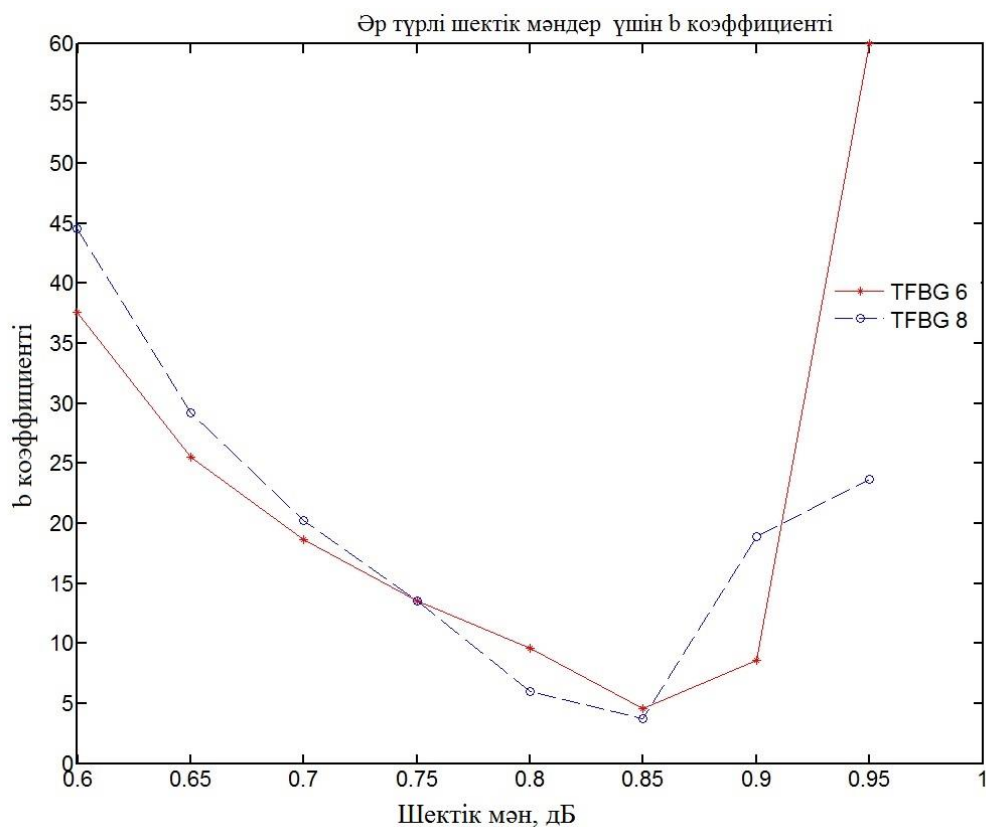
Сурет 23-24, 103-125 жоғарғы ретті модалардың таралу қарқындылығы сын көрсеткіші артқан сайын төмендейтінін байқауға болады. Әсіресе қабықша модаларының амплитудасы қысқа толқын ұзындықтары үшін бірінші болып кемиді. Төменгі ретті модалардың тарату қарқындылығы сыну көрсеткіші белгілі бір мәнге жеткенге өзгremeйді. Әр резонанс үшін модалар оптогалшықтан шығатын және оның қарқындылығы спектрде көрінбейтін сыну көрсеткішінің мәні болады. Нәтижесінде, өткізу спектрі тегістелген болады және қабықша модасында көрінетін пиктер болмайды. Толқын ұзындығының белгілі бір мәнінде модалар қабықша мен қоршаған орта арасында таралмайды және оны бөлу толқын ұзындығы деп атайды. Бөлу шегіндегі модалар ұзын толқын ұзындықтарына қарай күрт ығысады және қарқындылығы төмендейді.

Қабықшаның модаларының пиктері спектрде біркелкі таралмаған. Бұл моданың таралуымен байланысты спектрдегі әр резонанс тиімді сыну көрсеткішіне тәуелді. Сыну көрсеткішінің артуы әр қабықша модасының үлкен толқын ұзындықтарына қарай ығысуын тудырады. Яғни, моданың қоршаған ортаға терең таралуына сыну көрсеткішінің артуы себеп болады.

3.2 TFBG өткізу спектрі сипаттамаларының ортаның сыну көрсеткіштеріне тәуелділігін табу

Эксперименттік зерттеудің негізгі міндеті- TFBG өткізу спектрінің сипаттамаларының ортаның сыну көрсеткіштеріне тәуелділігін табу. Осы мақсатта әртүрлі сипаттамаларды қарастыруға болады. Мысалы, [1] жұмыста эксперименттік деректерді өңдеу кезінде өткізу спектрінің қуатының сыну көрсеткішіне тәуелділігі қарастырылады. Біздің жұмысымызда басқа тәуелділіктерді қарастырдық: өткізу спектрінің ені $\Delta\lambda$ және өткізу спектрінің минимумының ерітіндінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі.

Ең алдымен сенсорлық сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткіштерінен тәуелділігін қарастырайық. Сенсорлық сенсорлық спектр енінің мәндерін анықтау үшін нормаланған өткізу спектрлерінде тарату коэффициентінің шектік мәнін береміз. 0,6-0,95 дБ аралығында шектік мәндерді бергенде сызықтылық тек 0,85 дБ мәнін де өте жоғары болды (сурет 25).



Сурет 25 – Сенсорлық спектр енінің мәндерін анықтауда әр түрлі шектік мәндер үшін b коэффициентінің мәндері

Ең кіші квадраттар әдісі $y=a+bx$ функциясы түрінде сызықтық тәуелділікті іздейтін таңдамалы деректер бойынша белгісіз регрессиялық модель параметрлерін бағалаудың негізгі регрессиялық талдау әдістерінің бірі болып табылады.

Мәселе

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (bx_i + a))^2 \quad (8)$$

формуласы ең кіші мәнге ие болатындай екі a және b айнымалыларының функциясы болатын сызықтық тәуелділік коэффициенттерін табу болып табылады. Яғни, a және b деректерінде эксперименттік деректердің табылған түзуден ауытқу квадраттарының қосындысы ең аз болады. Бұл ең кіші квадраттар әдісінің мәні.

Екі белгісіз шамасы бар екі теңдеудің жүйесі құрастырылады және шешіледі. a және b айнымалылары бойынша (8) функциясының туындыларын табамыз, бұл туындыларды нөлге теңестіреміз.

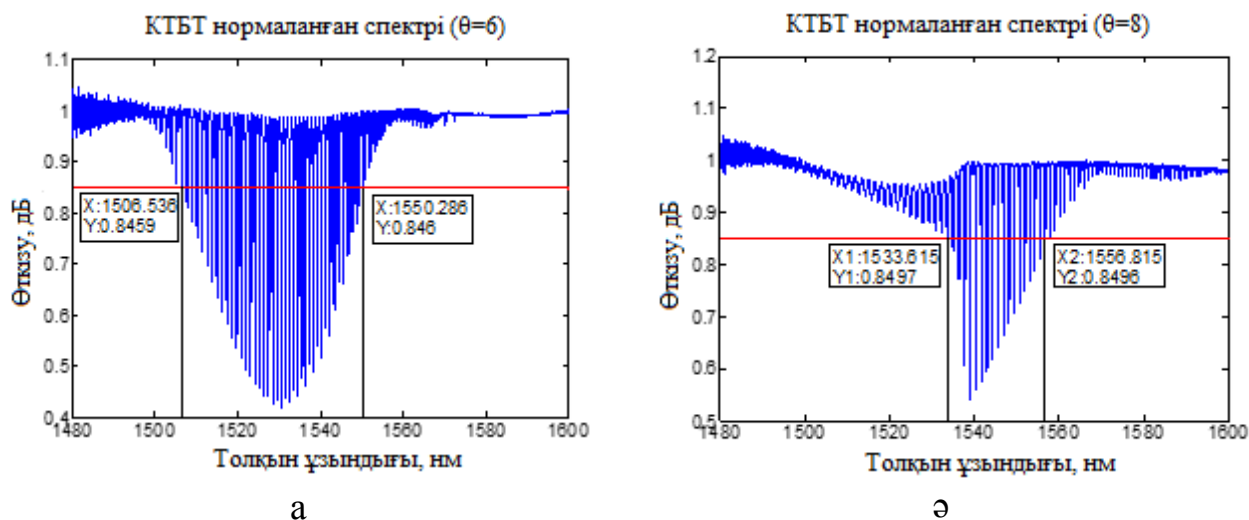
$$\begin{cases} \frac{\partial F(a,b)}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial F(a,b)}{\partial b} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))x_i = 0 \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) = 0 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n b = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (9)$$

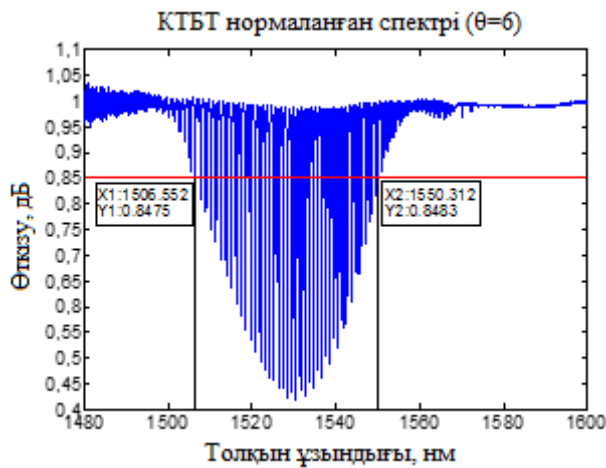
Біз алынған теңдеулер жүйесін кез-келген әдіспен шешеміз және коэффициенттерді ең кіші квадраттар әдісі бойынша табудың формулаларын аламыз. Осылайша, шешім екі айнымалы функцияның экстремумын табуға дейін азаяды.

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{cases} \quad (10)$$

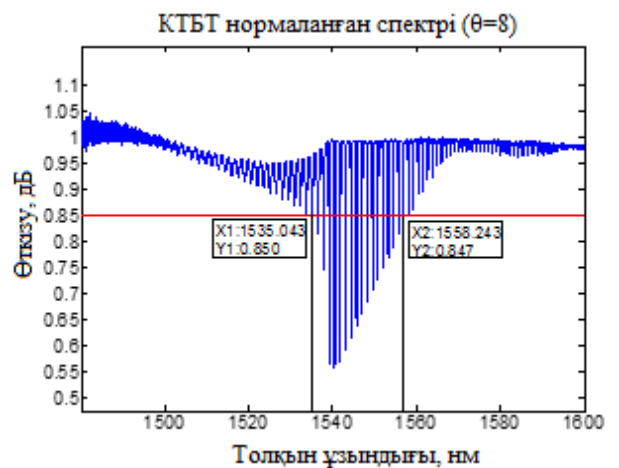
Суреттер 26-49-да 0,85 дБ шектік мәнінен сенсорлық сенсорлық спектр енін анықтау әдісі көрсетілген. Осы мәннен x осіне параллель түзу жүргіземіз (қызыл сызық). Одан кейін түзудің спектрмен қиылысқан жерінен бастапқы және соңғы нүктелерін белгілейміз. Сол нүктелерден x осіне тік сызықтар (қара сызықтар) жүргіземіз. x осі бойынша алынған бастапқы және соңғы нүктелердің айырымы бізге сенсорлық сенсорлық спектр енінің мәнін береді, ол нанометрмен өлшенеді. Мысалы, сурет 25, а-дан 6° көлбеу бұрышты TFBG үшін спектрдің ені $\Delta\lambda = x_2 - x_1 = 1550,286 - 1506,536 = 43,75$ нм, ал 8° үшін спектрдің ені $\Delta\lambda = x_2 - x_1 = 1556,815 - 1533,615 = 23,23$ нм.



Сурет 26 – $n=1.3344$ кезінде TFBG үшін сенсорлық сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=43,75$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=23,23$ нм

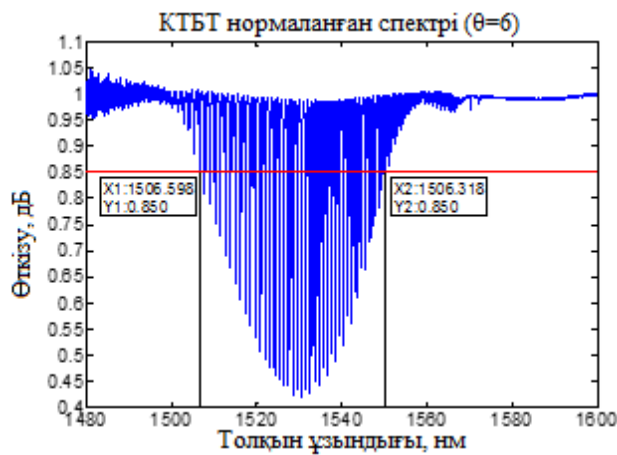


а

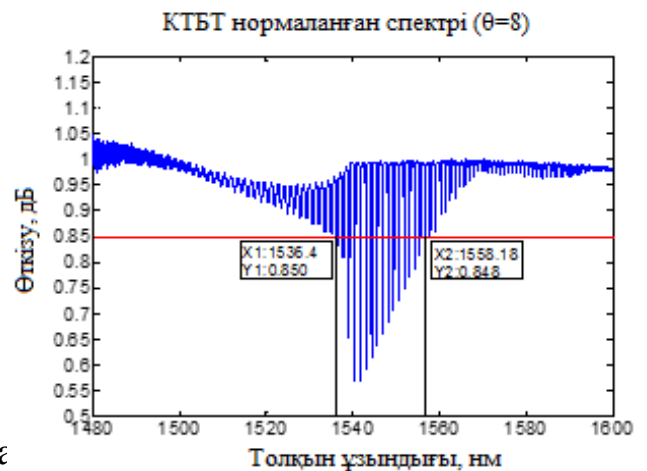


ә

Сурет 27 – $n=1.3359$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=43,76$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=23,2$ нм

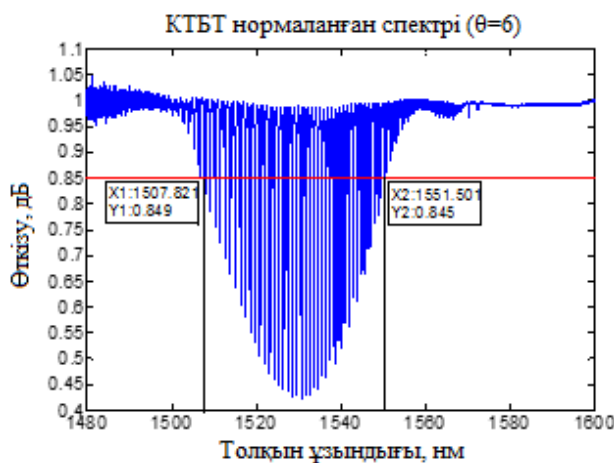


ә

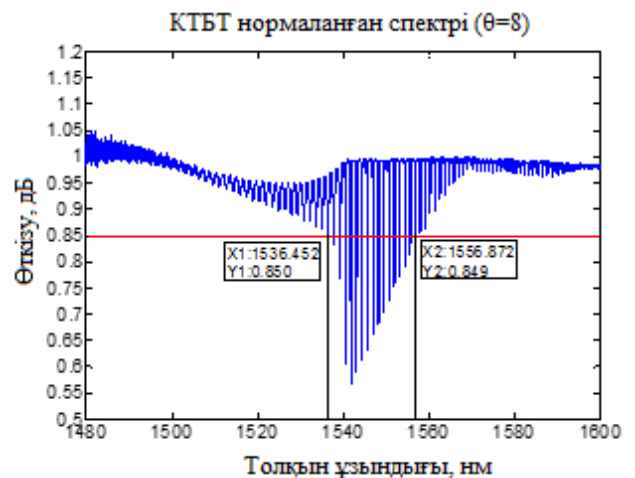


ә

Сурет 28 – $n=1.3374$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=43,73$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=21,78$ нм

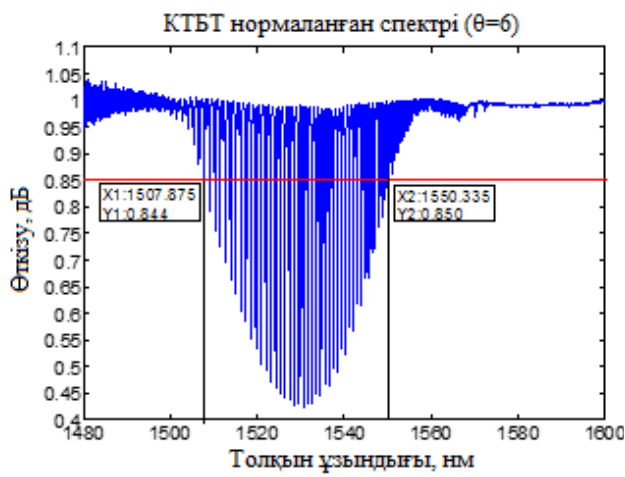


а

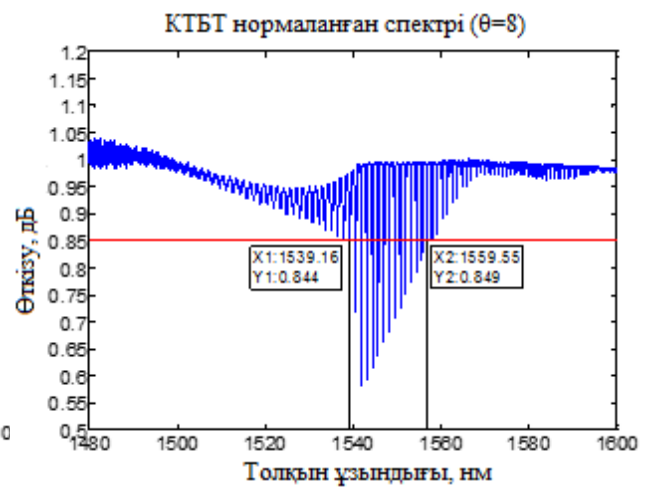


ә

Сурет 29 – $n=1.3388$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=43,68$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=20,42$ нм

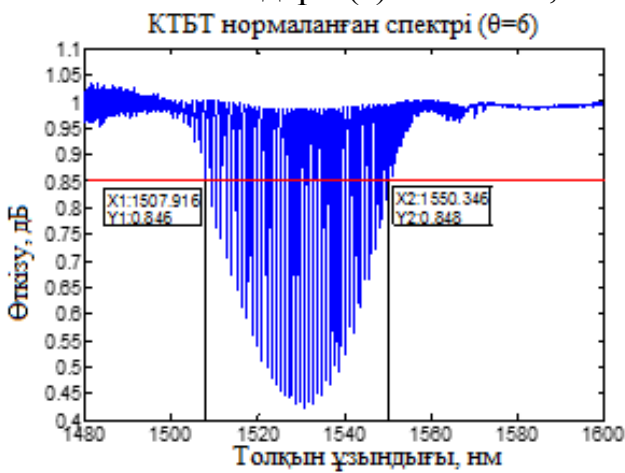


а

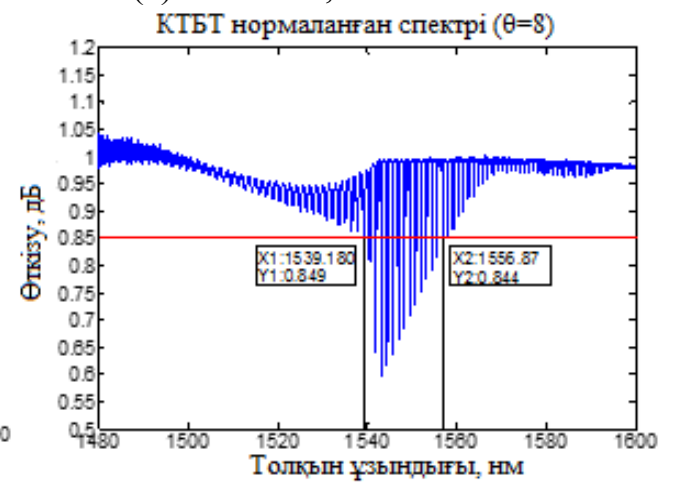


б

Сурет 30 – $n=1.3403$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=42,46$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=20,39$ нм

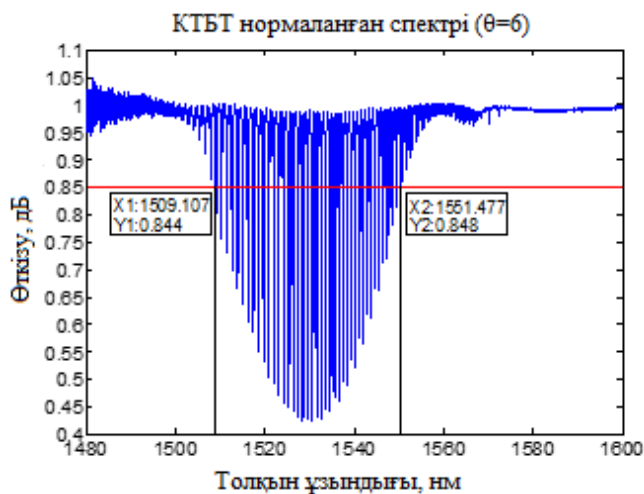


а

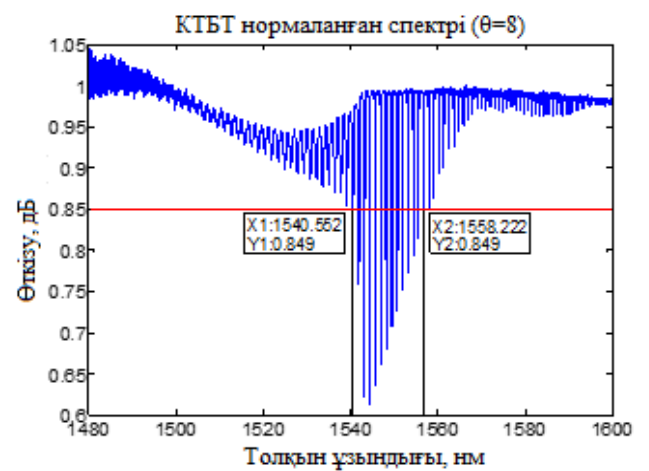


б

Сурет 31 – $n=1.3418$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=42,43$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=17,69$ нм

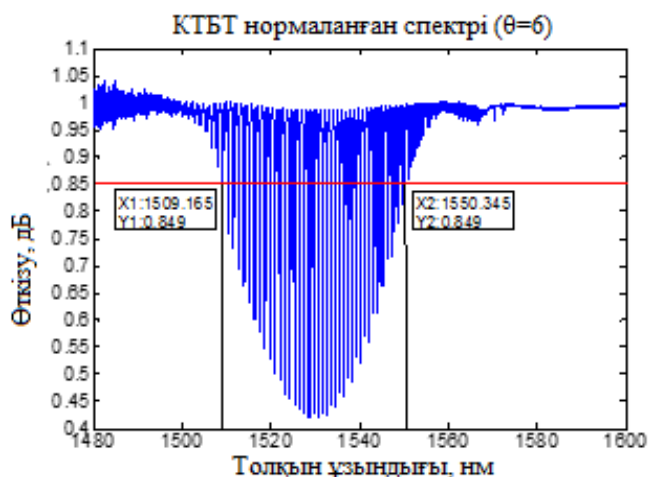


а

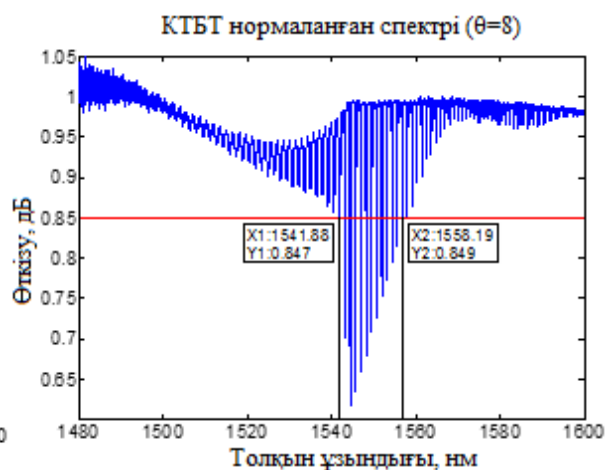


б

Сурет 32 – $n=1.3433$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=42,37$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=17,67$ нм

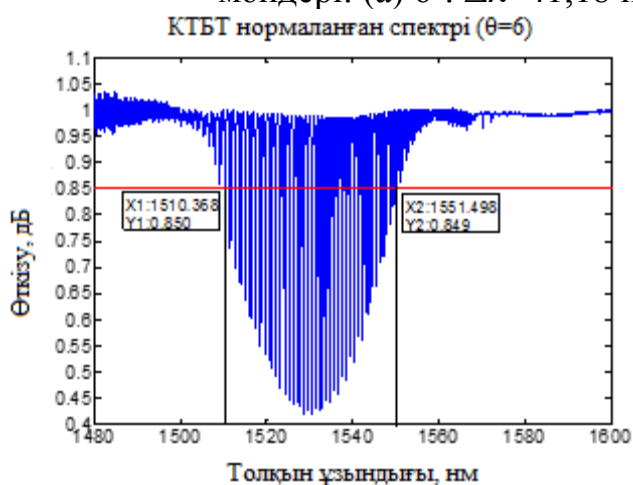


а

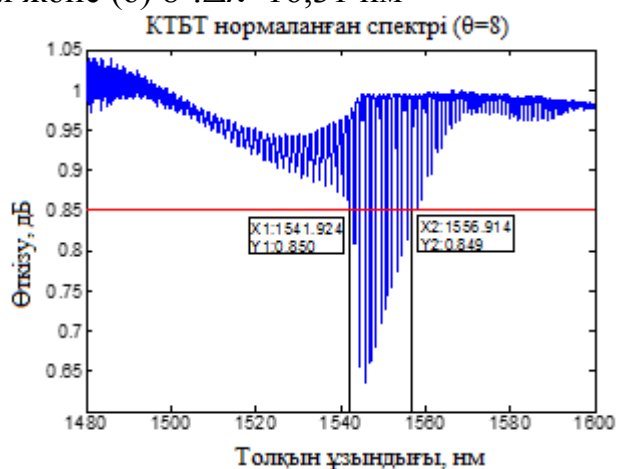


б

Сурет 33 – $n=1.3448$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=41,18$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=16,31$ нм

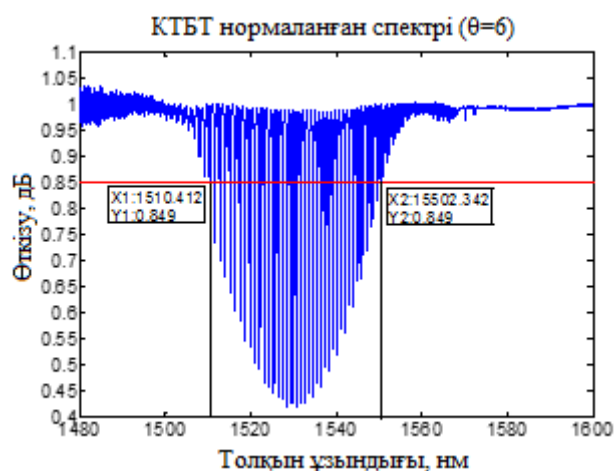


а

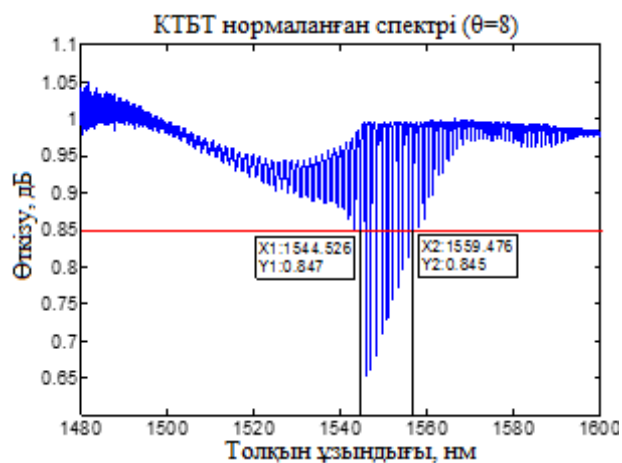


б

Сурет 34 – $n=1.3464$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=41,13$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=14,99$ нм

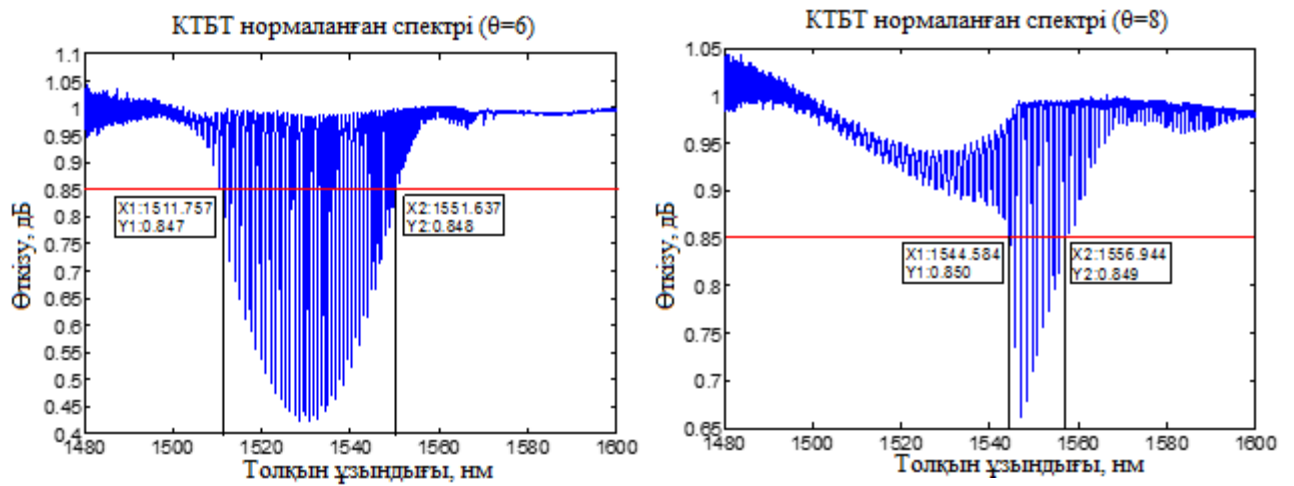


а



б

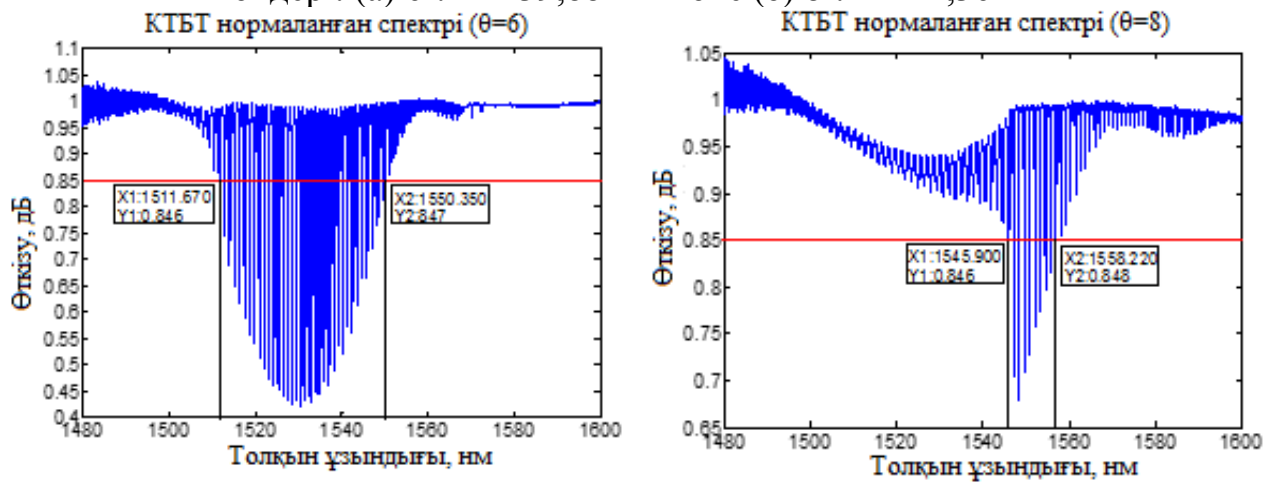
Сурет 35 – $n=1.3479$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=39,93$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=14,95$ нм



а

ә

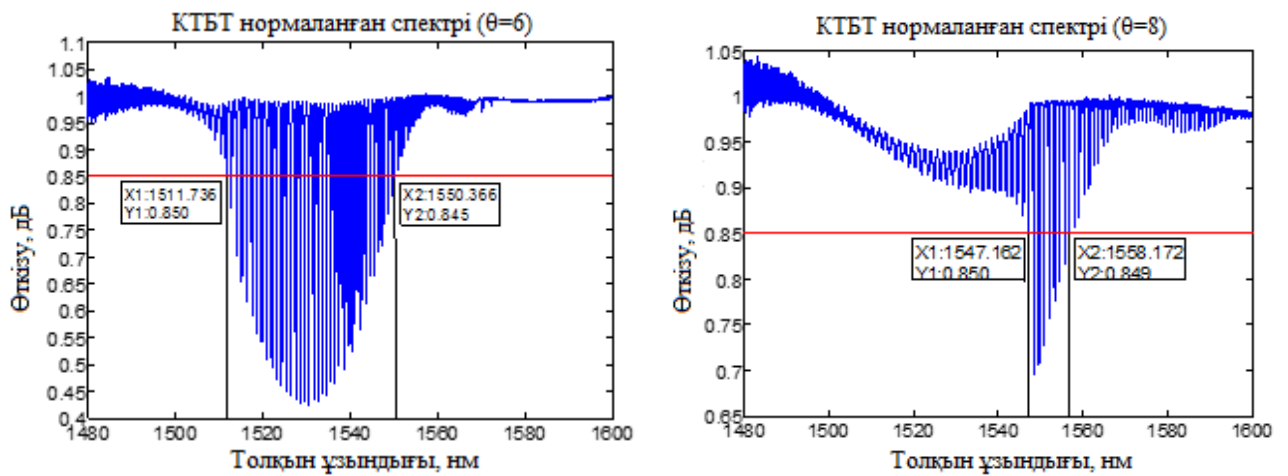
Сурет 36 – $n=1.3494$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=39,88$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=12,36$ нм



а

ә

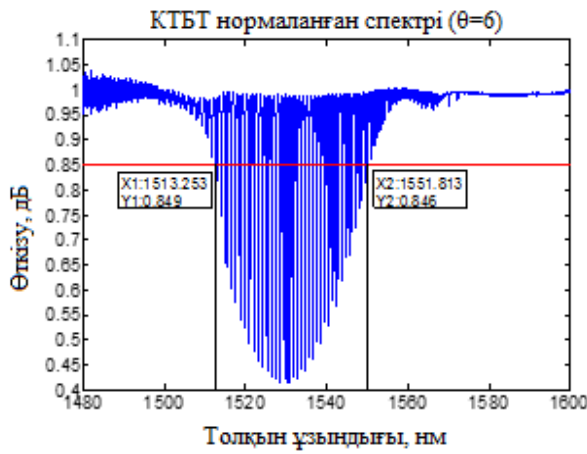
Сурет 37 – $n=1.3510$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=38,68$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=12,36$ нм



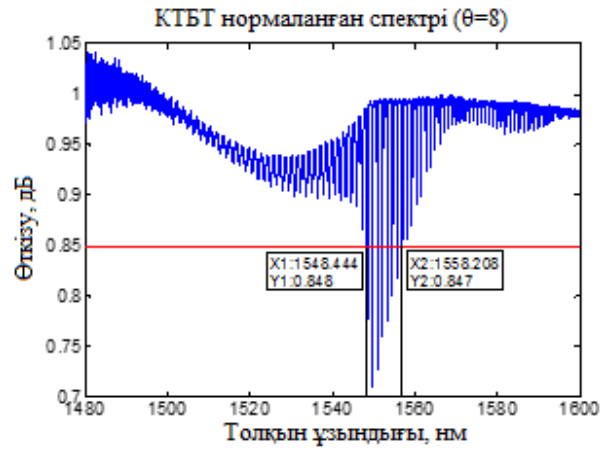
а

ә

Сурет 38 – $n=1.3526$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=38.63$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=11,01$ нм

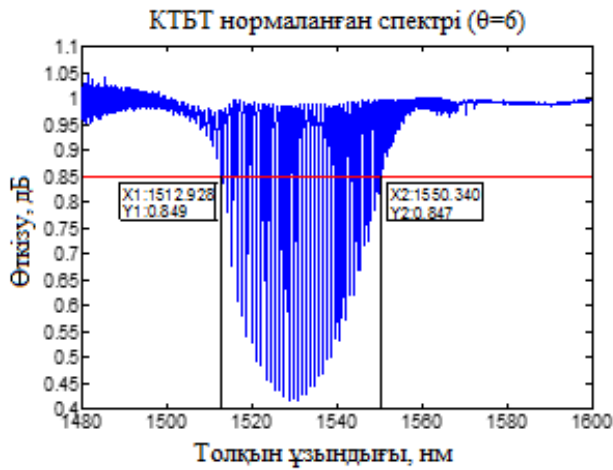


а

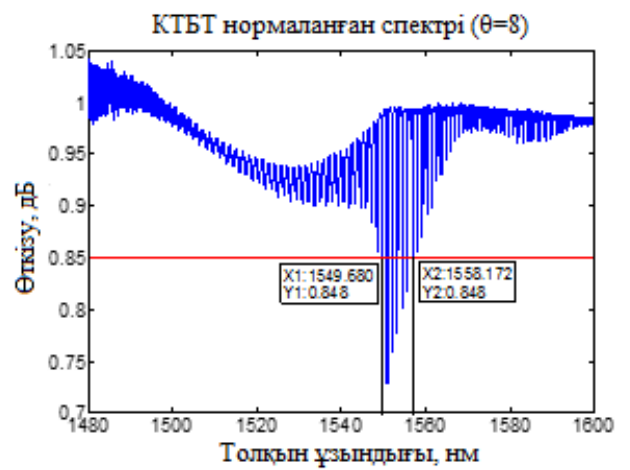


ә

Сурет 39 – $n=1.3541$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=38,56$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=9,764$ нм

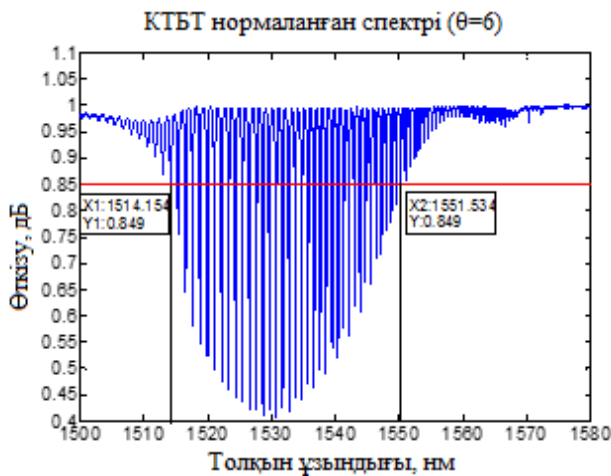


а

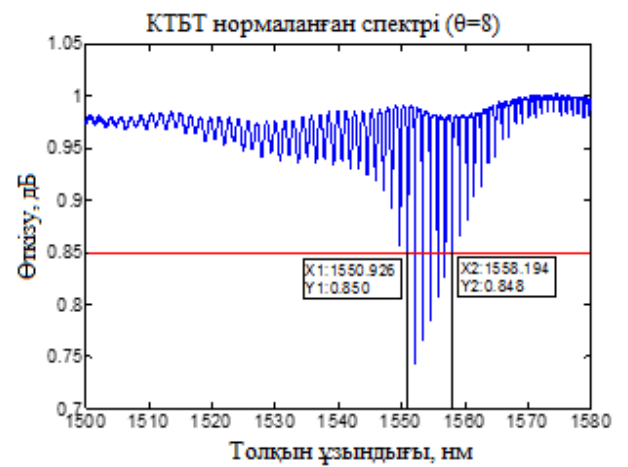


ә

Сурет 40 – $n=1.3557$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=37,412$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=8,492$ нм

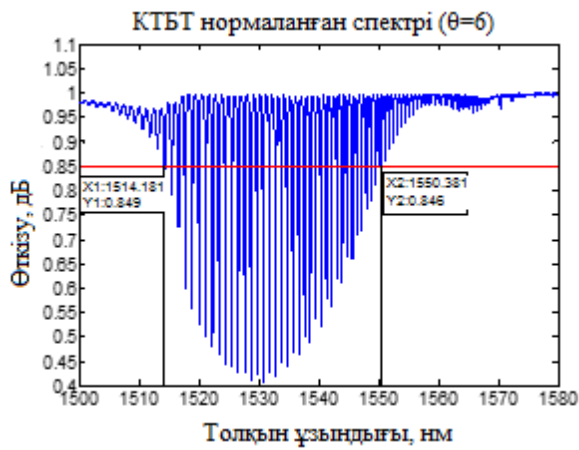


а

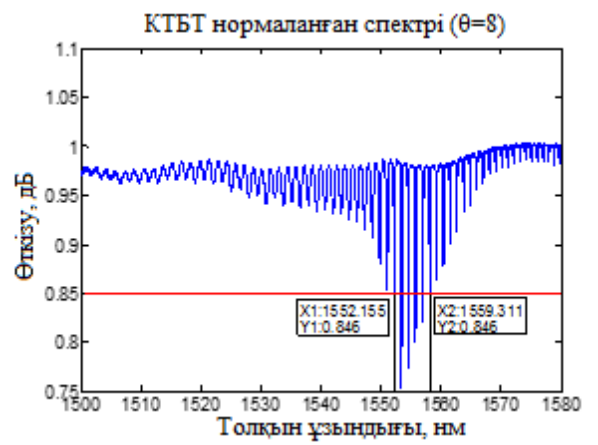


ә

Сурет 41 – $n=1,3573$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=37,38$ нм және (ә) 8° : $\Delta\lambda=7,268$ нм

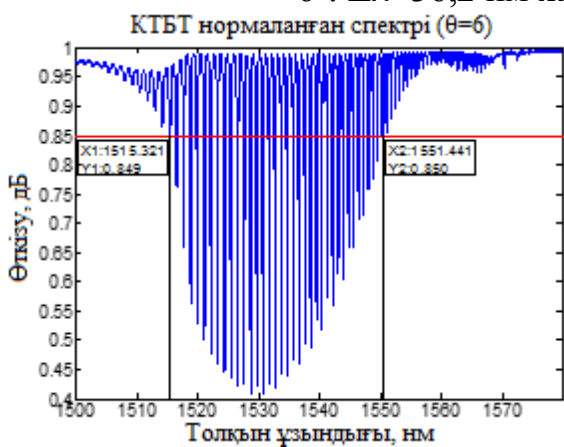


а

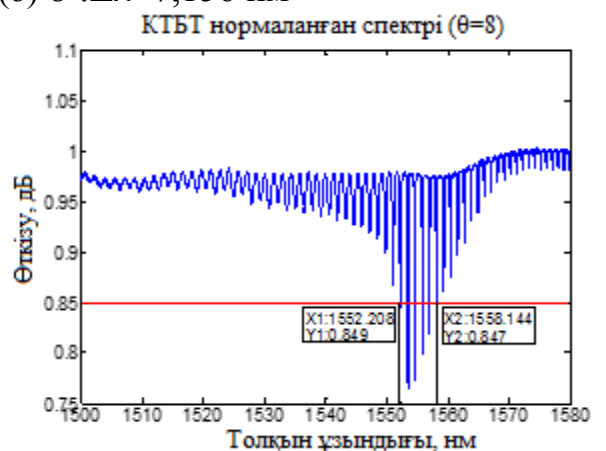


ә

Сурет 42 – $n=1,3590$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=36,2$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=7,156$ нм

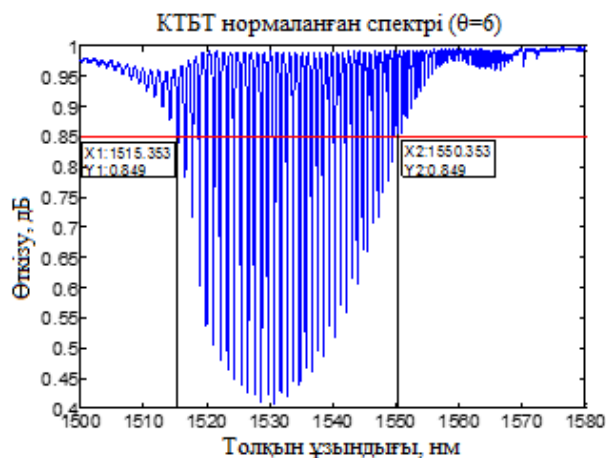


а

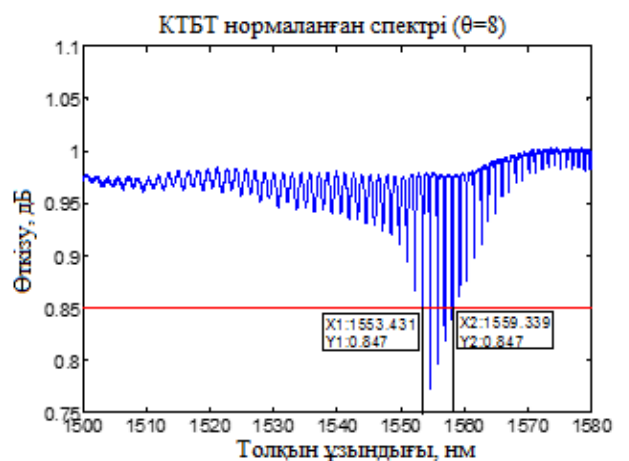


ә

Сурет 43 – $n=1,3606$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=36,12$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=5,936$ нм

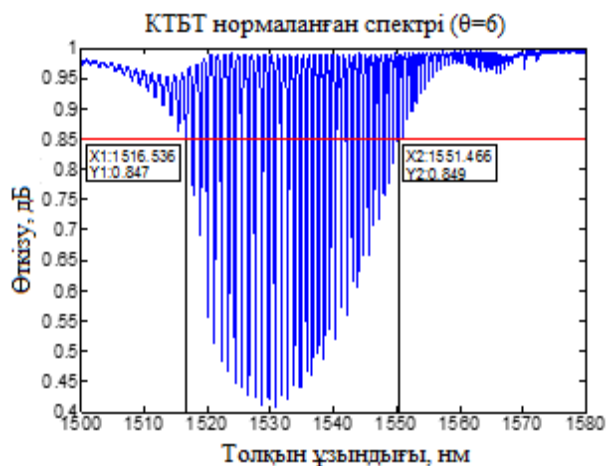


а

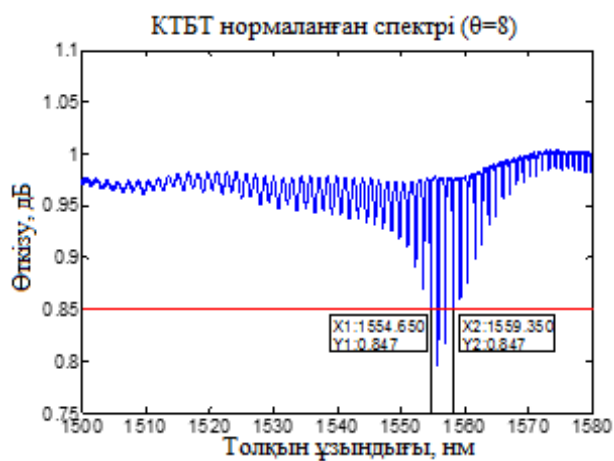


ә

Сурет 44 – $n=1,3622$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=35$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=5,908$ нм

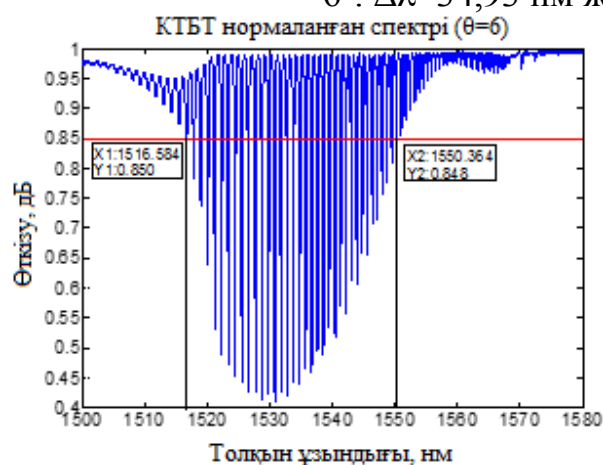


а

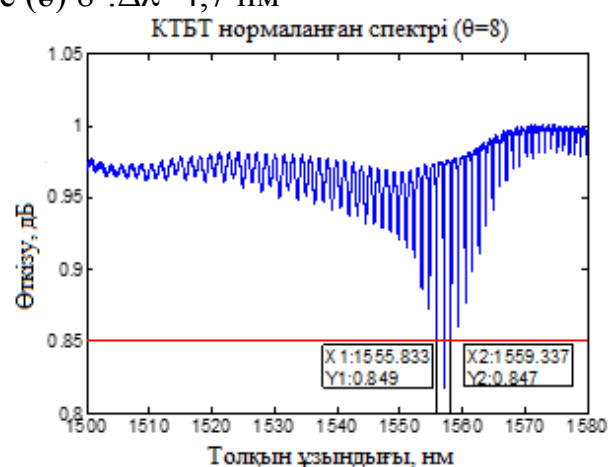


ә

Сурет 45 – $n=1,3639$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=34,93$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=4,7$ нм

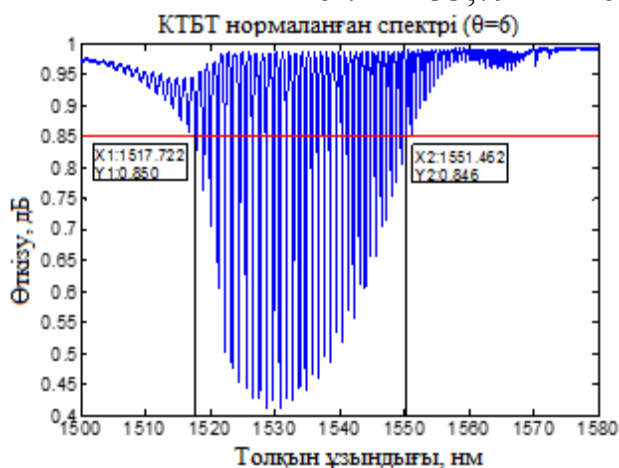


а

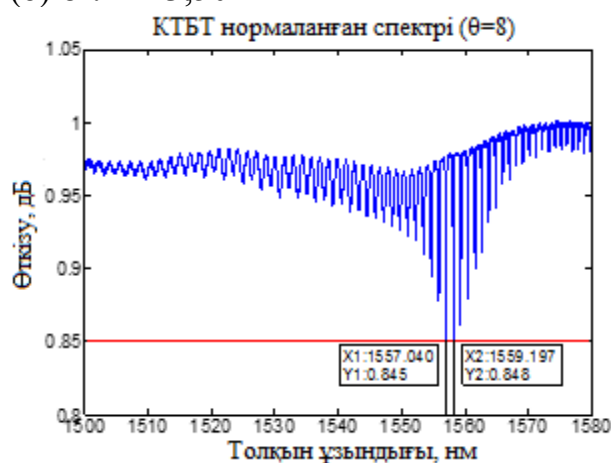


ә

Сурет 46 – $n=1,3655$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=33,79$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=3,504$ нм

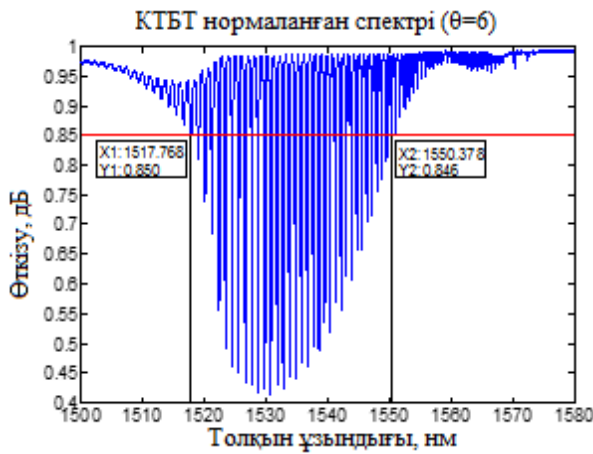


а

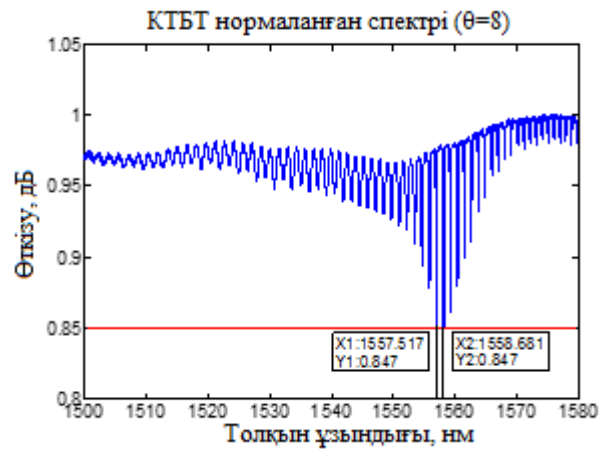


ә

Сурет 47 – $n=1,3672$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) $6^\circ: \Delta\lambda=33,74$ нм және (ә) $8^\circ: \Delta\lambda=2,336$ нм

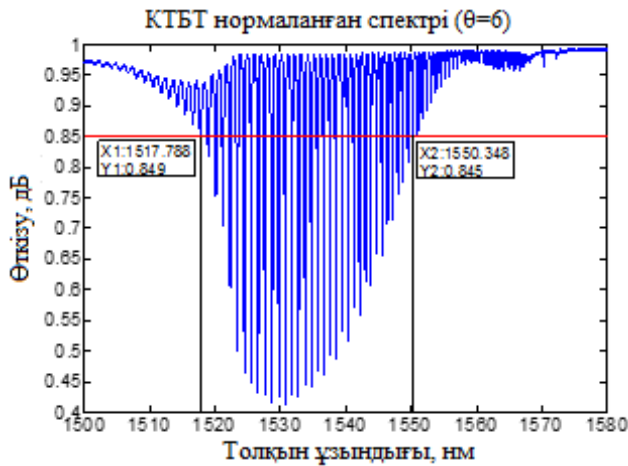


а

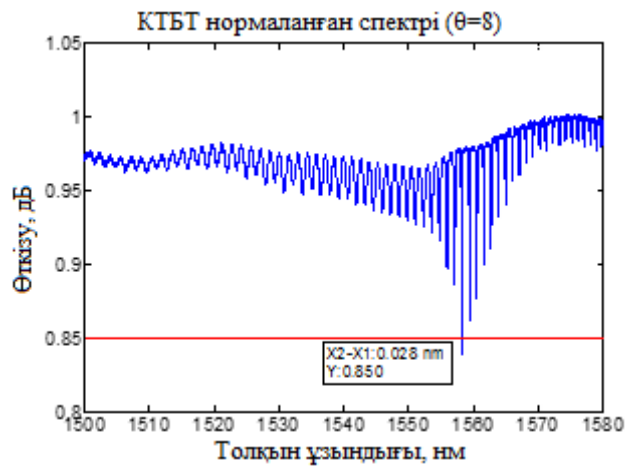


б

Сурет 48 – $n=1,3689$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=32,61$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=1,164$ нм



а



б

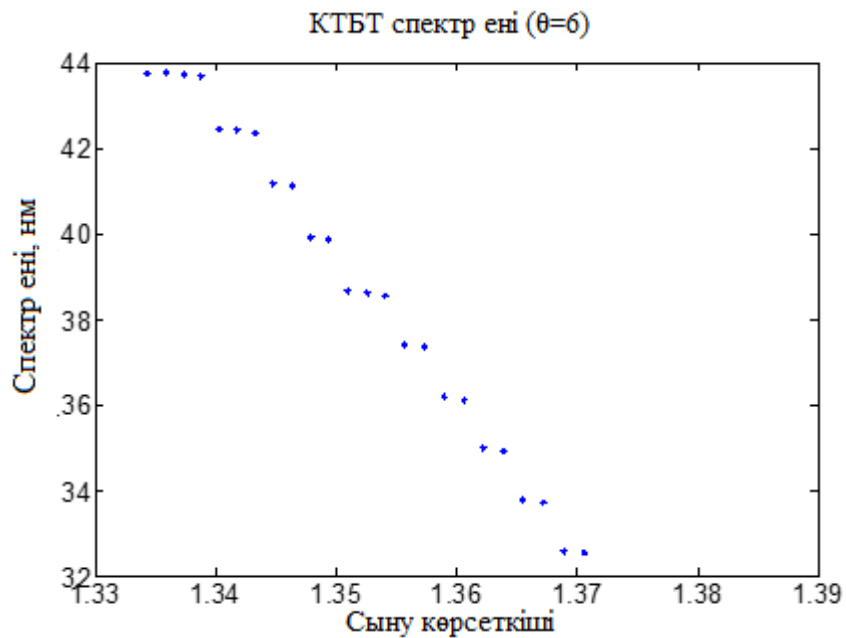
Сурет 49 – $n=1,3706$ кезінде TFBG үшін сенсорлық спектр енінің мәндері: (а) 6° : $\Delta\lambda=32,56$ нм және (б) 8° : $\Delta\lambda=0,028$ нм

26-49 суреттерден алынған сенсорлық спектр енінің мәндері 3- кестеге енгізілді. Алынған мәндерге сәйкес 50-51 суреттерде көрсетілгендей 6° және 8° көлбеу бұрышы бар TFBG үшін сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткіштеріне тәуелділігінің графиктерін тұрғызылды.

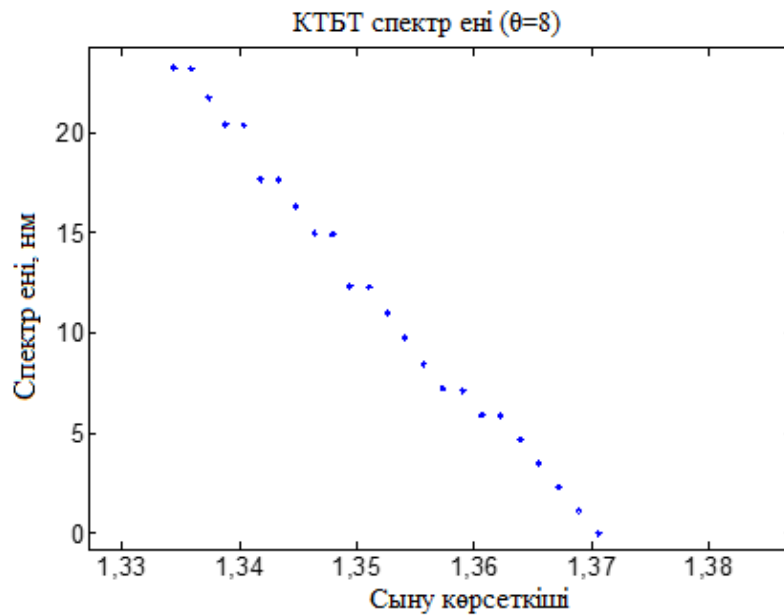
Кесте 3 – Әр түрлі сыну көрсеткіштеріне сәйкес келетін сенсорлық спектр енінің мәндері

Ортаның сыну көрсеткіші	Сенсорлық спектр ені	
	TFBG 6°	TFBG 8°
1.3344	43.75	23.23
1.3359	43.76	23.2
1.3374	43.72	21.78

1.3388	43.68	20.42
1.3403	42.46	20.39
1.3418	42.43	17.69
1.3433	42.37	17.67
1.3448	41.18	16.31
1.3464	41.13	14.99
1.3479	39.93	14.95
1.3494	39.88	12.36
1.3510	38.68	12.32
1.3526	38.63	11.01
1.3541	38.56	9.764
1.3557	37.41	8.492
1.3573	37.38	7.268
1.3590	36.2	7.156
1.3606	36.12	5.936
1.3622	35.0	5.908
1.3639	34.93	4.70
1.3655	33.78	3.504
1.3672	33.74	2.336
1.3689	32.61	1.164
1.3706	32.56	0.028



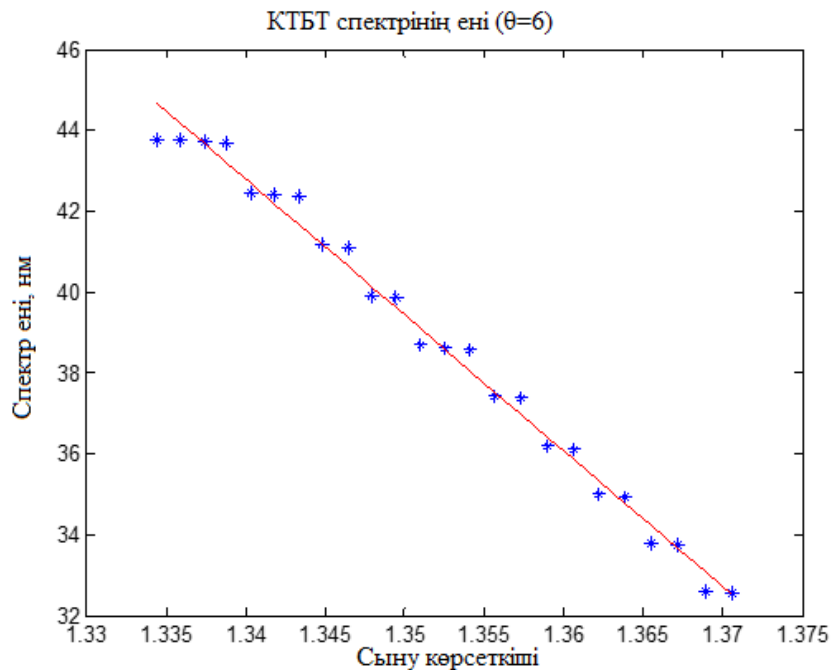
Сурет 50 – Көлбеу бұрышы 6^0 болатын TFBG үшін сенсорлық спектр ені мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі



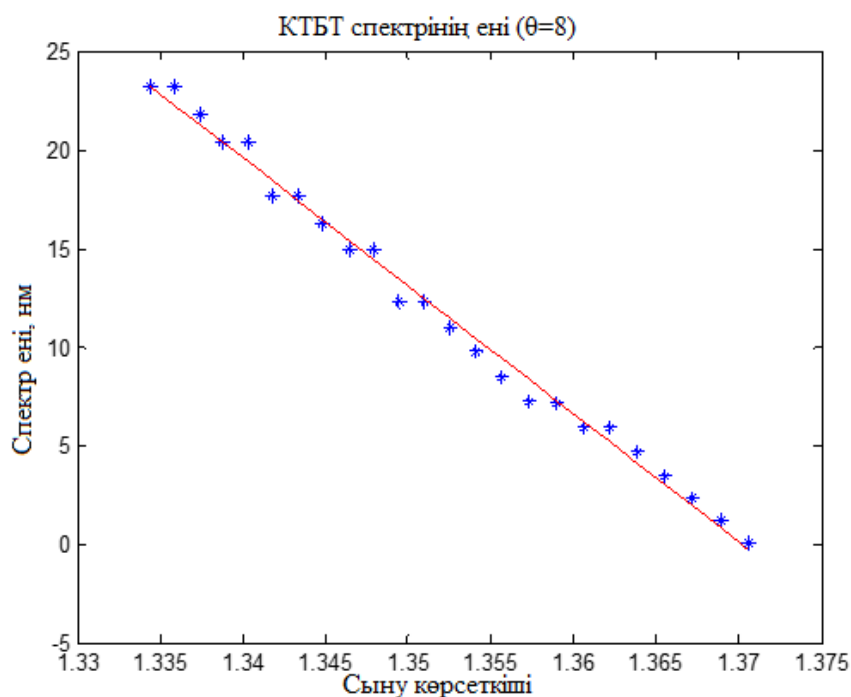
Сурет 51 – Көлбеу бұрышы 8^0 болатын TFBG үшін сенсорлық спектр ені мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі

50 және 51 суреттерден сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткішіне тәуелділігінде екі жағдайда да сызықтық тәуелділік бар екенін байқаймыз. Бұған көз жеткізу үшін біз ең кіші квадраттар әдісімен есептеулердің нүктелік мәндері бойынша аппроксимациялайтын түзу саламыз.

Matlab бағдарламасында аппроксимациялау түзуін тұрғызу үшін polyfit функциясы қолданылды. Есептеу нәтижелері 52, 53 суреттерде келтірілген.



Сурет 52 – Көлбеу бұрышы 6^0 болатын TFBG үшін сенсорлық спектр ені мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі [100]



Сурет 53 – Көлбеу бұрышы 8° болатын TFBG үшін сенсорлық спектр ені мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі [100]

Есептеулер бойынша көлбеу бұрышы 6° болатын TFBG үшін сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткіштеріне сызықтық тәуелділік формуласы келесідей

$$\Delta\lambda = 496.53 - 338.98n$$

көлбеу бұрышы 8° үшін

$$\Delta\lambda = 894.9 - 653.93n$$

Сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткішіне тәуелділігінің сызықтық дәрежесін сандық бағалау үшін бірінші ретті жуықтайтын көпмүшенің коэффициенттерінің қателіктері есептеледі. Бірінші ретті жуықтайтын көпмүше түрінде ұсынылғандықтан, b коэффициентін анықтаудың орташа квадраттық қателігі формула бойынша болады

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (11)$$

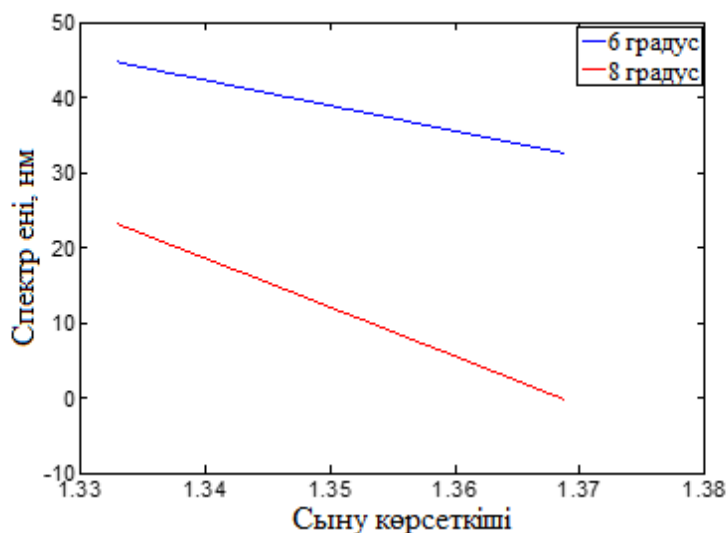
Аюсолютті қателікті мына формуламен анықтадық: $\Delta b = S_b \cdot t_\alpha$, мұндағы t_α - Стьюдент коэффициенті. Осылайша, b коэффициентін анықтаудың салыстырмалы қателіктері келесі мәндерді қабылдады:

$$6^\circ \text{ көлбеулік бұрышы үшін } \xi_b = 4.6\%$$

$$8^\circ \text{ көлбеулік бұрышы үшін } \xi_b = 3.7\%$$

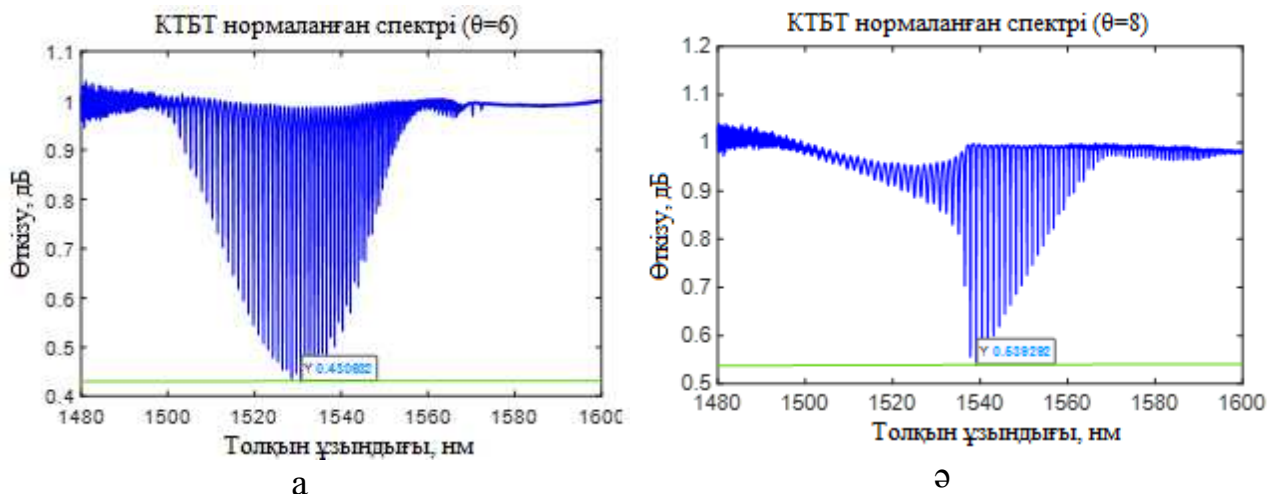
b коэффициентін есептеудің салыстырмалы қателіктері өте аз, сәйкесінше өткізу спектрінің ені сыну көрсеткішінен сызықтық тәуелді деп айтуға болады [101].

КТБТ спектр енінің ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігі

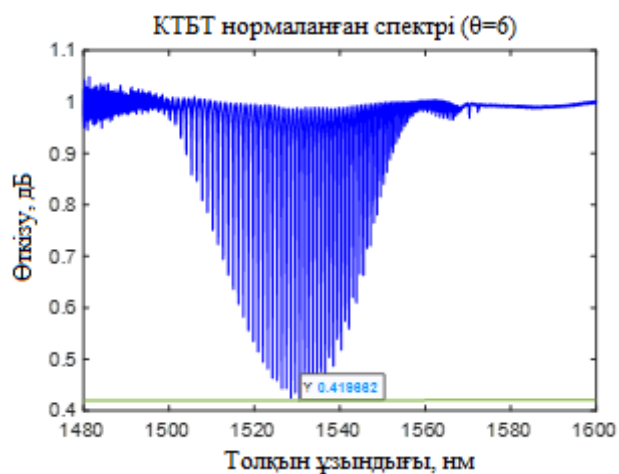


Сурет 54 – Сенсорлық спектр енінің сыну көрсеткіштеріне тәуелділігі [100]

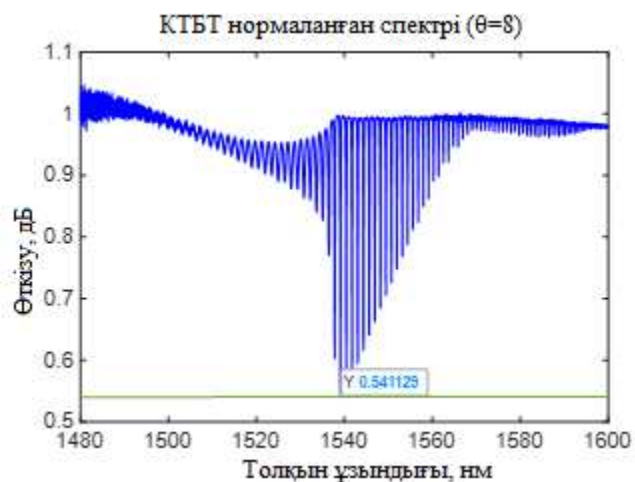
Біз сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелділікті іздейтін TFBG өткізгіштік спектрінің келесі параметрі- бұл спектрдің минимумы. Ол спектрдің ең төменгі мәніне тең шама. Өлшем бірлігі дБ. 55-78 суретте сыну көрсеткішінің әрбір мәні үшін спектрдің минимум мәндері көрсетілген



Сурет 55 – $n=1,3344$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0.430632$ dB және (ә) 8° : $\min=0.539292$ dB

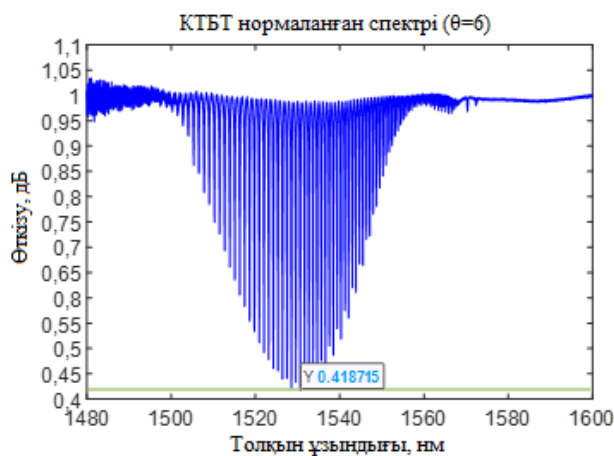


а

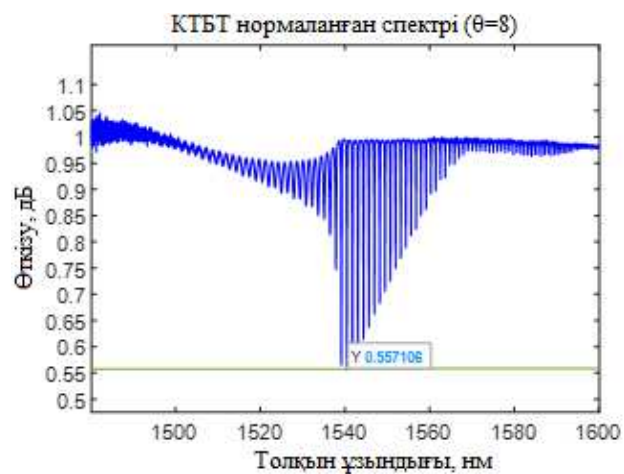


ә

Сурет 56 – $n=1,3359$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,419662$ dB және (ә) 8° : $\min=0,541129$ dB

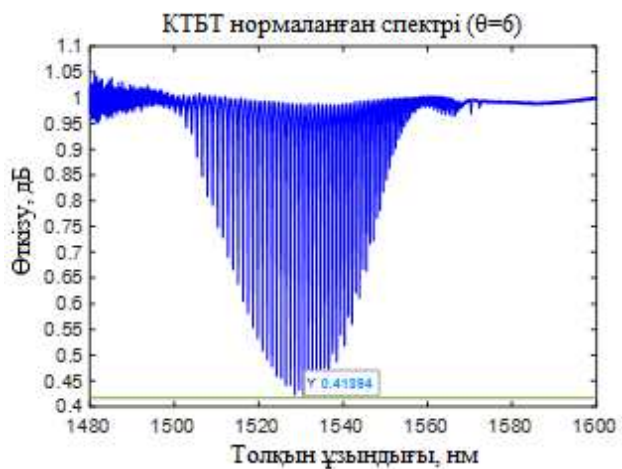


а

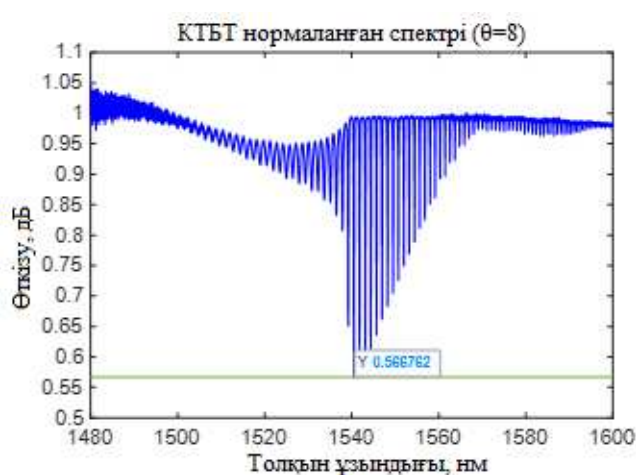


ә

Сурет 57 – $n=1,3374$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,418715$ dB және (ә) 8° : $\min=0,557106$ dB

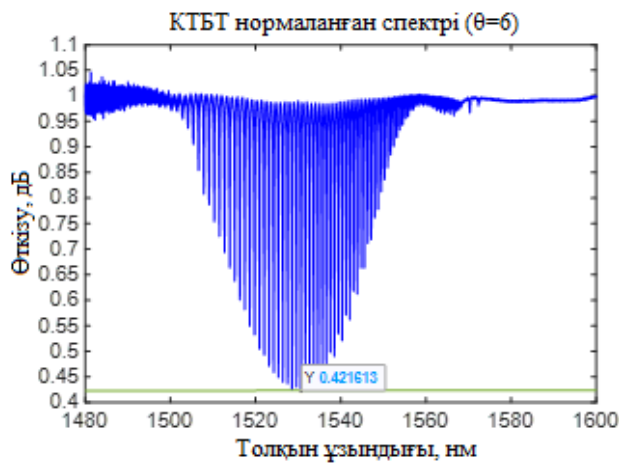


а

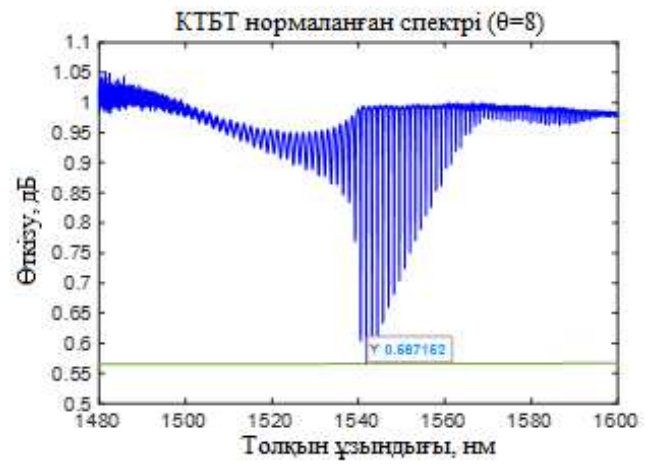


ә

Сурет 58 – $n=1,3388$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,41894$ dB және (ә) 8° : $\min=0,566762$ dB

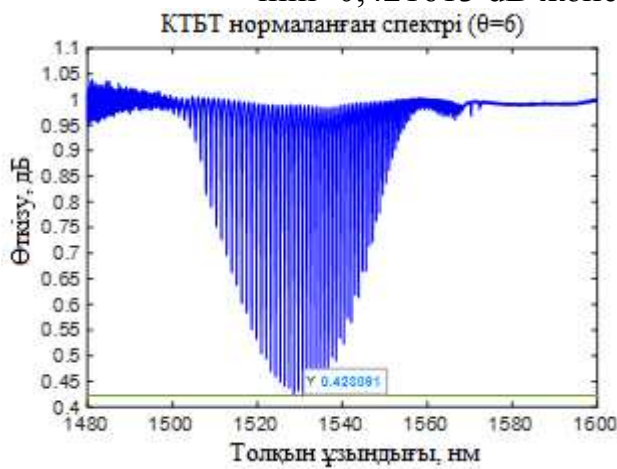


а

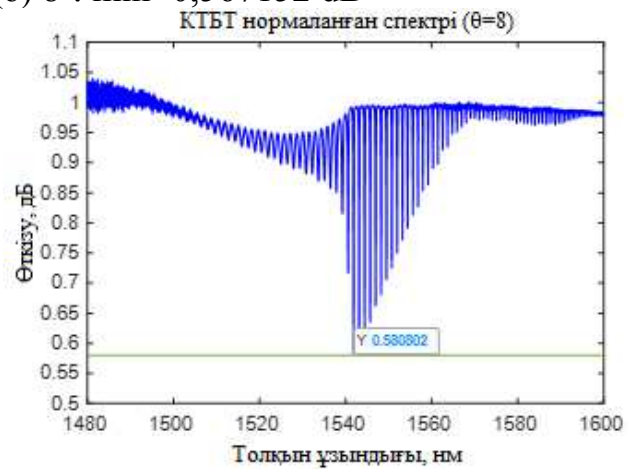


ә

Сурет 59 – $n=1,3403$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,421613$ dB және (ә) 8° : $\min=0,567152$ dB

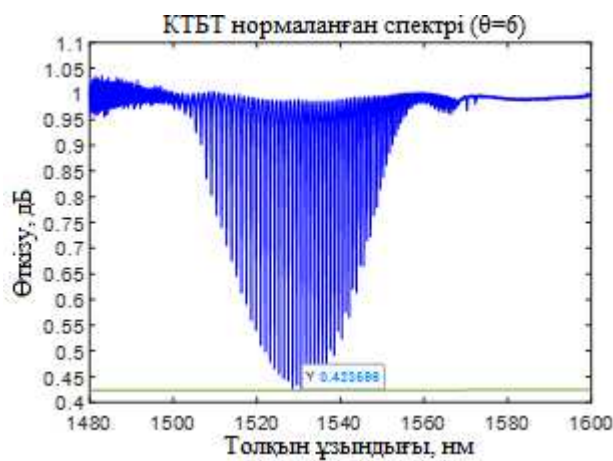


а

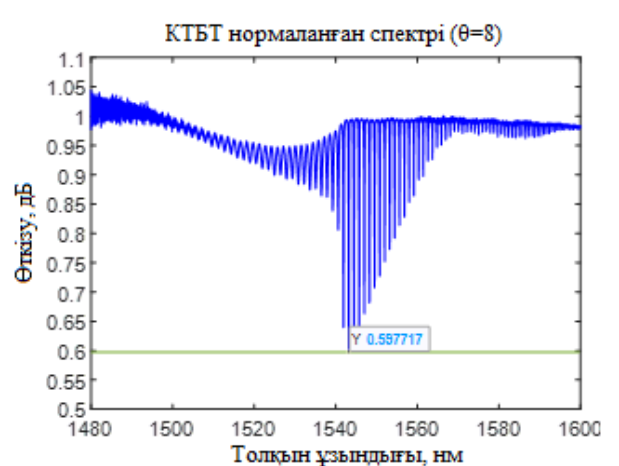


ә

Сурет 60 – $n=1,3418$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,423091$ dB және (ә) 8° : $\min=0,580802$ dB

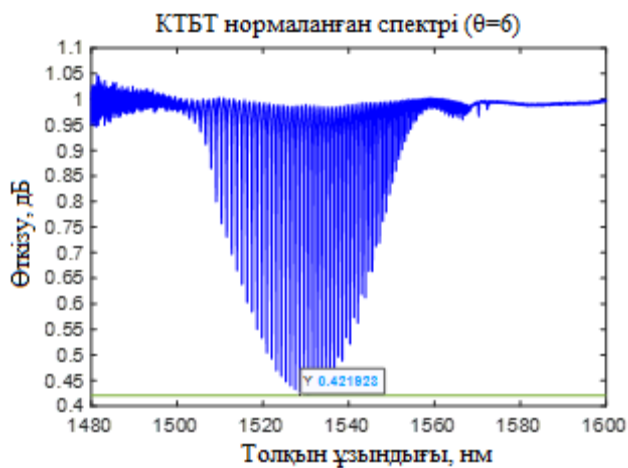


а

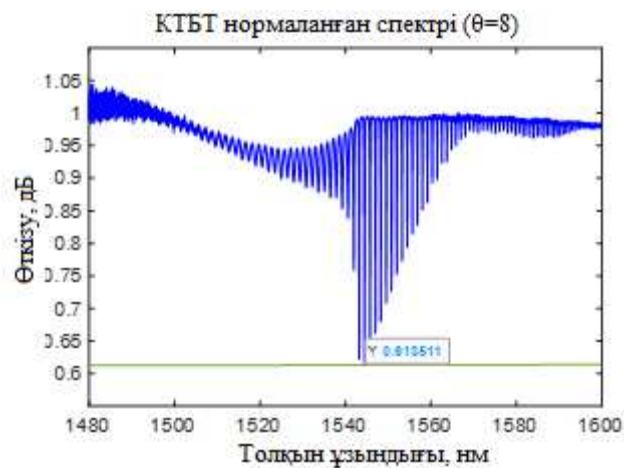


ә

Сурет 61 – $n=1,3433$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,423596$ dB және (ә) 8° : $\min=0,597717$ dB

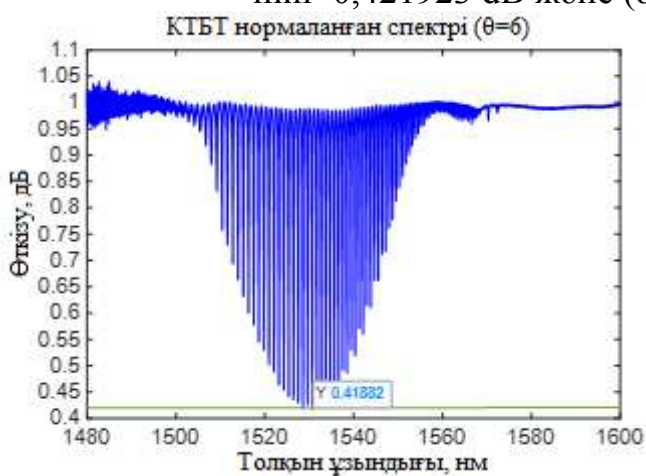


а

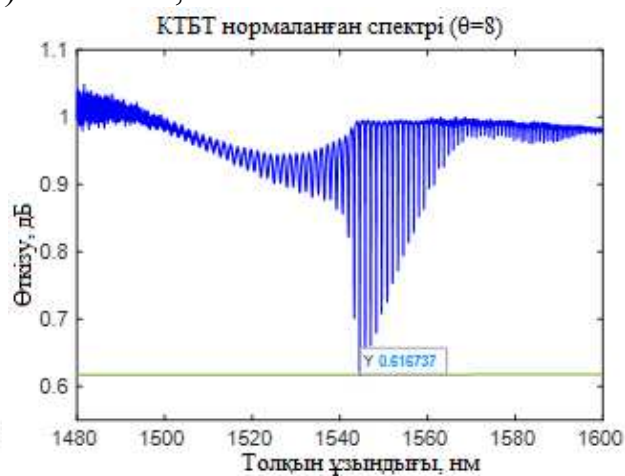


б

Сурет 62 – $n=1,3448$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,421923$ дБ және (б) 8° : $\min=0,613511$ дБ

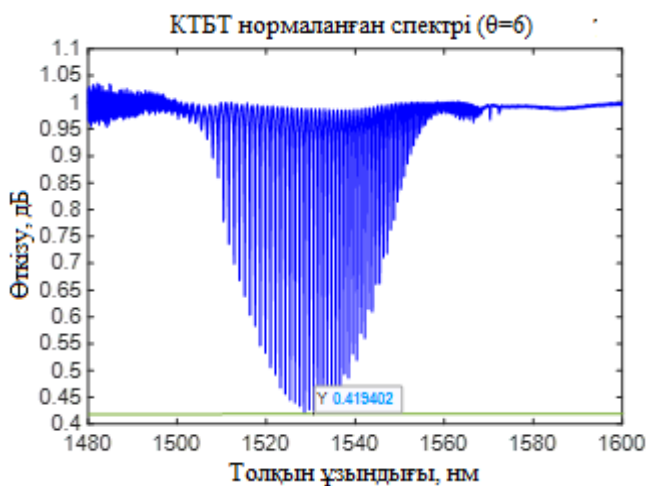


а

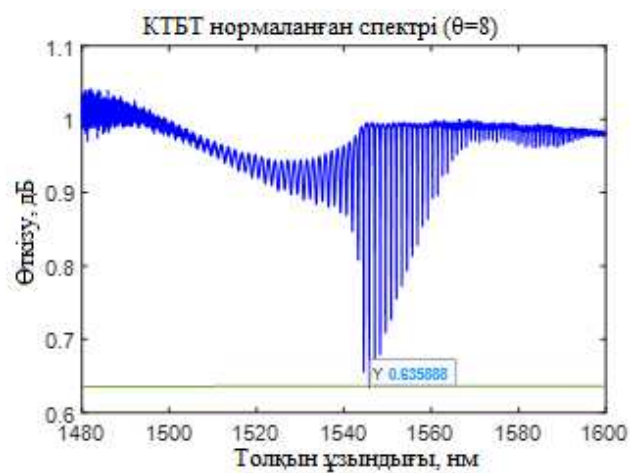


б

Сурет 63 – $n=1,3464$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,41882$ дБ және (б) 8° : $\min=0,616737$ дБ

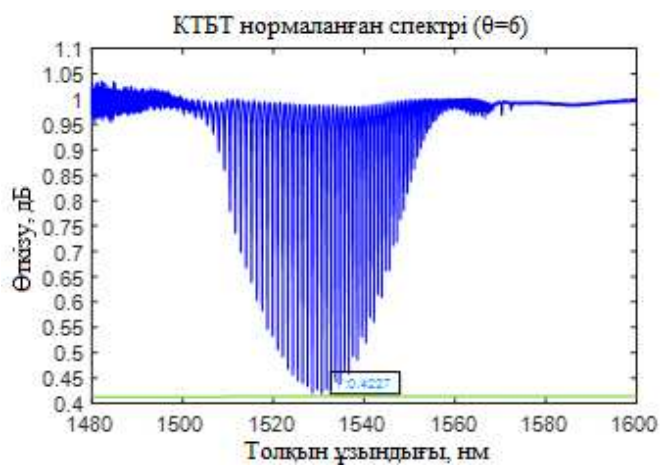


а

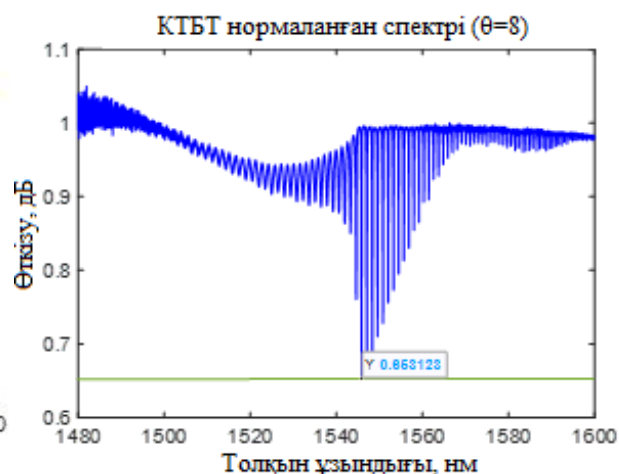


б

Сурет 64 – $n=1,3479$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,419402$ дБ және (б) 8° : $\min=0,635888$ дБ

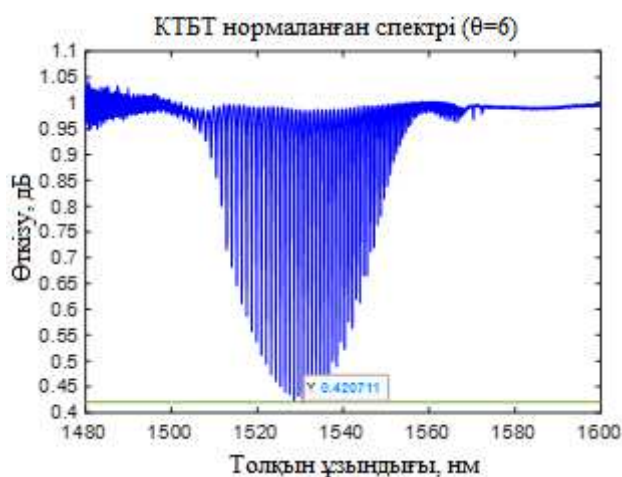


а

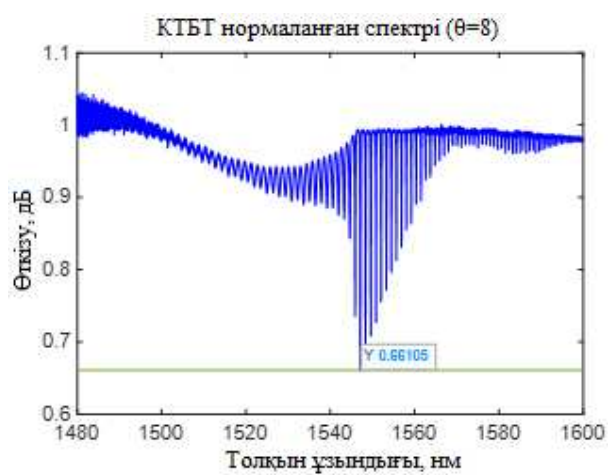


б

Сурет 65 – $n=1,3494$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,422700$ dB және (б) 8° : $\min=0,653123$

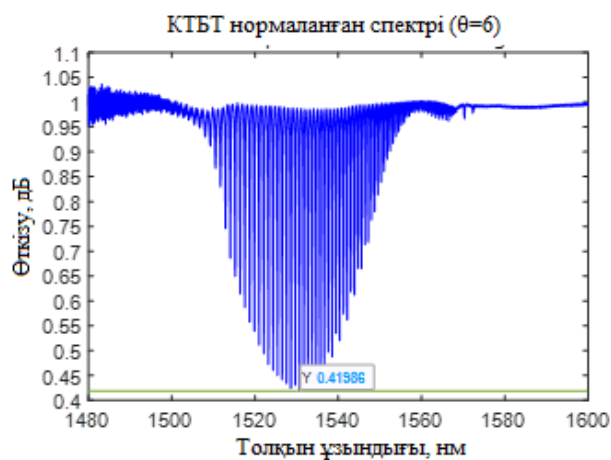


а

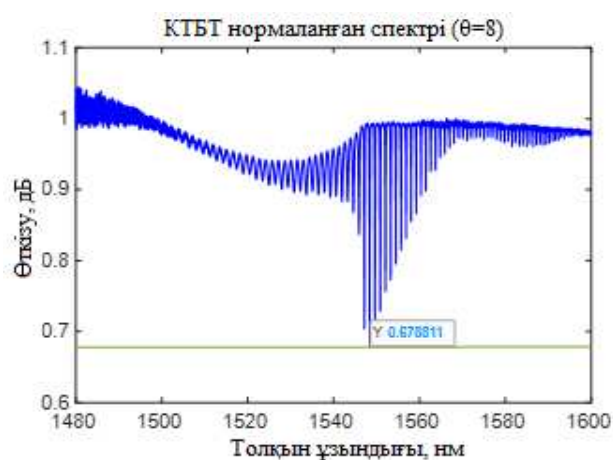


б

Сурет 66 – $n=1,3510$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,420711$ dB және (б) 8° : $\min=0,66105$ dB

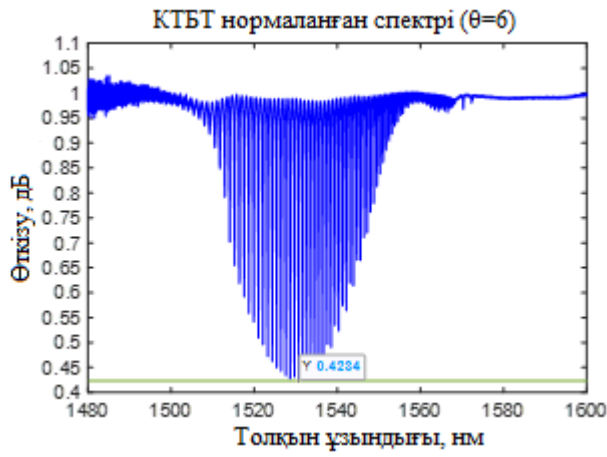


а

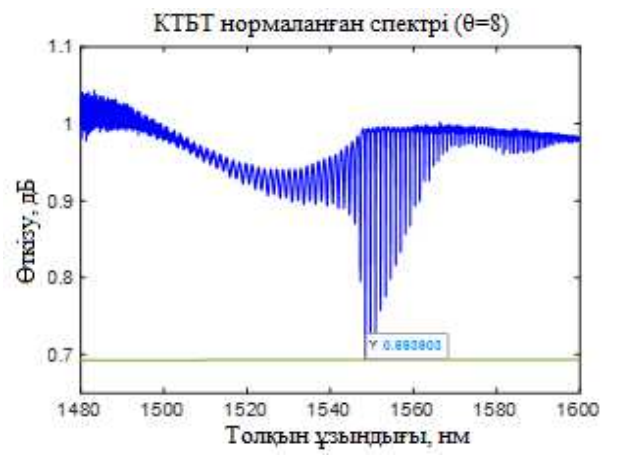


б

Сурет 67 – $n=1,3526$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,41986$ dB және (б) 8° : $\min=0,678811$ dB

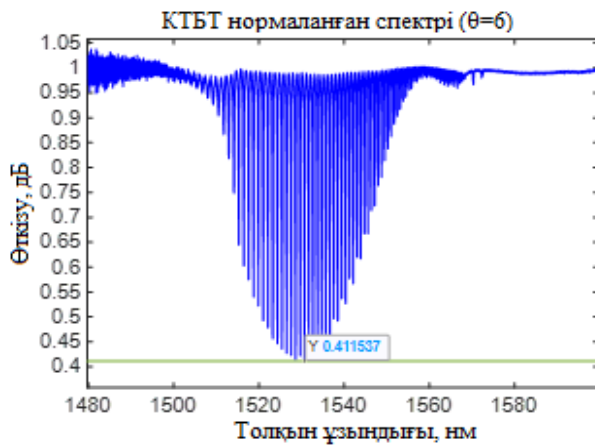


а

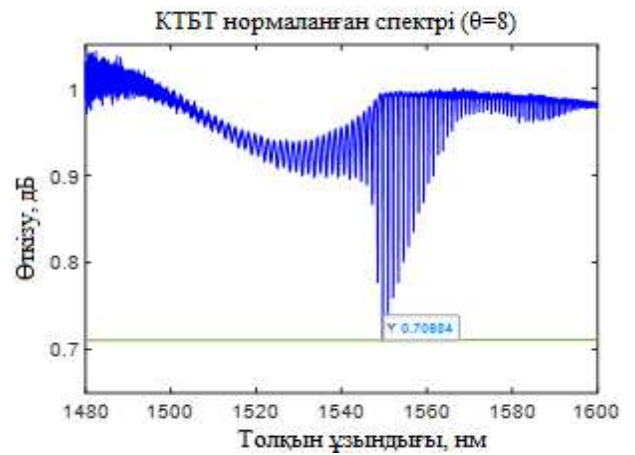


ә

Сурет 68 – $n=1,3541$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,423400$ dB және (ә) 8° : $\min=0,693903$ dB

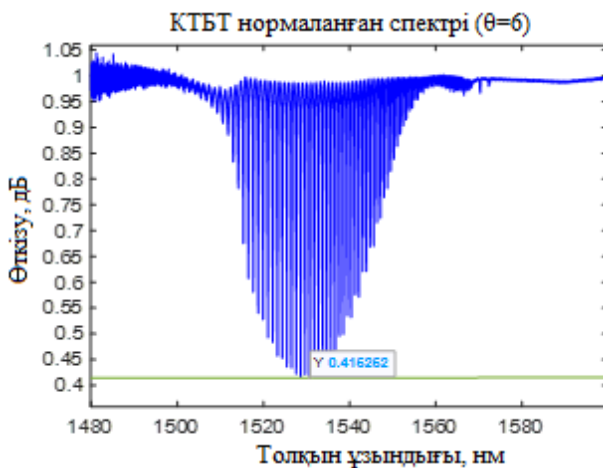


а

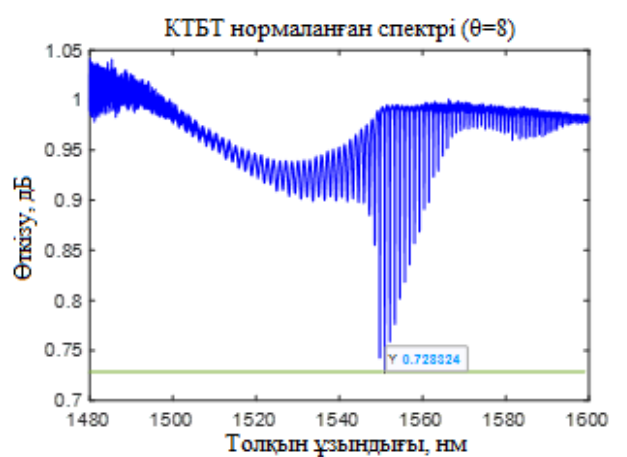


ә

Сурет 69 – $n=1,3557$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,411537$ dB және (ә) 8° : $\min=0,70984$ dB

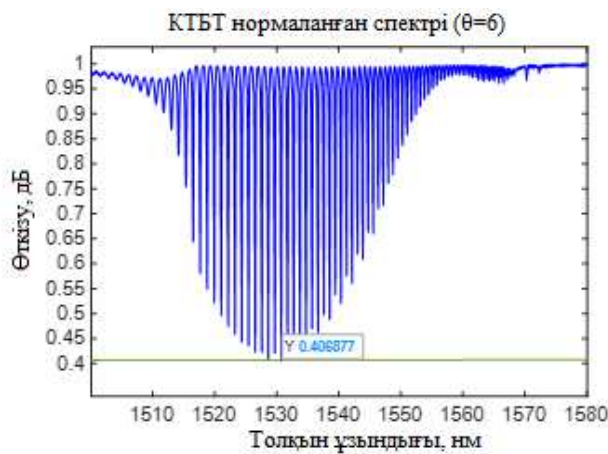


а

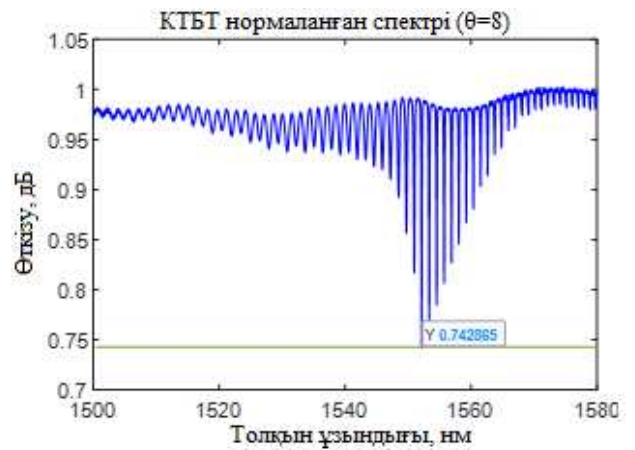


ә

Сурет 70 – $n=1,3573$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,415252$ dB және (ә) 8° : $\min=0,728324$ dB

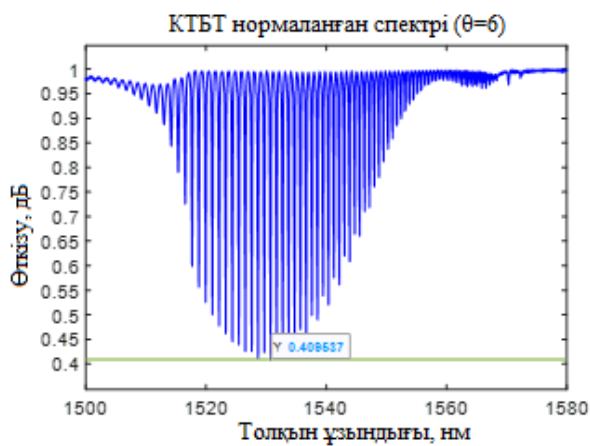


а

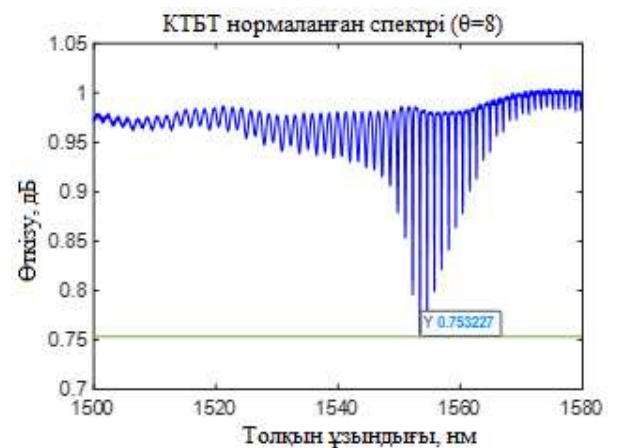


б

Сурет 71 – $n=1,3590$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,406877$ dB және (б) 8° : $\min=0,742865$ dB

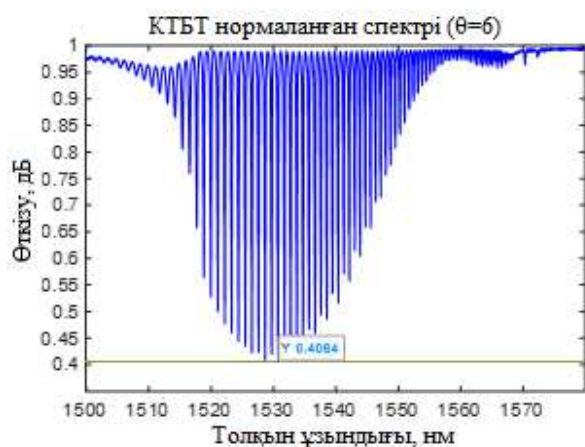


а

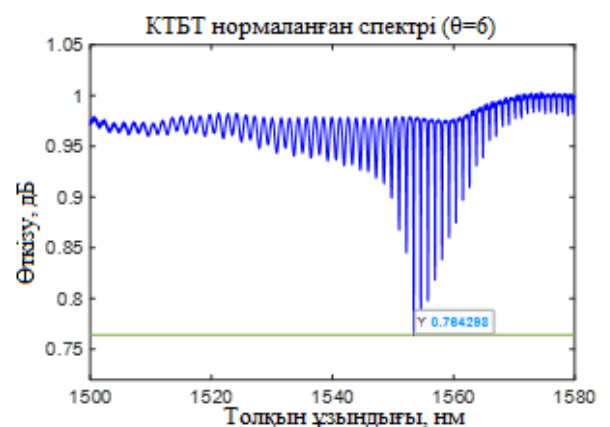


б

Сурет 72 – $n=1,3606$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,409537$ dB және (б) 8° : $\min=0,753227$ dB

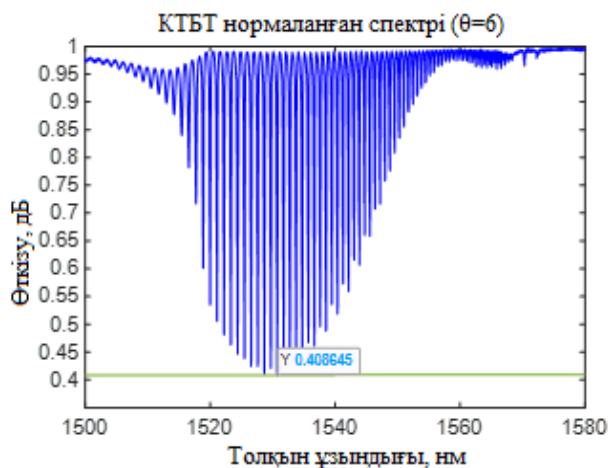


а

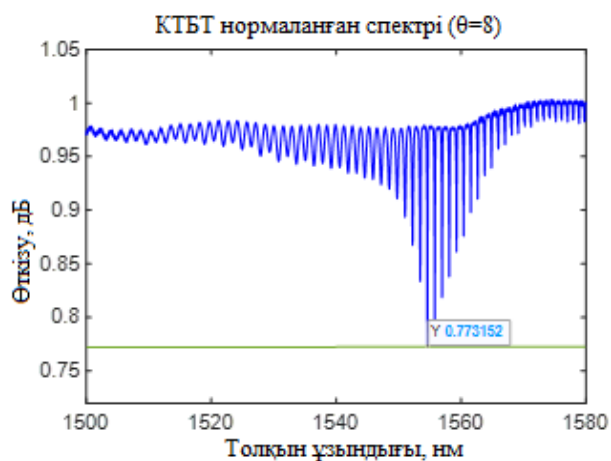


б

Сурет 73 – $n=1,3622$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,406400$ dB және (б) 8° : $\min=0,764298$ dB

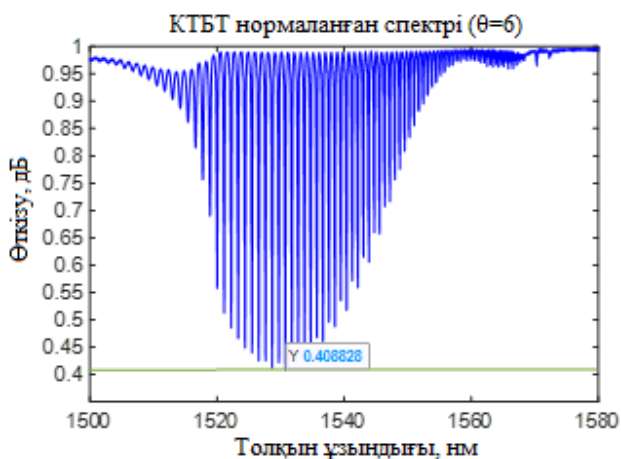


а

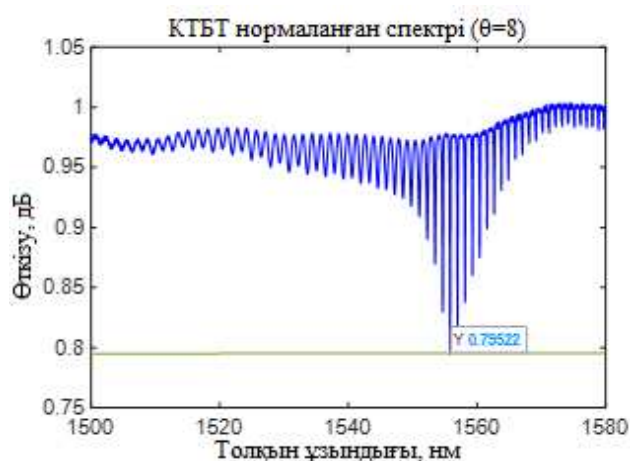


б

Сурет 74 – $n=1,3639$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,408645$ дБ және (б) 8° : $\min=0,773152$ дБ

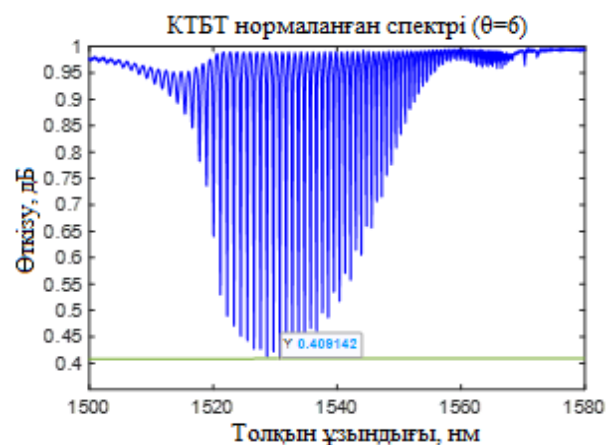


а

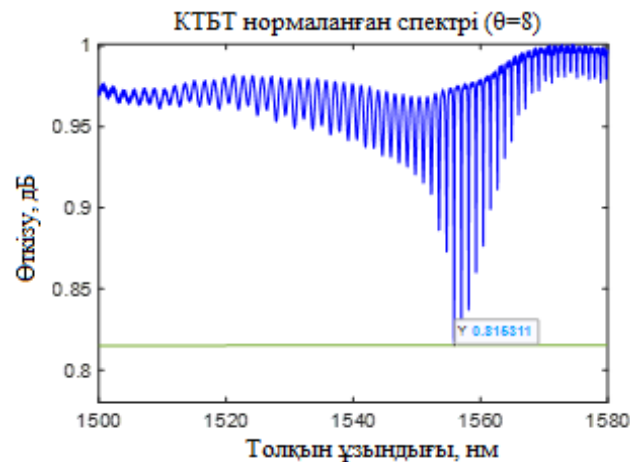


б

Сурет 75 – $n=1,3655$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,408828$ дБ және (б) 8° : $\min=0,795220$ дБ

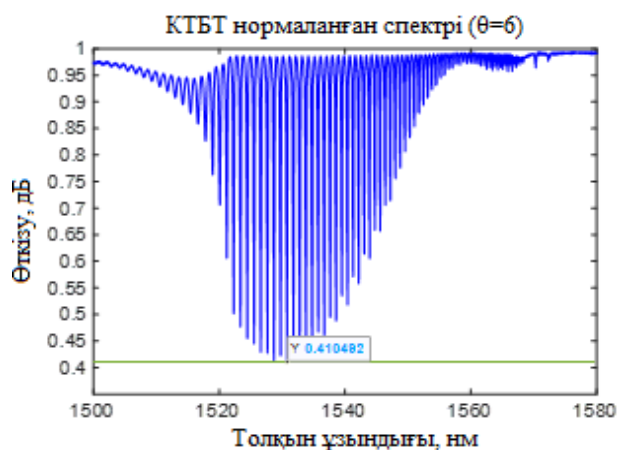


а

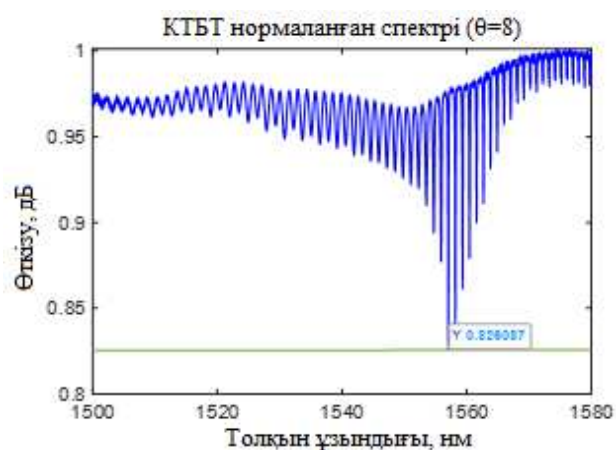


б

Сурет 76 – $n=1,3672$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,409142$ дБ және (б) 8° : $\min=0,815311$ дБ

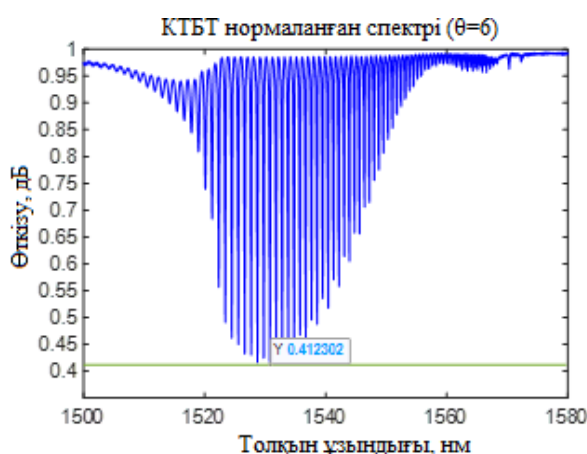


а

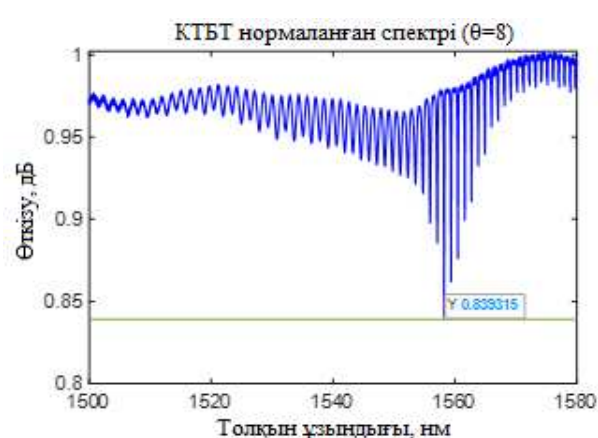


ә

Сурет 77 – $n=1,3689$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,410492$ dB және (ә) 8° : $\min=0,826087$ dB



а



ә

Сурет 78 – $n=1,3706$ кезінде TFBG спектр минимумының мәндері: (а) 6° : $\min=0,412302$ dB және (ә) 8° : $\min=0,839315$ dB

Жасыл түзу спектрдің минималды орнын көрсетеді, ол спектрдің ең төменгі мәніне тең.

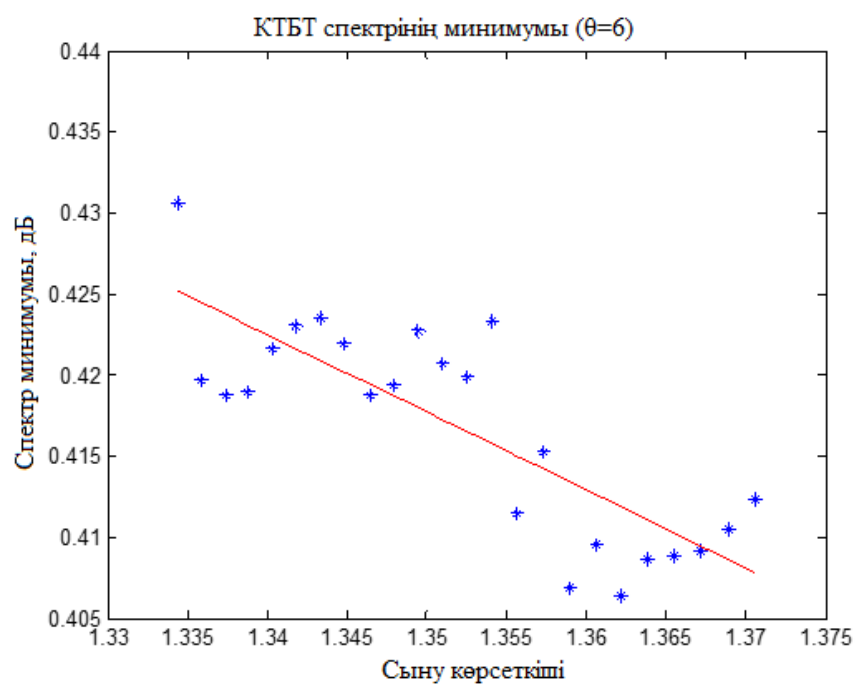
Біздің жұмысымыздың екінші мақсаты өткізу спектрінің сипаттамаларының бірі минимумның сыну көрсеткіштеріне сызықтық тәуелділігін іздейді. Осы мақсатта эксперименттік деректерді өңдеу Matlab бағдарламалары арқылы жүзеге асырылды, нәтиже алынған мәндер кесте 4-ке енгізілді.

Кесте 4 – Спектр минимумының сыну көрсеткіштеріне тәуелділігі

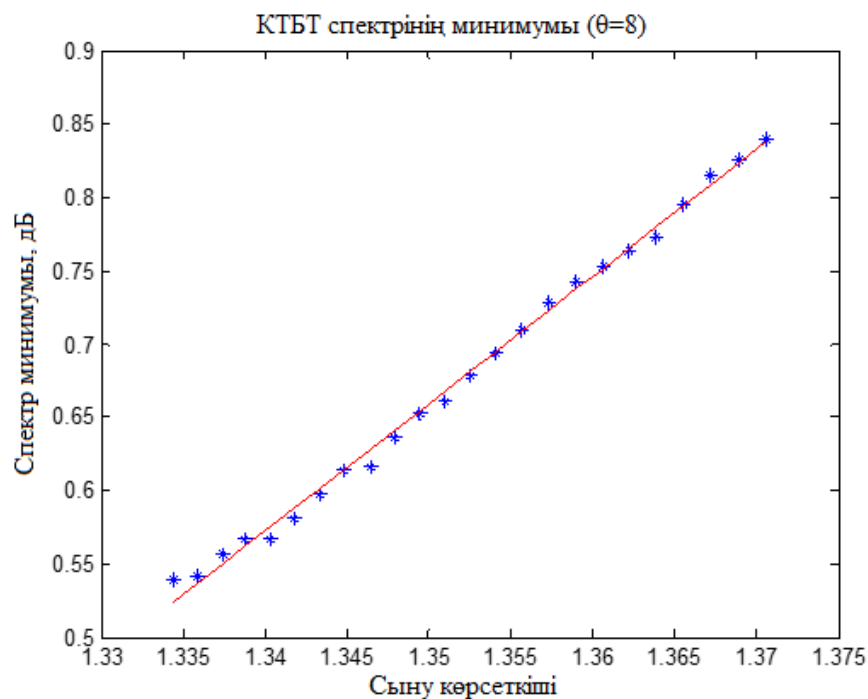
Ортаның сыну көрсеткіші	Спектр минимумы	
	TFBG 6°	TFBG 8°
1.3344	0,430600	0,539292
1.3359	0,419662	0,541129
1.3374	0,418715	0,55106

1.3388	0,418940	0,566762
1.3403	0,421613	0,567152
1.3418	0,423091	0,580802
1.3433	0,423596	0,597717
1.3448	0,421923	0,613511
1.3464	0,418820	0,616737
1.3479	0,419402	0,635888
1.3494	0,422700	0,653123
1.3510	0,420711	0,661050
1.3526	0,419860	0,678811
1.3541	0,423400	0,693903
1.3557	0,411537	0,709840
1.3573	0,415252	0,728324
1.3590	0,406877	0,742865
1.3606	0,409537	0,753227
1.3622	0,406400	0,784298
1.3639	0,408645	0,773152
1.3655	0,408828	0,79522
1.3672	0,409142	0,815311
1.3689	0,410492	0,826087
1.3706	0,412302	0,839315

Эксперименттік деректерді өңдеу нәтижелері 79-80 суреттерде келтірілген.



Сурет 79 – Көлбеу бұрышы 6° болатын TFBG үшін спектрдің минималды мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі [100]



Сурет 80 – Көлбеу бұрышы 8° болатын TFBG үшін спектрдің минималды мәнінің сыну көрсеткішіне тәуелділігі [101]

Бұл суреттерде көк нүктелер эксперименттік нәтижелер болып табылады, ал қызыл сызық аппроксимация түзуіне сәйкес келеді. Сурет 78- ден өткізу спектрінің минимумының сыну көрсеткішіне тәуелділігі 6° жағдай үшін сызықтық емес, ал 8° үшін сызықтық екенін көреміз (сурет 79). Спектрдің минимумының сыну көрсеткішіне тәуелділігі әрдайым сызықтық бола бермейтіндіктен, бұл тәуелділік бір мәнді емес және сәйкесінше практикалық қолданылмайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыстың нәтижесінде талшықты Брэгг торлары және көлбеу талшықты Брэгг торлары қарастырылды және олардың спектрлік сипаттамалары талданып, зерттелді. Жұмыстың негізінде алынған тәжірибе төмендегідей маңызды нәтижелер алуға мүмкіндіктер берді:

ТБТ артықшылықтары мен кемшіліктері талданды және әртүрлі құрылғыларда олардың ең маңызды қолданылулары келтірілді. ТБТ ең маңызды қолданулары: талшықты оптикалық байланыс жүйелерінде, оптикалық сигналдарды өңдеу және тарату жүйелерінде, физикалық, химиялық және т.б шамалардың талшықты оптикалық сенсорларында.

Көлбеу талшықты Брэгг торы- бұл талшықты-оптикалық жүйенің жаңа түрі болып табылады. Ол тордың спектрлік реакциясы арқылы қоршаған орта жағдайының өзгеруін тіркеуге қабілетті. Бұл мүмкіндік оптикалық сенсорларда жүзеге асырылуы мүмкін. TFBG негізінде бірден бірнеше физикалық шамалардың әсерін өлшеу үшін ықшам сенсор жасауға болады.

Жоғарыда аталған әрбір сенсордың артықшылығы бар. Алайда, сыну көрсеткішін анықтау үшін TFBG талшықты сенсорларын қолданудың жоғарылауымен өлшеудің басқа әдістерін жақсарту және ұсыну қажет. Біздің жұмысымызда ұқсас өлшеу әдісін қолдана отырып, есептеудің жаңа әдісі ұсынылды.

Біздің тәжірибелік жұмыстың өзге аналогты тәжірибелік жұмыстардан айырмашылығы, біз 6^0 және 8^0 көлбеу бұрышы бар TFBG қолдандық және сыну көрсеткішінің 24 мәні үшін тәжірибе жүргіздік және сыну көрсеткішінің сенсорлық спектр ені мен оның минимумына тәуелділігін тұрғыздық.

Алынған тәжірибелік мәліметтерге сәйкес, төмендегідей қорытынды жасауға болады:

Көлбеу бұрышты Брэгг торлары жазылған оптоталшықтар ортаның сыну көрсеткішінің сенсоры қызметін атқара алатындығын нақтылайтын жаңа спектрлік сипаттамалық параметр- сенсорлық спектр ені болатыны анықталды. Және оның ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігінің сызықтық деңгейі жоғарырақ болатындығы анықталды. Ұсынылып отырған сенсорлық спектр ені деп аталатын жаңа сипаттаманың ортаның сыну көрсеткішіне тәуелділігінің Брэгг торының көлбеу бұрышына қатысты графиктері өзара оқшау орналасатындығы анықталды.

Бірақ басқа спектрлік сипаттама (өткізу спектрінің минимумы) тек 8^0 көлбеу бұрышы үшін сыну көрсеткішіне сызықтық тәуелділікпен өте жақсы сипатталады. Көлбеу бұрышына байланысты спектрдің минимумының сыну көрсеткішіне тәуелділігінің түрін өзгерту қосымша зерттеуді қажет етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Miao Y. P., Liu B., Zhao Q. D. Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating // Opt. Fiber Technol. – 2009. – No. 15. – P. 233–236.
2. Hill K. O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Applied physics letters. – 1978. – V. 32. – No. 10. – P. 647-649.
3. Kawasaki B. S. et al. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers // Optics Letters. – 1978. – V. 3. – No. 2. – P. 66-68.
4. Lam D. K. W., Garside B. K. Characterization of single-mode optical fiber filters // Applied Optics. – 1981. – V. 20. – No. 3. – P. 440-445.
5. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Optics letters. – 1989. – V. 14. – No. 15. – P. 823-825.
6. Hill K. O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // Journal of lightwave technology. – 1997. – V. 15. – No. 8. – P. 1263-1276.
7. Garinocanina V. Quelques proprietes optiques de loxyde de germanium vitreux dans lultraviolet, oxyde pur // Comptes rendus hebdomadaires des seances de l academie des sciences. – 1958. – V. 247. – No. 5. – P. 593-596.
8. Hosono H., Abe, Y., Kinser, D. L., Weeks, R. A., Muta, K., Kawazoe, H. Nature and origin of the 5-eV band in SiO₂: GeO₂ glasses // Physical Review B. – 1992. – V. 46. – No. 18. – P. 11445.
9. Hill K. O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D. C., Albert J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask // Applied Physics Letters. – 1993. – V. 62. – No. 10. – P. 1035-1037.
10. Anderson D. Z., Mizrahi V., Erdogan T., White A. E. Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element // Electronics Letters. – 1993. – V. 6. – No. 29. – P. 566-568.
11. Matsuhara M., Hill K. O. Optical-waveguide band-rejection filters: Design // Applied Optics. – 1974. – V. 13. – No. 12. – P. 2886-2888.
12. Malo B., Theriault S., Johnson D. C., Bilodeau F., Albert J., Hill, K. O. Apodised in-fibre Bragg grating reflectors photoimprinted using a phase mask // Electronics Letters. – 1995. – V. 31. – No. 3. – P. 223-225.
13. Albert J., Hill K. O., Malo B., Theriault S., Bilodeau F., Johnson D. C., Erickson L. E. Apodisation of the spectral response of fibre Bragg gratings using a phase mask with variable diffraction efficiency // Electronics Letters. – 1995. – V. 31. – No. 3. – P. 222-223.
14. Strasser T. A., Chandonnet P. J., DeMarco J., Soccolich C. E., Pedrazzani J. R., DiGiovanni D. J., Shenk D. S. UV-induced fiber grating OADM devices for efficient bandwidth utilization // Optical Fiber Communication Conference. – Optica Publishing Group, 1996. – P. PD8.
15. Kashyap R. Fiber Bragg gratings, 2nd Edn. // Academic Press, Burlington. – 2011.

16. Othonos A., Kalli K. Fibre Bragg gratings, fundamentals and application in telecommunication and sensing//Artech House, London. – 1999
17. Zhou K., Simpson A. G., Zhang L., Bennion I. Side detection of strong radiation-mode out-coupling from blazed FBGs in single-mode and multimode fibers //IEEE Photonics Technology Letters. – 2003. – V. 15. – No 7. – P. 936-938.
18. Zhou K., Zhang L., Chen X., Bennion I. Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of > 80 tilted structures //Optics letters. – 2006. – V. 31. – No. 9. – P. 1193-1195.
19. Zhou K., Zhang L., Chen X., Bennion I. Low thermal sensitivity grating devices based on ex-45 tilting structure capable of forward-propagating cladding modes coupling //Journal of lightwave technology. – 2006. – V. 24. – No. 12. – P. 5087-5094.
20. Erdogan T., Sipe J. E. Tilted fiber phase gratings //JOSA A. – 1996. – V. 13. – No. 2. – P. 296-313.
21. Laffont G., Ferdinand P. Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry //Measurement Science and Technology. – 2001. – V. 12. – No. 7. – P. 765.
22. Caucheteur C., Mégret P. Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer //IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – V. 17. – No 12. – P. 2703-2705
23. Baek S., Jeong Y., Lee B. Characteristics of short-period blazed fiber Bragg gratings for use as macro-bending sensors //Applied optics. – 2002. – V. 41. – No. 4. – P. 631-636.
24. Huy M. C. P. et al. Tilted fiber Bragg grating photowritten in microstructured optical fiber for improved refractive index measurement //Optics Express. – 2006. – V. 14. – No. 22. – P. 10359-10370.
25. Dhanalakshmi S. et al. Thermal management of solar photovoltaic panels using a fibre Bragg grating sensor-based temperature monitoring //Case Studies in Thermal Engineering. – 2022. – V. 31. – P. 101834.
26. Lin W. et al. A temperature independent inclinometer based on a tapered fiber bragg grating in a fiber ring laser //Sensors. – 2021. – V. 21. – No. 9. – P. 2892.
27. Guan B. O., Tam H. Y., Liu S. Y. Temperature-independent fiber Bragg grating tilt sensor //IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – V. 16. – No. 1. – P. 224-226.
28. Maheshwari M. et al. A rotation independent in-place inclinometer/tilt sensor based on fiber Bragg grating //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – V. 68. – No. 8. – P. 2943-2953.
29. Ismail N. N. et al. Novel 3D-printed biaxial tilt sensor based on fiber Bragg grating sensing approach //Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – V. 330. – P. 112864.
30. Yang H., Li Y., Li X. Intensity-modulated refractive index sensor based on the side modes of fiber Bragg grating //Optics Communications. – 2022. – V. 505. – P. 127319.
- 31.

32. Chehura E., James S. W., Tatam R. P. Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating //Optics Communications. – 2007. – V. 275. – No. 2. – P. 344-347.
33. Gao R. et al. Temperature compensated three-dimension fiber optic vector magnetic field sensor based on an elliptical core micro fiber Bragg grating //Optics Express. – 2020. – V. 28. – No. 5. – P. 7721-7733.
34. Vengsarkar A. M. et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers //Optics Letters. – 1996. – V. 21. – No. 5. – P. 336-338.
35. Li C. et al. Liquid level and temperature sensor based on an asymmetrical fiber Mach–Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating //Optics Communications. – 2016. – V. 372. – P. 196-200.
36. Mizrahi V., Sipe J. E. Optical properties of photosensitive fiber phase gratings //Journal of lightwave technology. – 1993. – V. 11. – No. 10. – P. 1513-1517.
37. Aldaba A. L. et al. Polyaniline-coated tilted fiber Bragg gratings for pH sensing //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2018. – V. 254. – P. 1087-1093.
38. Wang F. et al. Linear-response and simple hot-wire fiber-optic anemometer using high-order cladding mode //Optics Express. – 2020. – V. 28. – No. 18. – P. 27028-27036.
39. Lu Y. et al. Highly sensitive twist sensor based on tilted fiber Bragg grating of polarization-dependent properties //Optical Fiber Technology. – 2014. – V. 20. – No. 5. – P. 491-494.
40. Miao Y., Liu B., Zhao Q. Simultaneous measurement of strain and temperature using single tilted fibre Bragg grating //Electronics Letters. – 2008. – V. 44. – No. 21. – P. 1242-1243.
41. Rahimi S. et al. Temperature and strain sensors based on integration of tilted fiber Bragg gratings with a free spectral range matched interrogation system //IEEE Sensors Journal. – 2009. – V. 9. – No. 7. – P. 858-861.
42. Zhao C. L. et al. Studies on strain and temperature characteristics of a slanted multimode fiber Bragg grating and its application in multiwavelength fiber Raman ring laser //Journal of lightwave technology. – 2006. – V. 24. – No. 6. – P. 2394.
43. Chen X. et al. In-Fiber Twist Sensor Based on a Fiber Bragg Grating With 81° Tilted Structure //IEEE photonics technology letters. – 2006. – V. 18. – No. 24. – P. 2596-2598.
44. Zhao C. L., Yang X., Demokan M. S., Jin W. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3 slanted multimode fiber Bragg grating //Journal of lightwave technology. – 2006. – V. 24. – No. 2. – P. 879.
45. Caucheteur C., Paladino D., Pilla P., Cutolo A., Campopiano S., Giordano M., Megret P. External refractive index sensitivity of weakly tilted fiber Bragg gratings with different coating thicknesses //IEEE Sensors Journal. – 2008. – V. 8. – No. 7. – P. 1330-1336.
46. Suo R., Chen X., Zhou K., Zhang L., Bennion I. 800 nm WDM interrogation system for strain, temperature, and refractive index sensing based on

tilted fiber Bragg grating //IEEE Sensors Journal. – 2008. – V. 8. – No. 7. – P. 1273-1279.

47. Mou C., Zhou K., Zhang L., Bennion I. Thermal insensitive optical liquid level sensor based on excessively tilted fibre Bragg grating //Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference. – Optical Society of America, 2008. – P. SuR5.

48. Miao Y., Liu B., Tian S., Zhao Q. Temperature-insensitive refractive index sensor based on tilted fiber Bragg grating //Microwave and Optical Technology Letters. – 2009. – V. 51. – No. 2. – P. 479-483.

49. Alberto N. J., Marques C. A., Pinto J. L., Nogueira R. N. Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating //Applied Optics. – 2010. – V. 49. – No. 31. – P. 6085-6091.

50. Shen C., Liu D., Lian X., Lang T., Zhao C., Semenova Y., Albert, J. Microfluidic flow direction and rate vector sensor based on a partially gold-coated TFBG //Optics letters. – 2020. – V. 45. – No. 10. – P. 2776-2779.

51. Tomyshev K.A., Manuilovich E. S., Tazhetdinova D. K., Dolzhenko E. I., Butov O. V. High-precision data analysis for TFBG-assisted refractometer //Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – V. 308. – P. 112016.

52. Wen H.Y., Huang W.Y., Huang T.S., Hsu Y.C., Chiang C.C. Comparison of the sensing mechanisms and capabilities of three functional materials surface-modified TFBG sensors //AIP Advances. – 2020. – V. 10. – No. 6. – P. 065319.

53. Moreno Y., Song Q., Xing Z., Sun Y., Yan Z. Hybrid tilted fiber gratings-based surface plasmon resonance sensor and its application for hemoglobin detection //Chinese Optics Letters. – 2020. – V. 18. – No. 10. – P. 100601.

54. Gang T., Zhang X., Sun R. Tilted fiber Bragg grating fixed in a polypropylene tube for ultrasonic sensing and imaging of simulated geological models //Optics & Laser Technology. – 2021. – V. 140. – P. 107075.

55. Lobry M., Chah K., Loyez M., Kinet D., Caucheteur C. Refractometric sensing with plasmonic tilted Bragg gratings in different fiber types //Optical Sensing and Detection VI. – International Society for Optics and Photonics, 2020. – V. 11354. – P. 113542W.

56. Ainur K., Kisała P., Aliya K., Orken M., Maksat A. Interrogation system of signals from rotation sensors using tilted fiber Bragg gratings //Cogent Engineering. – 2020. – V. 7. – No. 1. – P. 1743405.

57. Fazzi L., Valvano S., Alaimo A., Groves R.M. A simultaneous dual-parameter optical fibre single sensor embedded in a glass fibre/epoxy composite //Composite Structures. – 2021. – P. 114087.

58. Chen X., Nan Y., Guo T. Study on a plasmonic tilted fiber Bragg grating sensor for biomolecule AdoHcy detection //Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications. – International Society for Optics and Photonics, 2020. – V. 11455. – P. 114553D.

59. Lobry M., Loyez M., Chah K., Hassan E.M., Goormaghtigh E., DeRosa M.C., Caucheteur C. HER2 biosensing through SPR-envelope tracking in plasmonic

optical fiber gratings //Biomedical optics express. – 2020. – V. 11. – No. 9. – P. 4862-4871.

60. Wang F., Wang B., Zhang X., Lu M., Zhang Y., Sun C., Peng W. High Sensitivity Humidity Detection Based on Functional GO/MWCNTs Hybrid Nano-Materials Coated Titled Fiber Bragg Grating //Nanomaterials. – 2021. – V. 11. – No. 5. – P. 1134.

61. Duan Y., Zhang Y., Wang F., Sun Y., Chen M., Jing Z., Peng W. 4-Mercaptopyridine Modified Fiber Optic Plasmonic Sensor for Sub-nM Mercury (II) Detection //Photonic Sensors. – 2021. – P. 1-8.

62. Cai S., Pan H., González-Vila Á., Guo T., Gillan D.C., Wattiez R., Caucheteur C. Selective detection of cadmium ions using plasmonic optical fiber gratings functionalized with bacteria //Optics Express. – 2020. – V. 28. – No. 13. – P. 19740-19749.

63. Zhao J., Wang H., Sun X. Study on the performance of polarization maintaining fiber temperature sensor based on tilted fiber grating //Measurement. – 2021. – V. 168. – P. 108421.

64. Lobry M., Loyez M., Hassan E.M., Chah K., DeRosa M.C., Goormaghtigh E., Caucheteur C. Multimodal plasmonic optical fiber grating aptasensor //Optics express. – 2020. – V. 28. – No. 5. – P. 7539-7551.

65. Udos W., Ooi C.W., Tan S.H., Lim K.S., Ee Y.J., Ong K.C., Ahmad H. Label-free surface-plasmon resonance fiber grating biosensor for Hand-foot-mouth disease (EV-A71) detection //Optik. – 2021. – V. 228. – P. 166221.

66. Kipriksiz S. E., Yücel M. Tilted fiber Bragg grating design for a simultaneous measurement of temperature and strain //Optical and Quantum Electronics. – 2021. – V. 53. – No. 1. – P. 1-15.

67. Bandyopadhyay S., Shao L.Y., Chao W., Yan Z., Hong F., Wang G., Wang W. Highly efficient free-space fiber coupler with 45° tilted fiber grating to access remotely placed optical fiber sensors //Optics express. – 2020. – V. 28. – No. 11. – P. 16569-16578.

68. Yang H., Li Y., Li X. Intensity-modulated refractive index sensor based on the side modes of fiber Bragg grating //Optics Communications. – 2022. – V. 505. – P. 127319.

69. Ciężczyk S., Kisała P., Mroccka J. New parameters extracted from tilted fiber bragg grating spectra for the determination of the refractive index and cut-off wavelength //Sensors. – 2019. – V. 19. – No. 9. – P. 1964

70. Laffont G., Ferdinand P. Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry //Measurement Science and Technology. – 2001. – V. 12. – No. 7. – P. 765.

71. Kogelnik H. Filter response of nonuniform almost-periodic structures //Bell System Technical Journal. – 1976. – V. 55. – No. 1. – P. 109-126.

72. Hewlett S. J., Love J. D., Meltz G., Bailey T. J., Morey W. W. Coupling characteristics of photo-induced Bragg gratings in depressed-and matched-cladding fibre //Optical and quantum electronics. – 1996. – V. 28. – No. 11. – P. 1641-1654.

73. Hill K. O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview //Journal of lightwave technology. – 1997. – V. 15. – No. 8. – P. 1263-1276.
74. Strasser T. A., Pedrazzani J. R., Andrejco M. J. Reflective-mode conversion with UV-induced gratings in two-mode fiber //Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. – IEEE, 1997. – P. 348-349
75. Jiang S., Wang J., Sui Q. Distinguishable circumferential inclined direction tilt sensor based on fiber Bragg grating with wide measuring range and high accuracy //Optics Communications. – 2015. – V. 355. – P. 58-63.
76. Osuch T. et al. Coupling independent fiber optic tilt and temperature sensor based on chirped tapered fiber Bragg grating in double-pass configuration //Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – V. 252. – P. 76-81.
77. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology //Frontiers of Optoelectronics in China. – 2011. – V. 4. – P. 204-212
78. Jin Y., Dong X., Gong H., Shen C. Refractive-index sensor based on tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber //Microwave and Optical Technology Letters. – 2010. – V. 52. – No. 6. – P. 1375-1377.
79. Qian W., Chan C.C., Zhao C.L., Liu Y., Li T., Hu L., Dong X. Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating demodulation //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2012. – V. 166. – P. 761-765.
80. Yang H., Li Y., Li X. Intensity-modulated refractive index sensor based on the side modes of fiber Bragg grating //Optics Communications. – 2022. – V. 505. – P. 127319.
81. Jiang B., Bi Z., Wang S., Xi T., Zhou K., Zhang L., Zhao J. Cascaded tilted fiber Bragg grating for enhanced refractive index sensing //Chinese Physics B. – 2018. – V. 27. – No. 11. – P. 114220.
82. Ferdinand P., Magne S., Dewynter-Marty V., Rougeault S., Maurin, L. Applications of fiber Bragg grating sensors in the composite industry //MRS Bulletin. – 2002. – V. 27. – No. 5. – P. 400-407.
83. Волоконно-оптические датчики на брэгговских решетках [Электронды ресурс] URL: <https://monsol.ru/primenenie/baza-znaniy/poleznye-stati/statya-1/>
84. Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors //Laser & Photonics Reviews. – 2013. – V. 7. – No. 1. – P. 83-108.S.
85. Hewlett S.J., Love J.D., Meltz G., Bailey T.J., Morey W.W. Cladding-mode coupling characteristics of Bragg gratings in depressed-cladding fibre //electronics Letters. – 1995. – V. 31. – No. 10. – P. 820-822.
86. Walker R.B., Mihailov S.J., Lu P., Grobnc D. Shaping the radiation field of tilted fiber Bragg gratings //JOSA B. – 2005. – V. 22. – No. 5. – P. 962-974.
87. Chen C., Caucheteur C., Mégret P., Albert J. The sensitivity characteristics of tilted fibre Bragg grating sensors with different cladding thicknesses //Measurement Science and Technology. – 2007. – V. 18. – No. 10. – P. 3117.
88. Qian W., Chan C.C., Zhao C.L., Liu Y., Li T., Hu L., Dong X. Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating demodulation //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2012. – V. 166. – P. 761-765.

89. Miao Y., Liu B., Zhang H., Li Y., Zhou H., Sun H., Zhao Q. Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating //IEEE Photonics technology letters. – 2009. – V. 21. – No. 7. – P. 441-443.
90. Guo Y., Li C., Zhou X., Jiang L., Liu H. Wide-range fiber Bragg grating tilt sensor based on a cam structure //IEEE Sensors Journal. – 2020. – V. 20. – No. 9. – P. 4740-4748.
91. Jiang B., Lu X., Mao D., Wang Y., Zhang W., Gan X., Zhao J. Carbon nanotube-deposited tilted fiber Bragg grating for refractive index and temperature sensing //IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – V. 28. – No. 9. – P. 994-997.
92. Dong X., Zhang H., Liu B., Miao Y. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications //Photonic Sensors. – 2011. – V. 1. – No. 1. – P. 6-30.
93. Huy M.C.P., Laffont G., Dewynter V., Ferdinand P., Labonté L., Pagnoux D., Dussardier B. Tilted fiber Bragg grating photowritten in microstructured optical fiber for improved refractive index measurement //Optics Express. – 2006. – V. 14. – No. 22. – P. 10359-10370.
94. Brilland L., Pureur D., Bayon J.F., Delevaque E. Slanted gratings UV-written in photosensitive cladding fibre //Electronics Letters. – 1999. – V. 35. – No. 3. – P. 234-236.
95. Battiato J. M., Kostuk R. K. 45 slanted fibre Bragg grating design with prism coupled holographic exposure //Electronics Letters. – 2002. – V. 38. – No. 22. – P. 1.
96. Westbrook P.S., Strasser T.A., Erdogan T. In-line polarimeter using blazed fiber gratings //IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – V. 12. – No. 10. – P. 1352-1354.
97. Липская М.А., Ерішова М.Ө., Толегенова А.А., Жетписбаев К. Талшықты Брэг торының негізіндегі оптикалық сенсорлар//ҚазККА хабаршысы. – 2020. – №4(115). – 311-317 б.
98. Kisala P. Światłowodowe struktury periodyczne o pochyłonej modulacji współczynnika załamania: właściwości i zastosowania. – Люблин техникалық университетінің баспасы, 2019.
99. Hodgman Ch.D., Handbook of Chemistry and Physics, 40th edition. – Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio, 1959
100. Tolegenova A.A., Kisala P.A., Zhetpisbayeva A.T., Mamyrbayev O.Zh., Medetov B.Zh. Experimental determination of the characteristics of a transmission spectrum of tilted fiber Bragg gratings //Metrology and measurement systems. – 2019. – P. 581-589.
101. Толегенова А.А., Албанбай Н., Жетписбаева А.Т., Медетов Б.Ж., Исимова А.Т., Тайсариева Қ.Н. TFBG типтес оптогалшықтарды сенсор ретінде қолдану үшін қажетті спектрлік сипаттамаларды эксперимент жүзінде анықтау // Вестник КазННТУ, серия Технические науки. – 2019. - №4. – Б.55-60

Matlab бағдарламасында TFBG өткізу спектрлеріне есептеу жүргізеуге арналған листинг-код

```

N = 24; % Өлшеу саны

%Сыну көрсеткішінің мәндерін оқу
n = load('E:\PhD_Tolegenova\TFBG\n.txt');
n = n(1:N);

Ntr = 0.85; %сенсорлық спектр енін анықтауға арналған шектік мән
L = zeros(1, numel(n)); %сенсорлық спектр енін белгілеу
Min = zeros(1, numel(n)); %спектр минимумын белгілеу

Res = cell(2,2);
Deg = 8;

for idx = 1:2
    Bool = 1;
    if idx > 1
        Deg = 8;
    end;
    sPath = strcat('E:\PhD_Tolegenova\TFBG\' , mat2str(Deg), '\');

    sFileIn = strcat(sPath, 'SLD_00_15.txt');

    Sin = load(sFileIn); %SLD спектрін оқу

    for I=1:N
        J=I-1;

        if J > 15
            sFileIn = strcat(sPath, 'SLD_16_30.txt');
            Sin = load(sFileIn); % SLD спектрін оқу белгілеу        end;

        if J<10
            sN = strcat('W000', mat2str(J), '.csv');
        else
            sN = strcat('W00', mat2str(J), '.csv');
        end
        sFile = strcat(sPath, sN);
        Data = load(sFile);
        X = Data(:,1);

        %Өткізу спектрі
        Sout = Data(:,2);

        %Нормаланған спектр алу

```



```

Y=Sout./Sin;

if (Bool==1)
    figure();
    plot(X,Sin);
    title(strcat('Spectre of SLD for ', mat2str(Deg), ' degree'));
    xlabel('w');
    ylabel('P');

    figure();
    plot(X,Sout);
    title(strcat('Example of spectrum of TFBG for ', mat2str(Deg), ' degree'));
    xlabel('w');
    ylabel('P');

    figure();
    plot(X,Y);
    title(strcat('Example of Normalized Spectrum for ', mat2str(Deg), ' degree'));
    xlabel('w');
    ylabel('P');
    Bool = 0;
end;

```

%Спектрлік параметрлерді табу

```

Ind = find(Y<=Ntr);
if numel(Ind)>0
    YY = Y(Ind);
    XX = X(Ind);
    %Сенсорлық спектр ені
    L(I) = max(XX) - min(XX);
    %Спектр минимумы
    Min(I) = min(YY);
end;

```

end

%Графиктер тұрғызу

%сенсорлық спектр енін нүкте бойынша тұрғызу

```

figure();
plot(n,L, '*');

```

% аппроксимация жүргізу

```

LL=L';
[p,S] = polyfit(n, LL, 1);
a=p(2)
b=p(1)
Alym = sum((LL-b*n-a).^2);
Bolim = (N-2)*sum((n-mean(n)).^2);
Sb = sqrt(Alym/Bolim);
db = Sb*2.064;
Eps_b = abs(db/b)*100

```

```

Yp = p(1)*n + p(2);
hold on;
plot(n,Yp, 'r');
title(strcat('spectrum width for ', mat2str(Deg), ' degree'));
xlabel('n');
ylabel('\delta \omega');
hold off;
Res{idx,1} = Yp;

```

%спектр минимумын нүкте бойынша тұрғызу

```

figure();
plot(n,Min, '*');

```

%спектр минимумына аппроксимация жасау

```

p = polyfit(n, Min', 1);

```

```

Yp = p(1)*n + p(2);
hold on;
plot(n,Yp, 'r');
xlabel('n');
ylabel('min of \omega');
title(strcat('minimum of spectrum for ', mat2str(Deg), ' degree'));
hold off;
Res{idx,2} = Yp;
end;

```

```

figure();
plot(n, Res{1,1}, 'b', n, Res{2,1}, 'r');
title('spectrum width');
xlabel('n');
ylabel('\delta \omega');
hl1 = legend('6 degree', '8 degree');

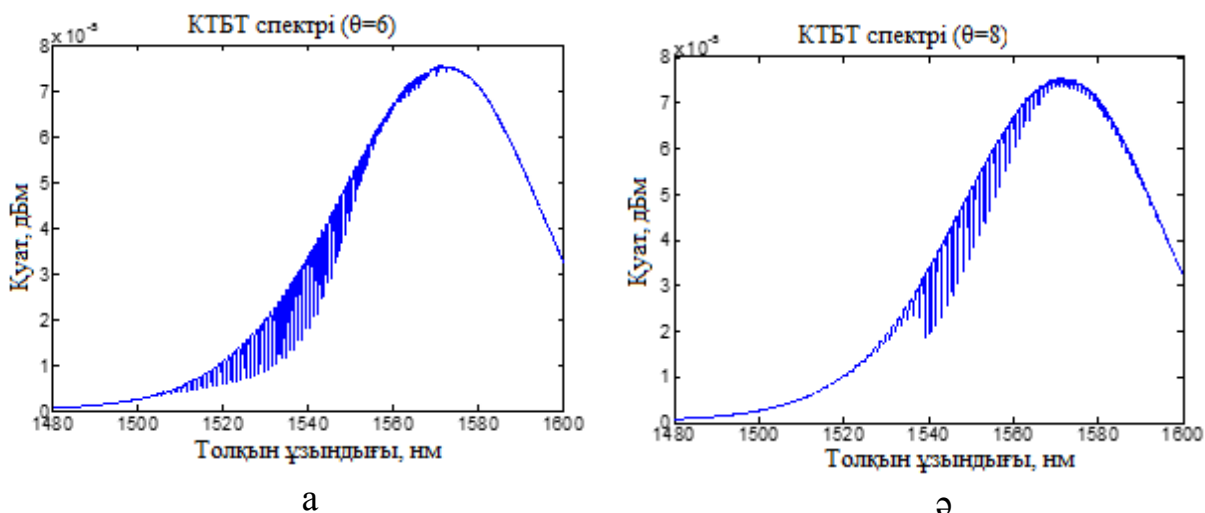
```

```

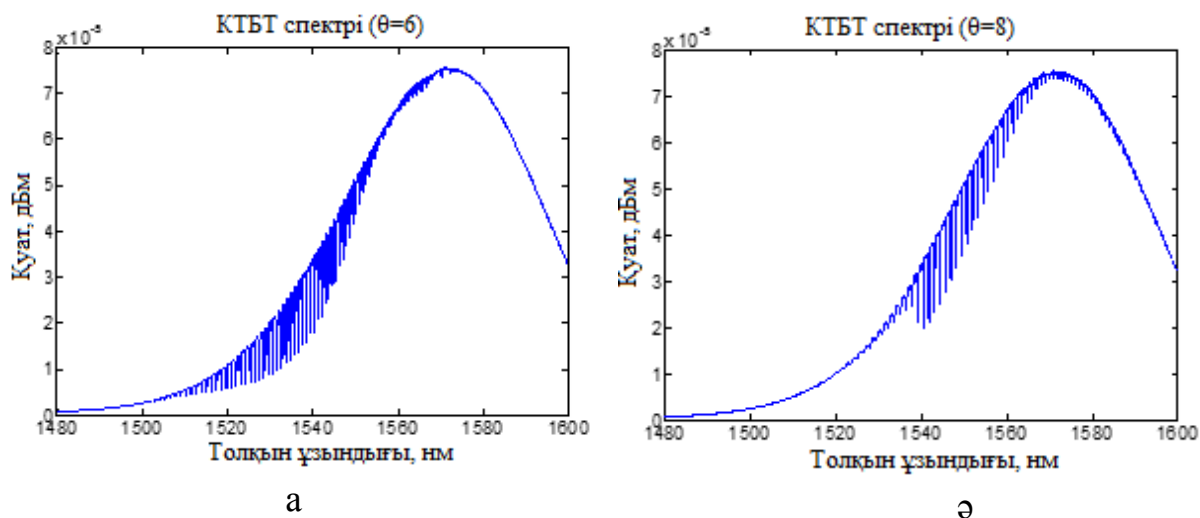
figure();
plot(n, Res{1,2}, 'b', n, Res{2,2}, 'r');
title('minimum of spectrum');
xlabel('n');
ylabel('min of \omega');
hl2 = legend('6 degree', '8 degree');

```

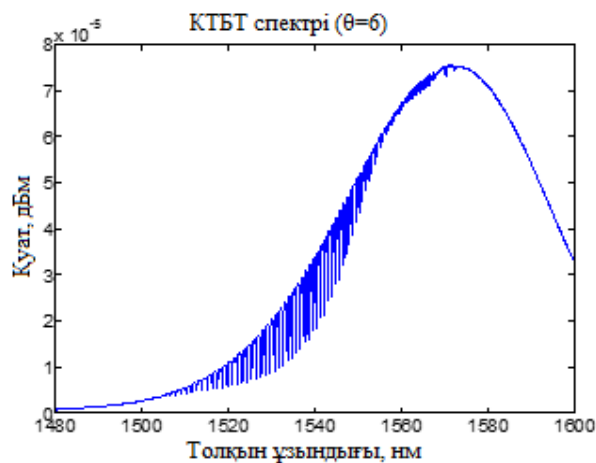
Көлбеу бұрыштары 6^0 және 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі



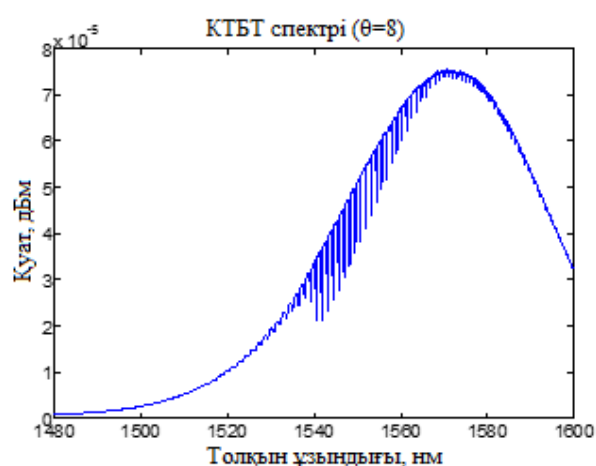
Сурет 81 – $n=1.3359$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі



Сурет 82 – $n=1.3374$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

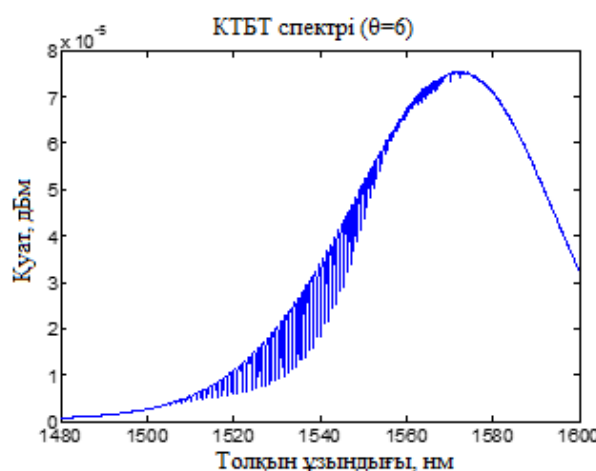


а

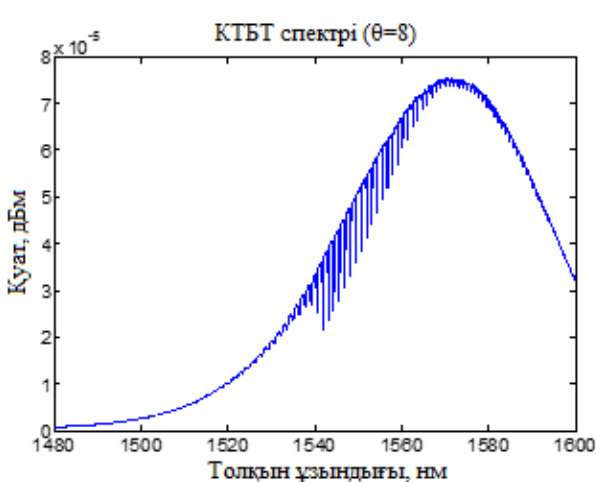


ә

Сурет 83 – $n=1.3388$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

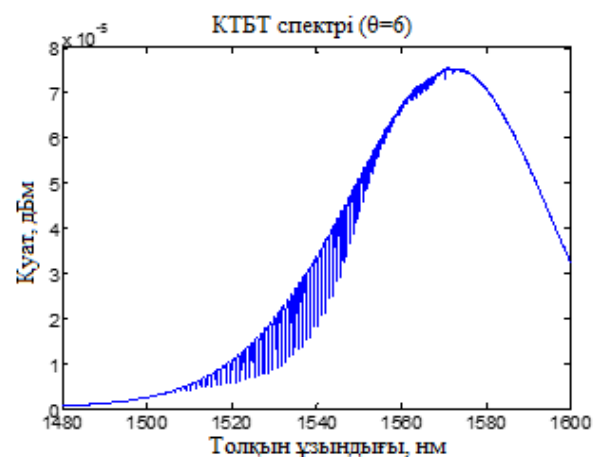


а

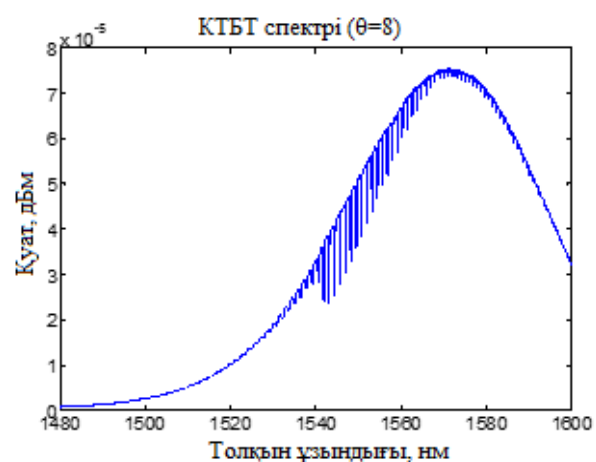


ә

Сурет 84 – $n=1.3403$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі $n=1.3403$

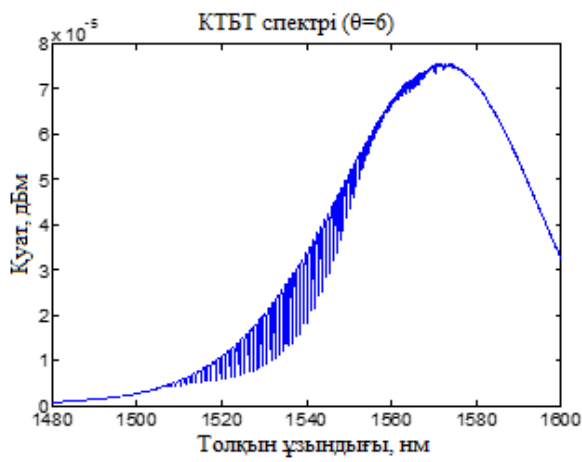


а

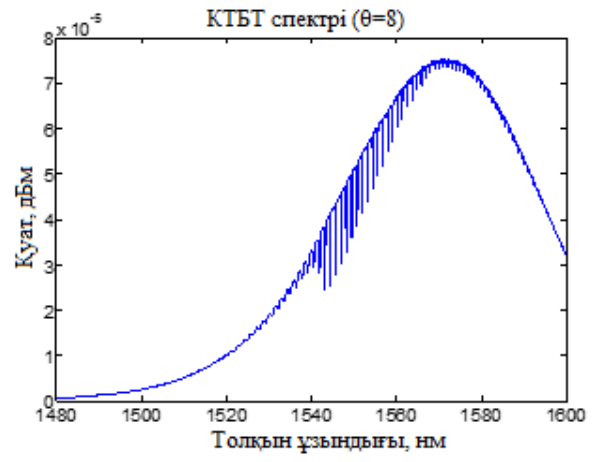


ә

Сурет 85 – $n=1.3418$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі $n=1.3418$

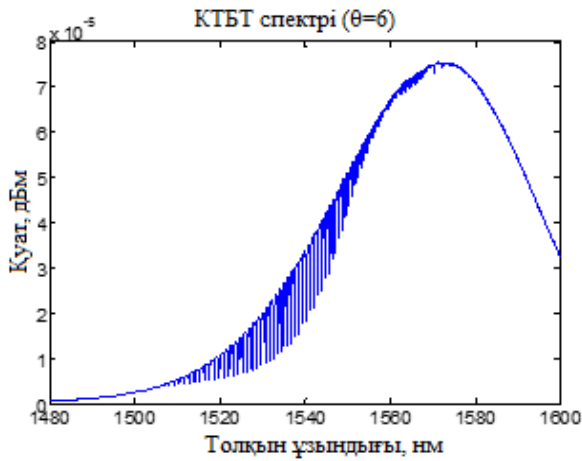


а

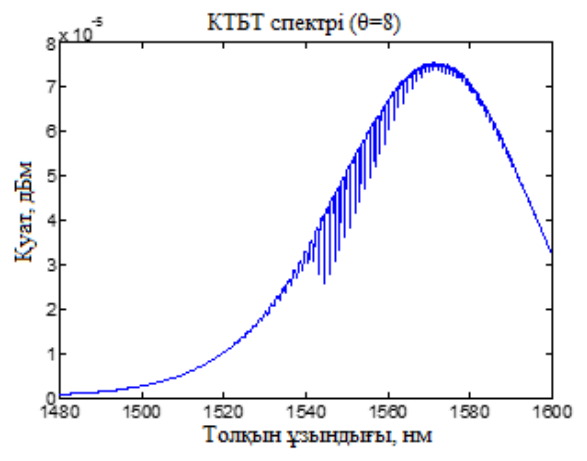


б

Сурет 86 – $n=1.3433$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

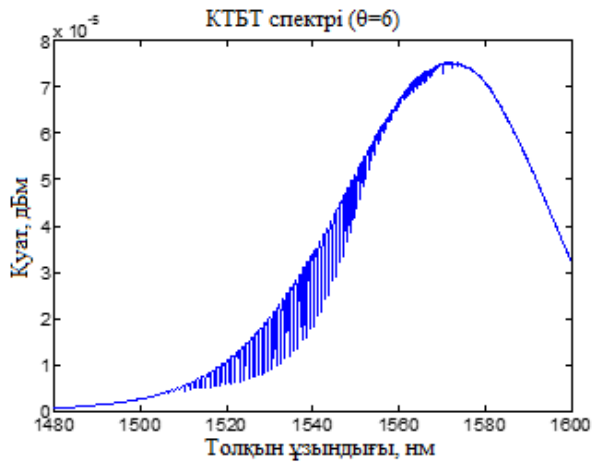


а

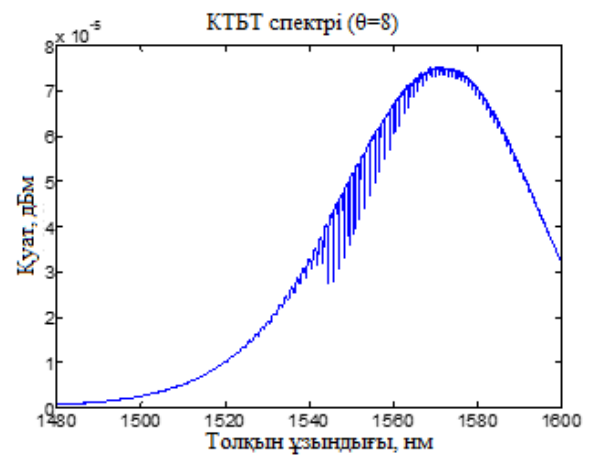


б

Сурет 87 – $n=1.3448$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

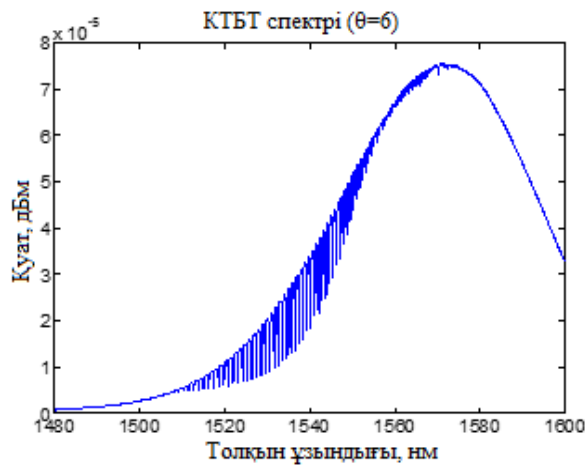


а

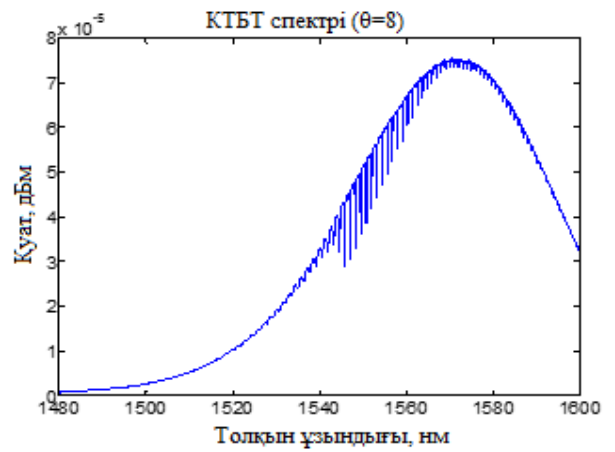


б

Сурет 88 – $n=1.3464$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

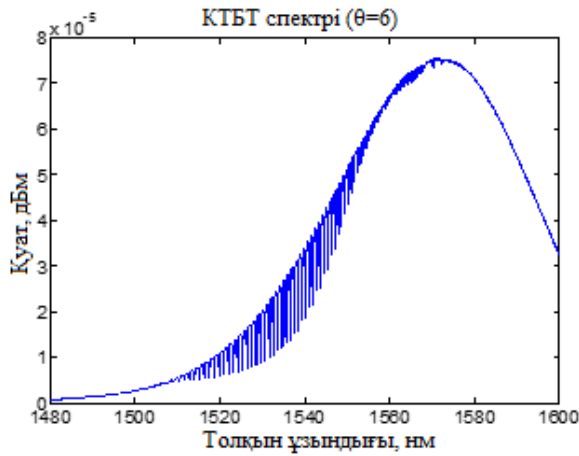


а

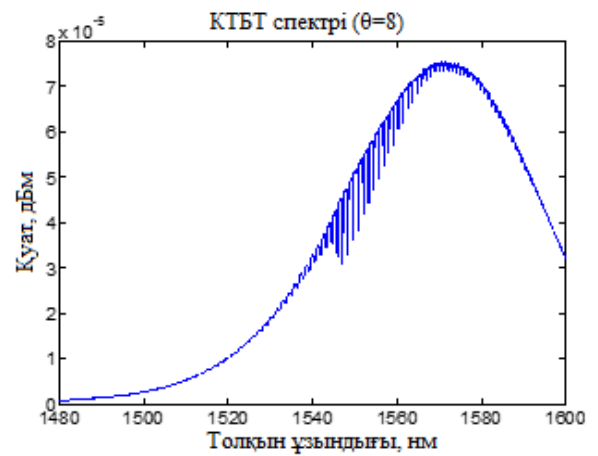


б

Сурет 89 – $n=1.3479$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

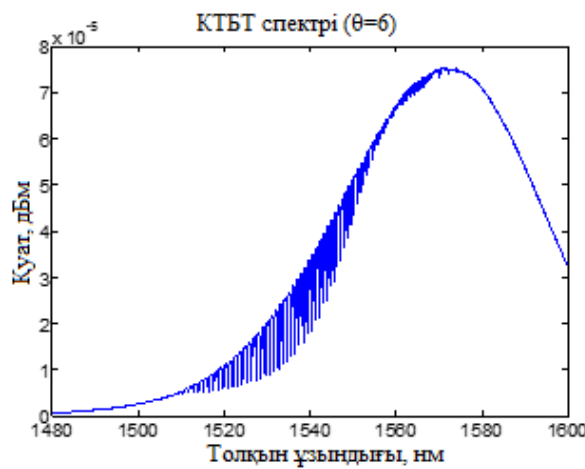


а

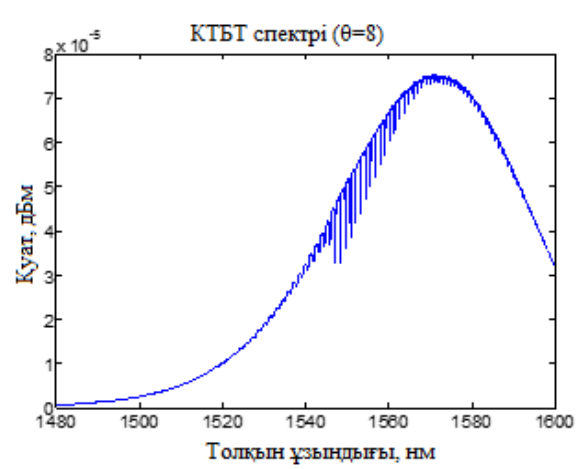


б

Сурет 90 – $n=1.3494$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

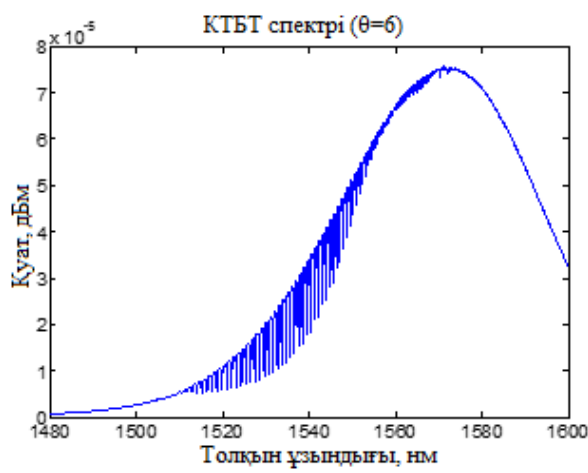


а

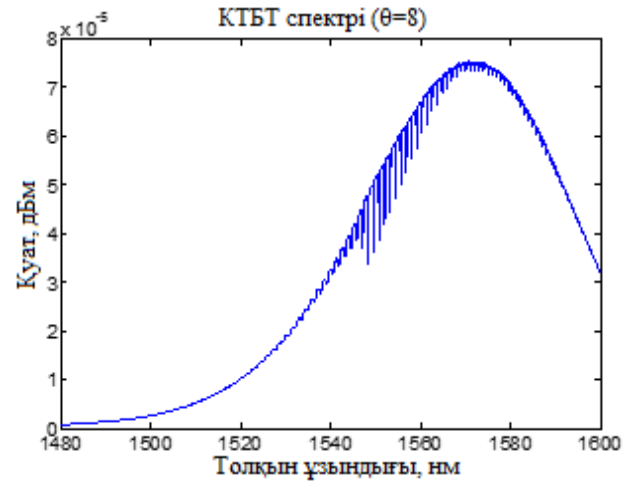


б

Сурет 91 – $n=1.3510$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

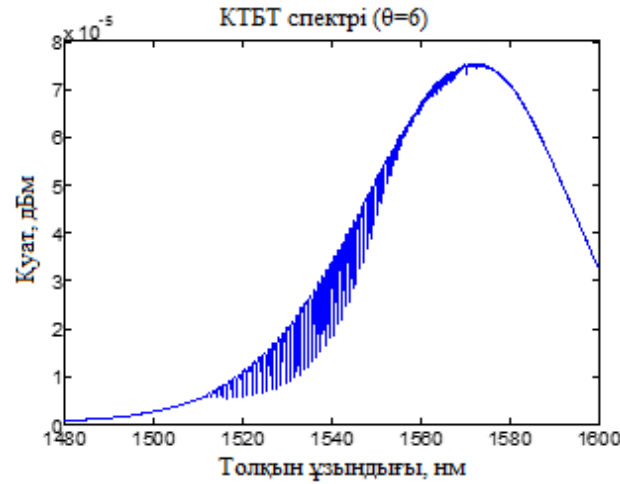


а

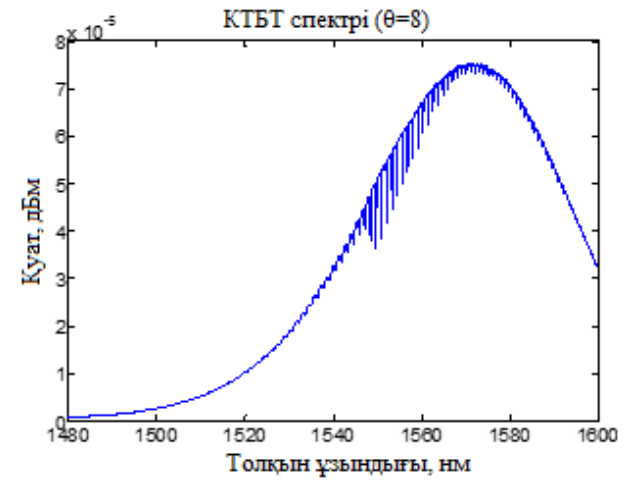


ә

Сурет 92 – $n=1.3526$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

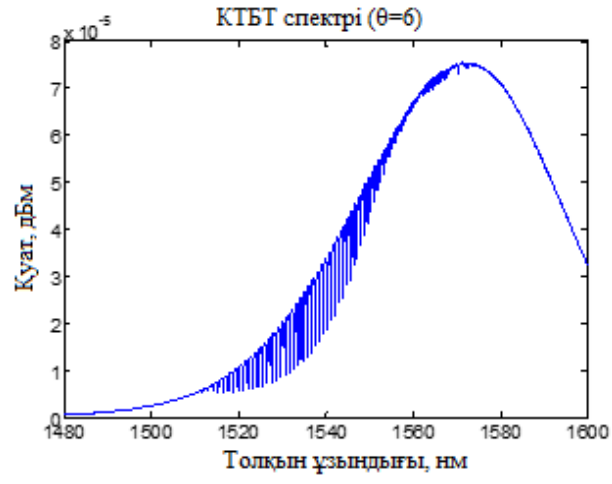


а

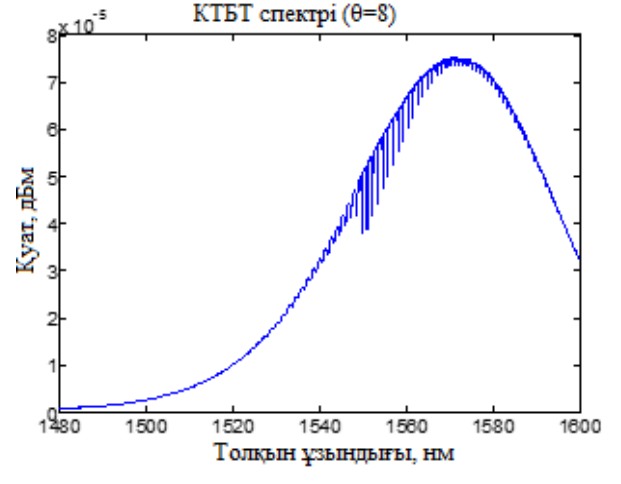


ә

Сурет 93 – $n=1.3541$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

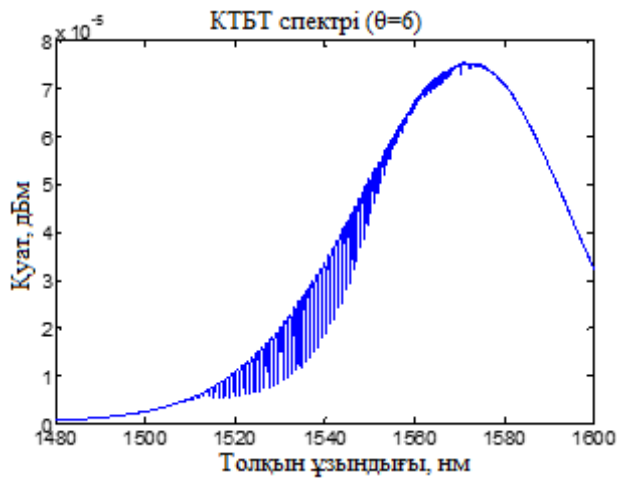


а

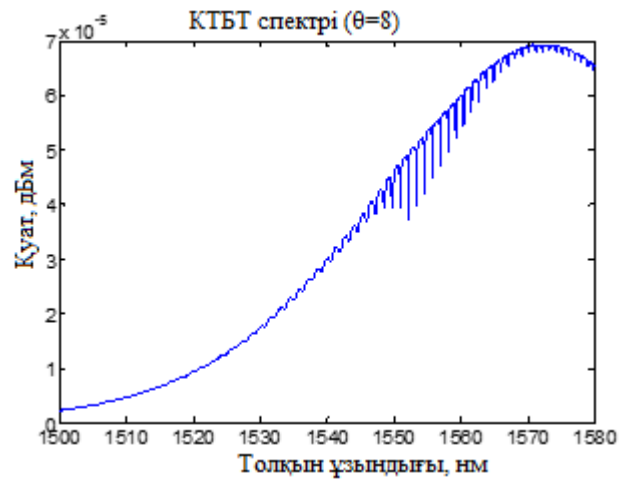


ә

Сурет 94 – $n=1.3557$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

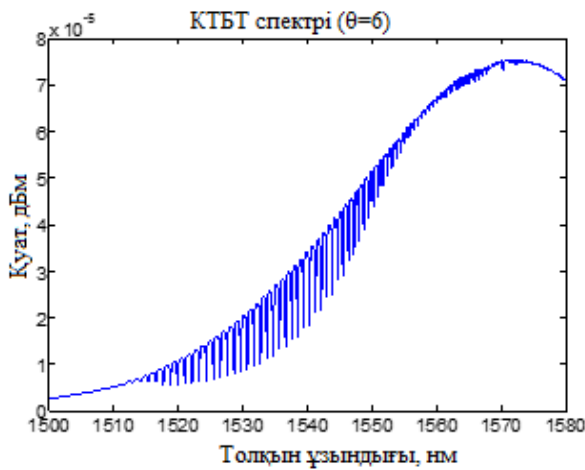


а

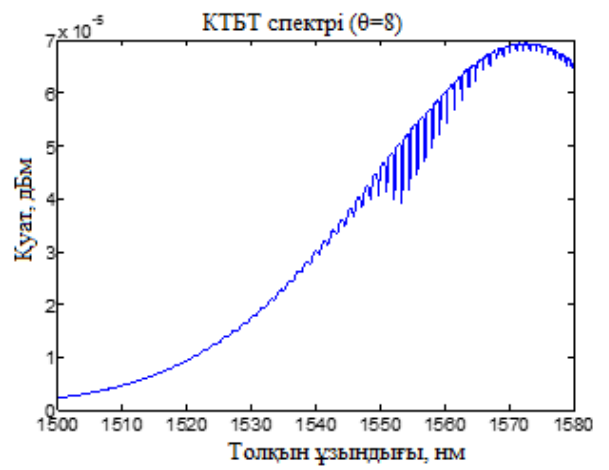


б

Сурет 95 – $n=1.3573$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

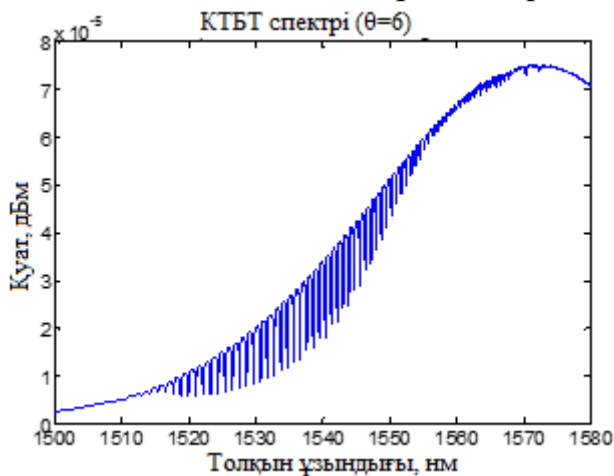


а

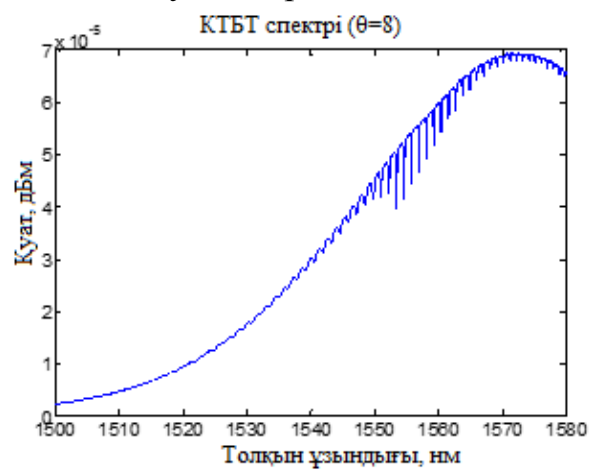


б

Сурет 96 – $n=1.3590$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

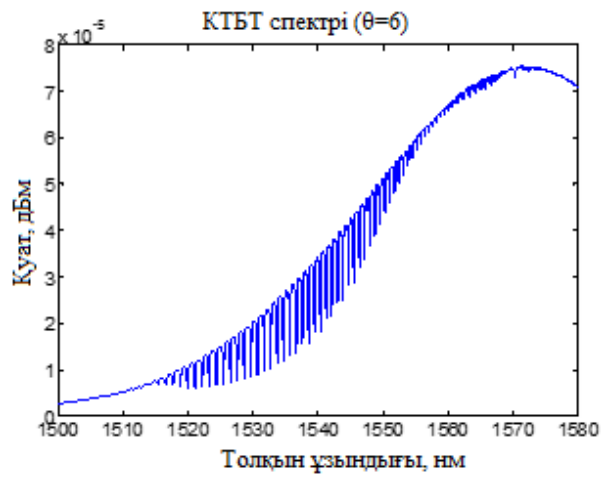


а

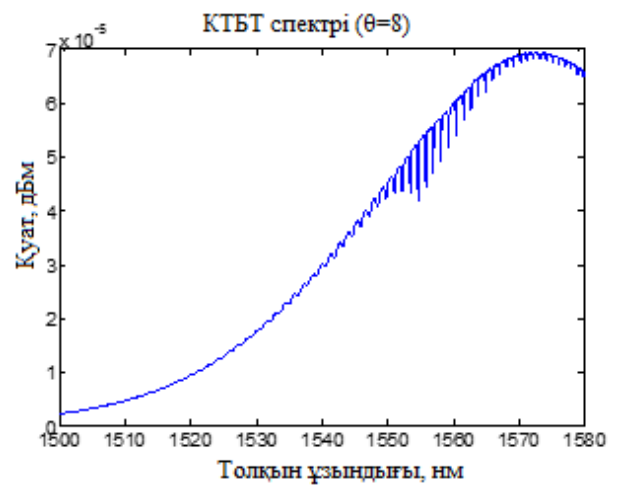


б

Сурет 97 – $n=1.3606$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

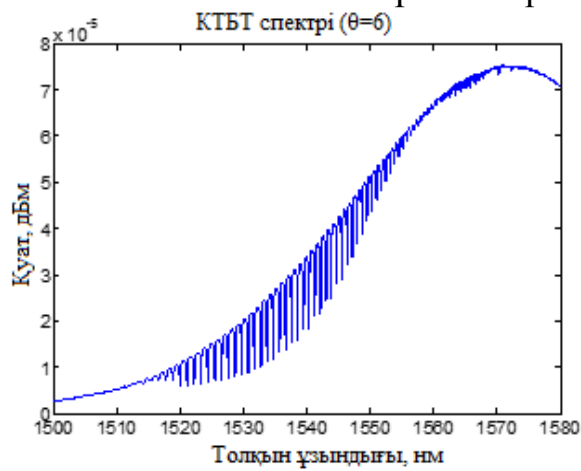


а

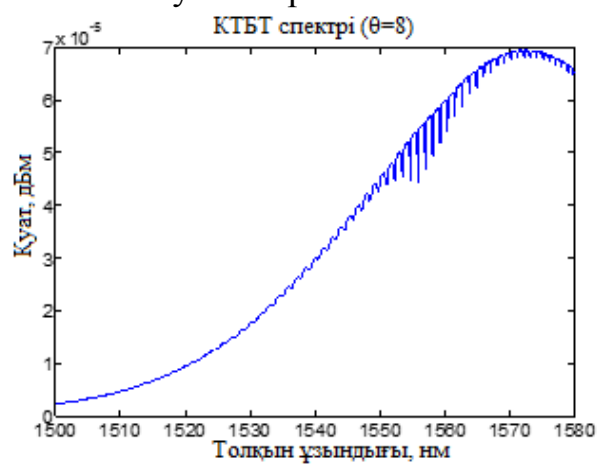


б

Сурет 98 – $n=1.3622$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

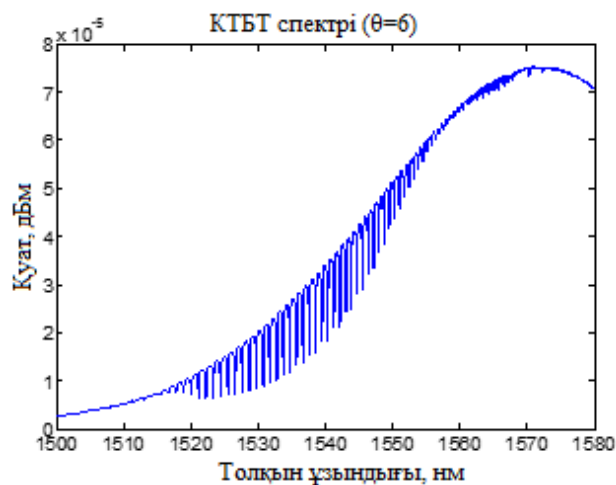


а

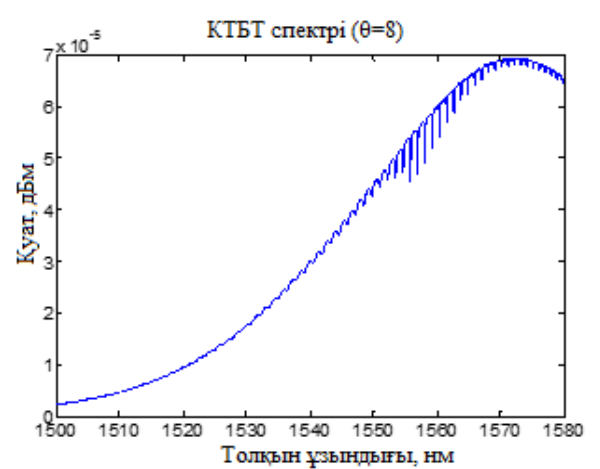


б

Сурет 99 – $n=1.3639$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

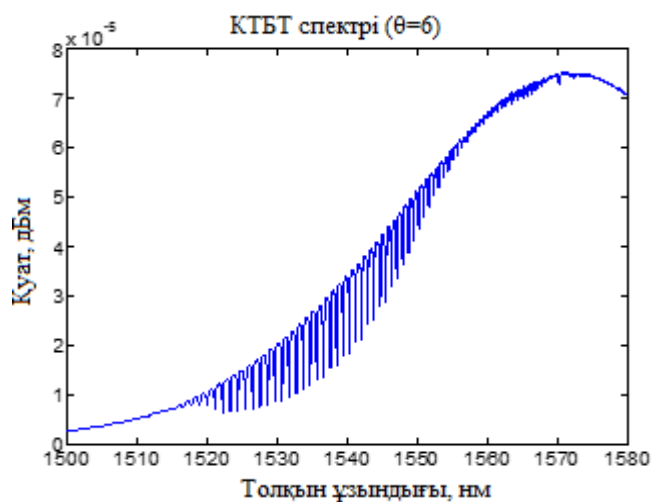


а

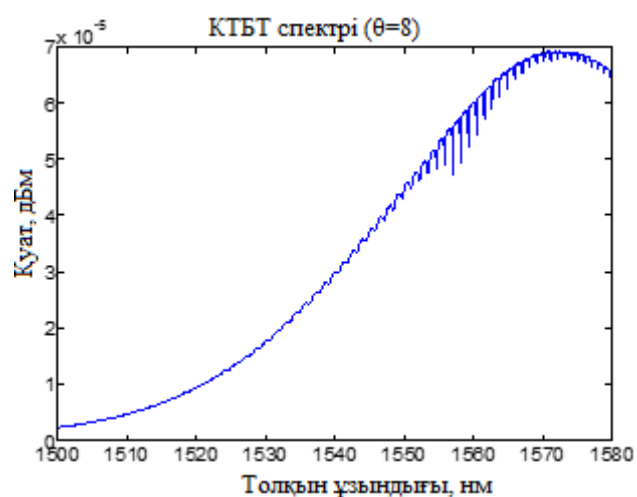


б

Сурет 100 – $n=1.3655$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

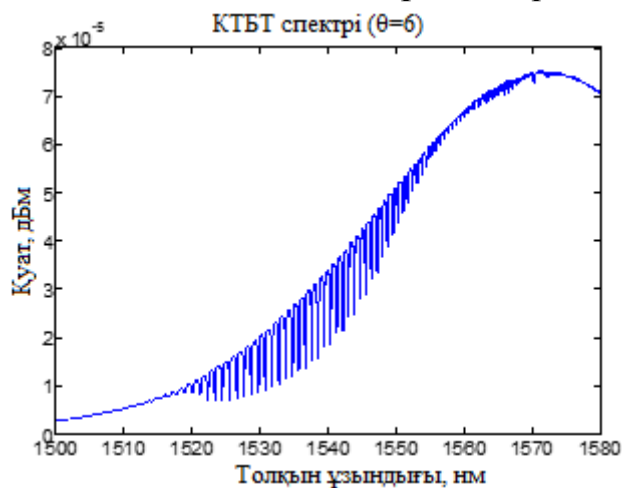


а

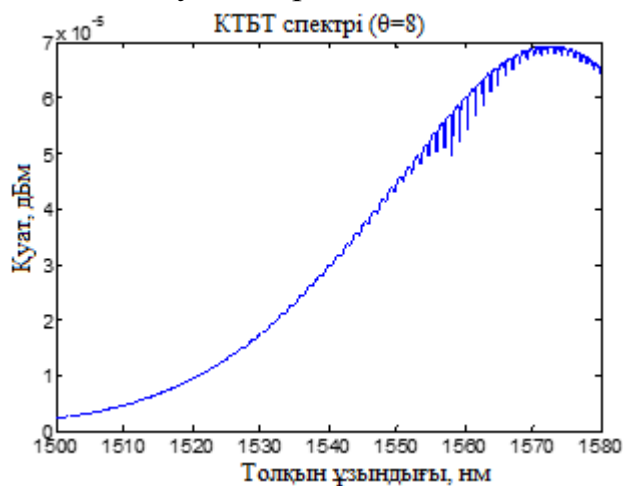


б

Сурет 101 – $n=1.3672$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

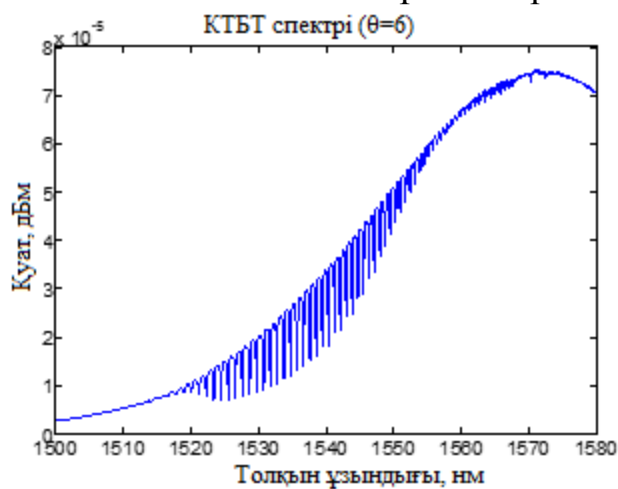


а

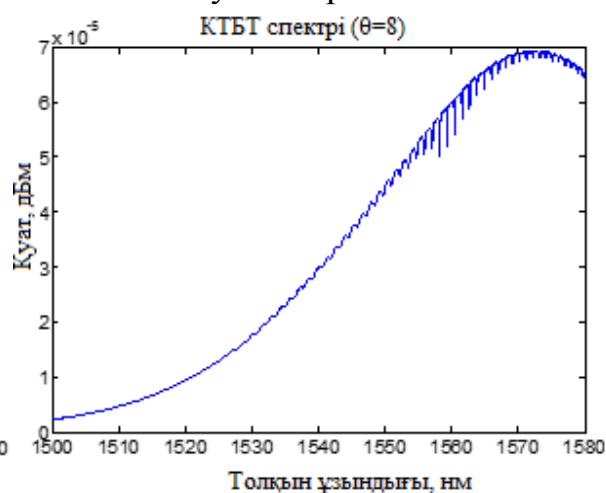


б

Сурет 102 – $n=1.3689$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі



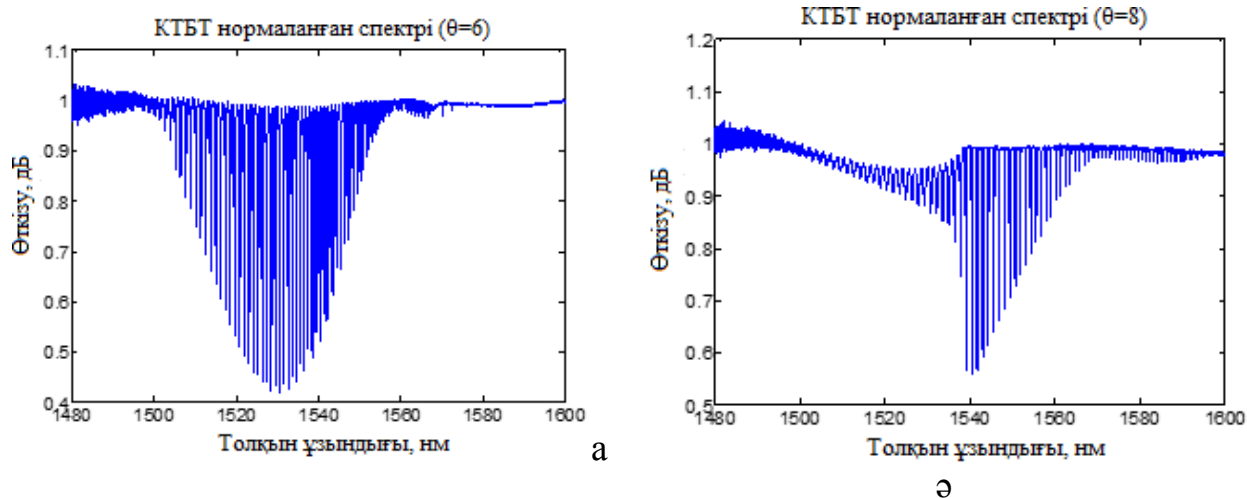
а



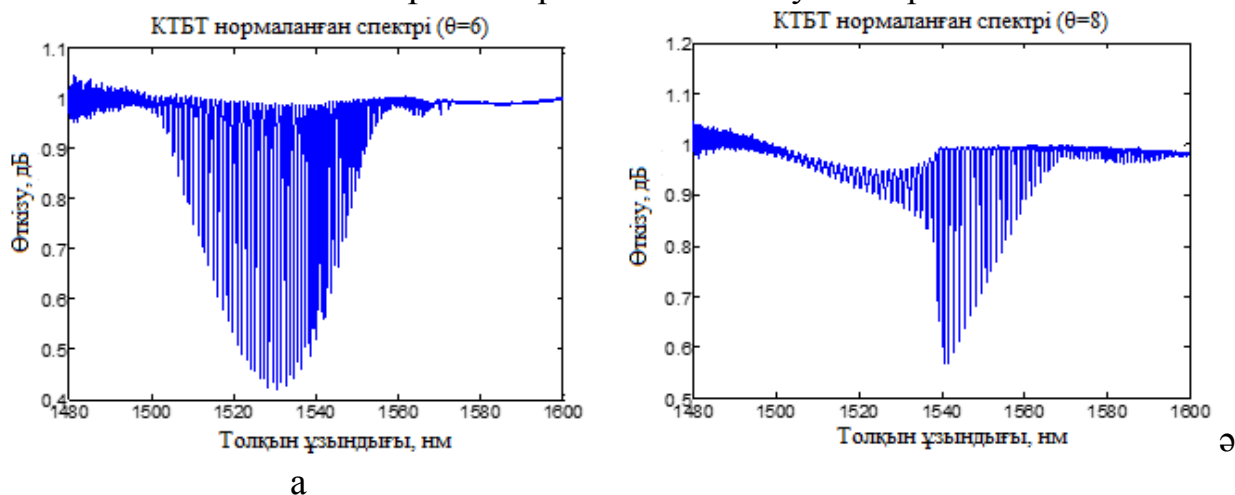
б

Сурет 103 – $n=1.3706$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (б) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланбаған өткізу спектрі

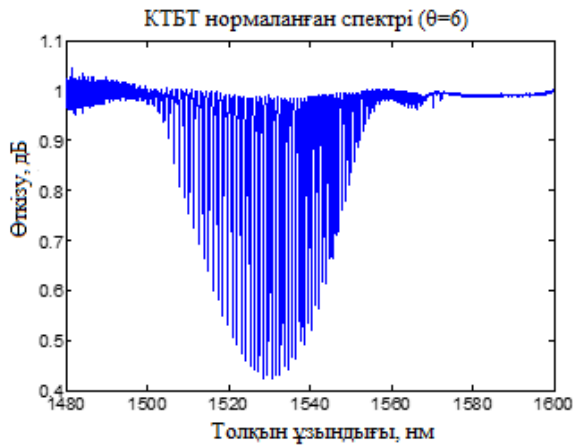
Көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі



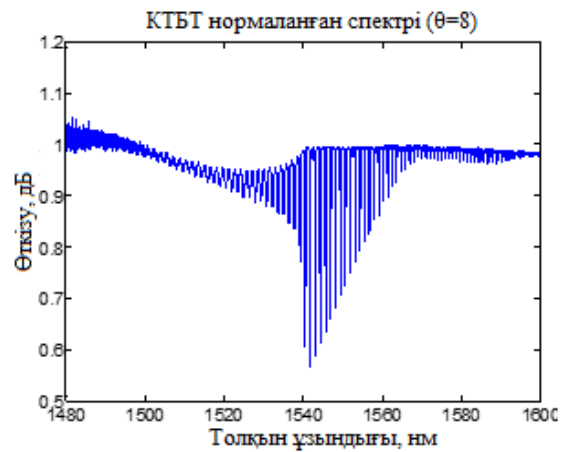
Сурет 104 – $n=1.3359$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі



Сурет 105 – $n=1.3374$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

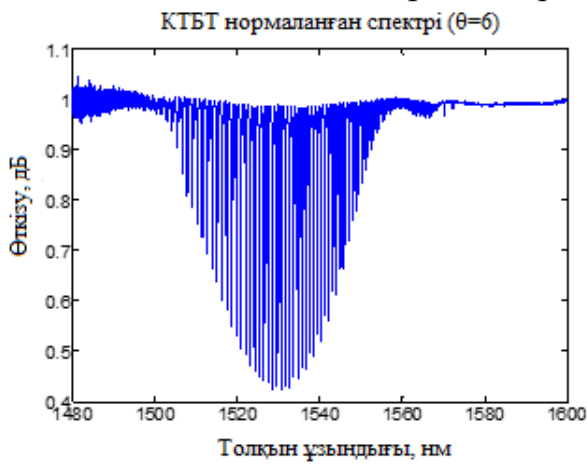


а

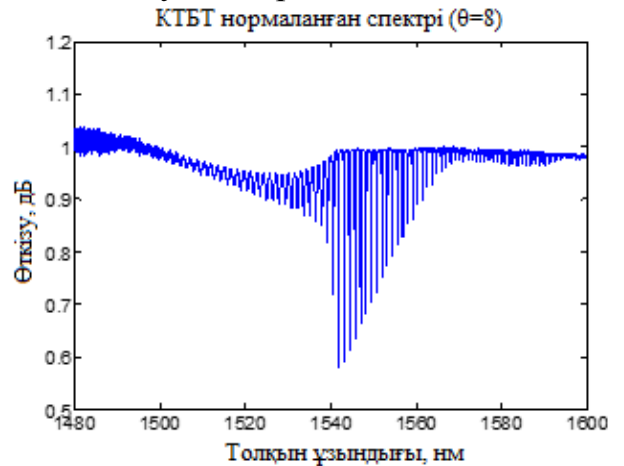


ә

Сурет 106 – $n=1.3388$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

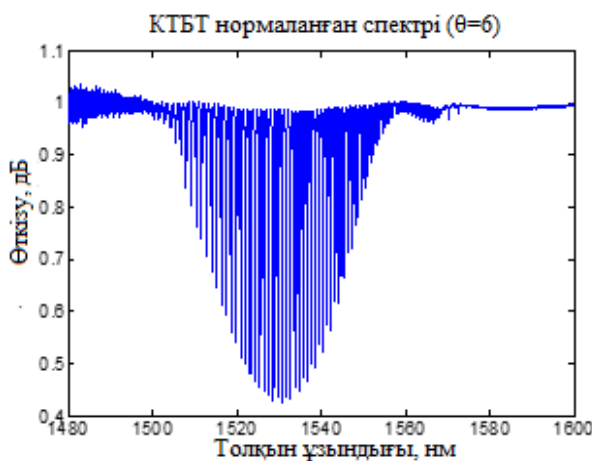


а

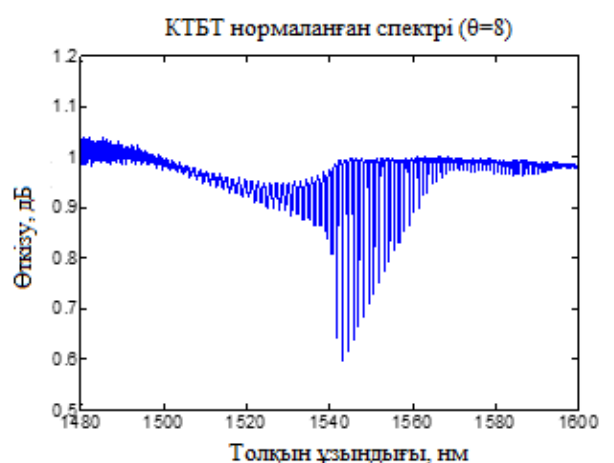


ә

Сурет 107 – $n=1.3403$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

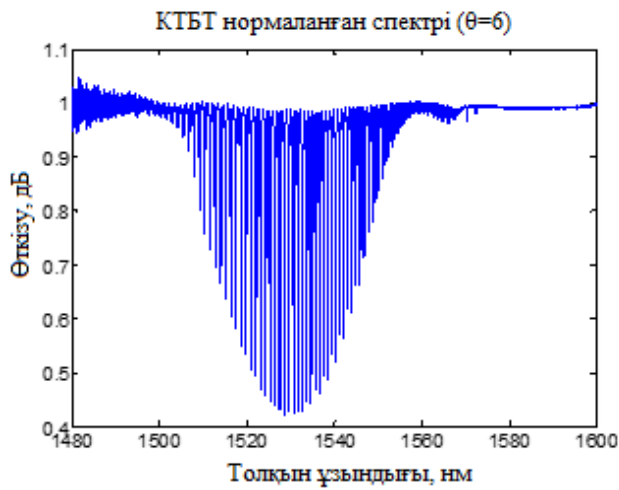


а

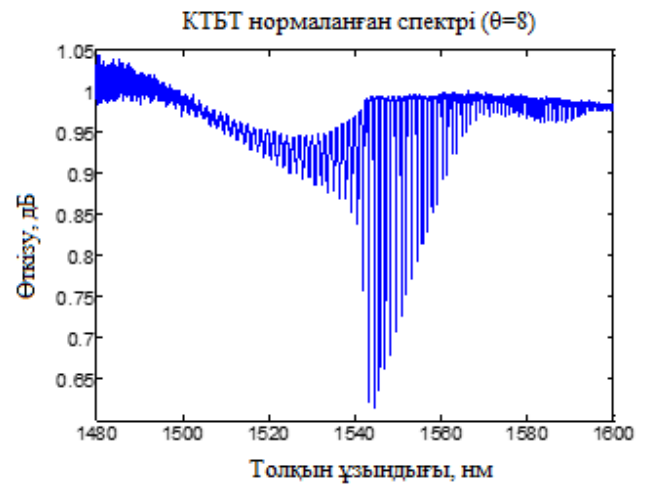


ә

Сурет 108 – $n=1.3418$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі $n=1.3418$

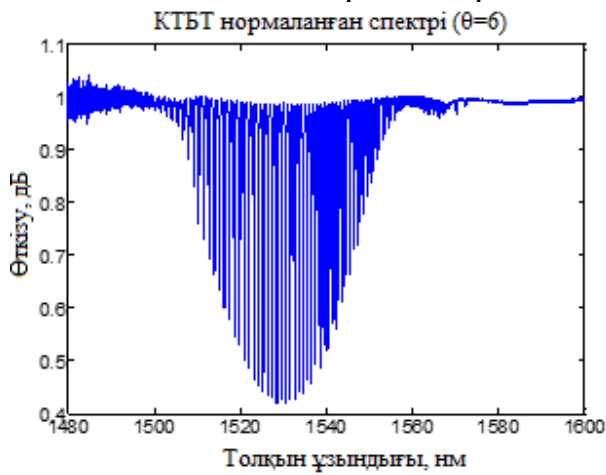


а

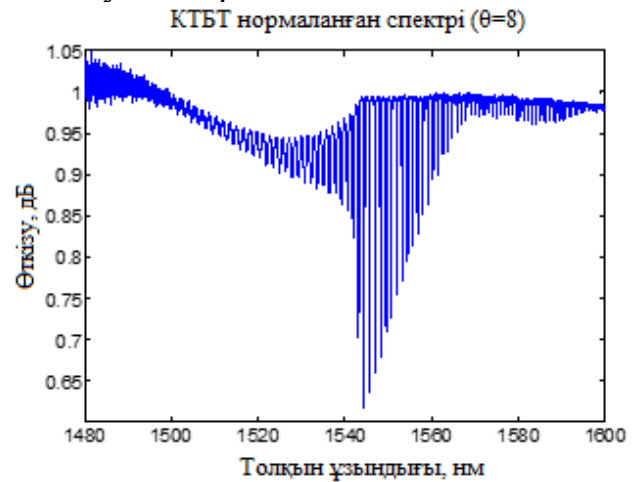


ә

Сурет 109 – $n=1.3433$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі $n=1.3433$

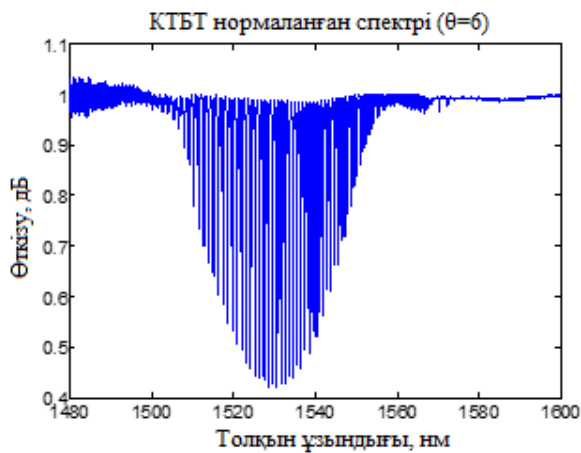


а

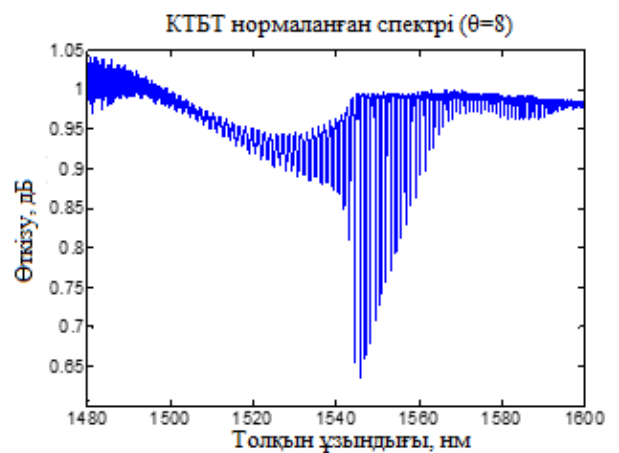


ә

Сурет 110 – $n=1.3448$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

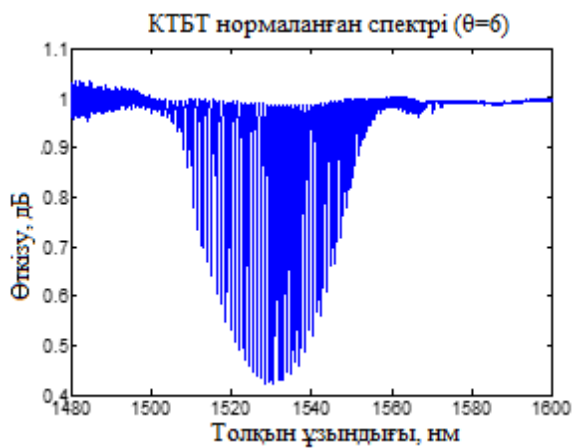


а

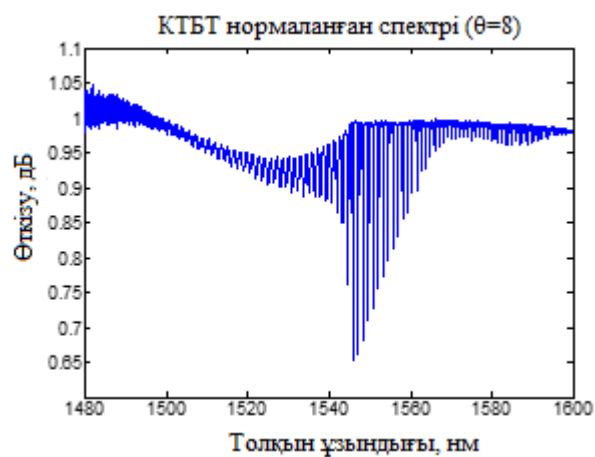


ә

Сурет 111 – $n=1.3464$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

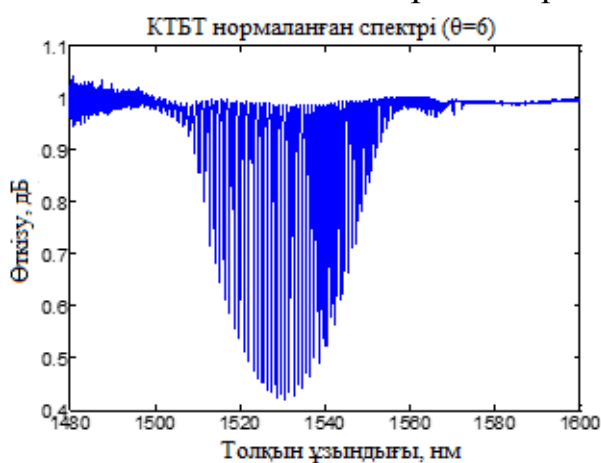


а

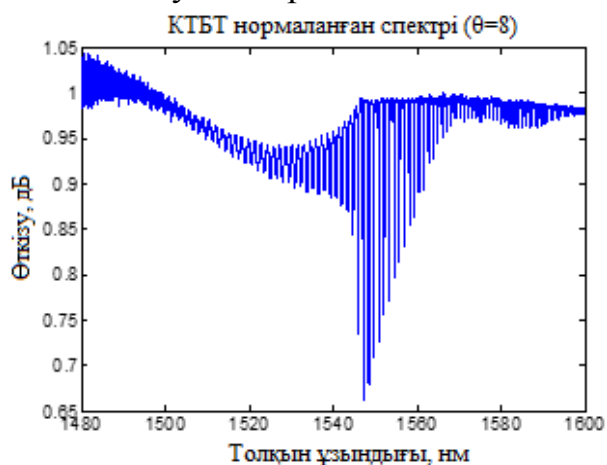


ә

Сурет 112 – $n=1.3479$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

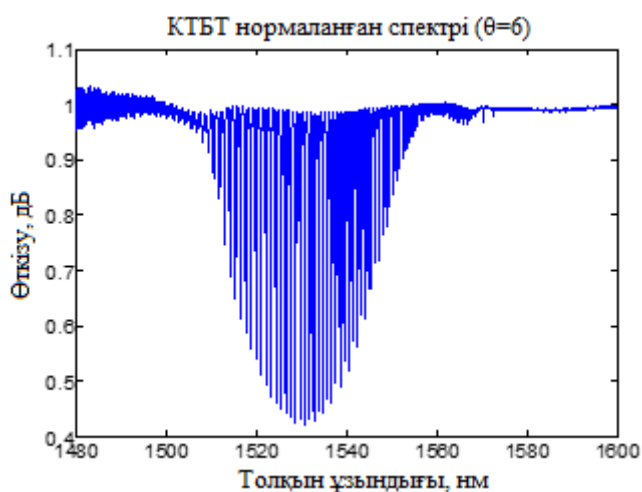


а

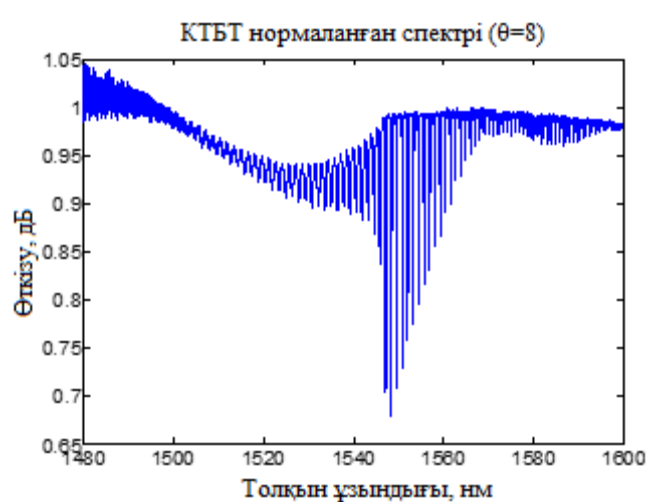


ә

Сурет 113 – $n=1.3494$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

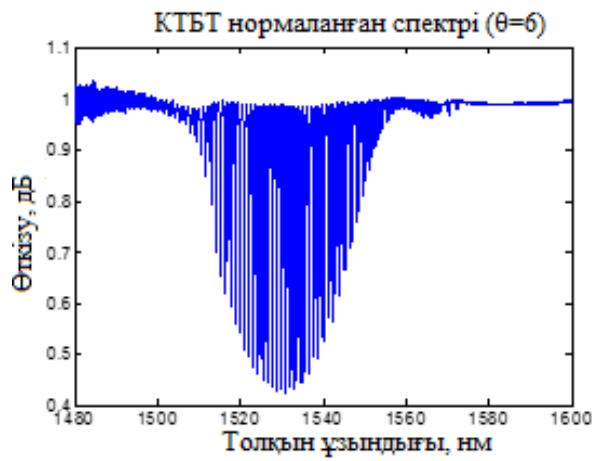


а

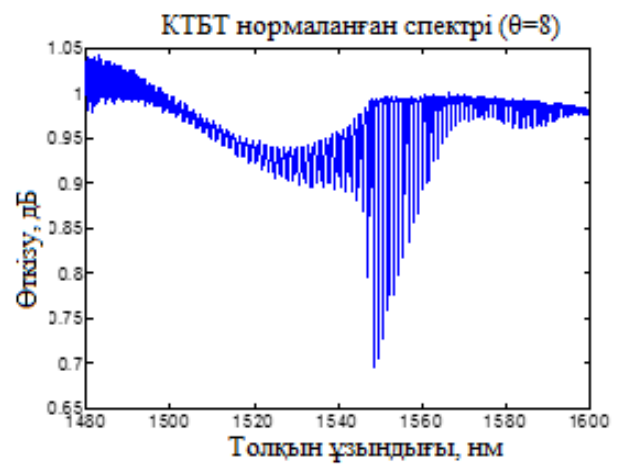


ә

Сурет 114 – $n=1.3510$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

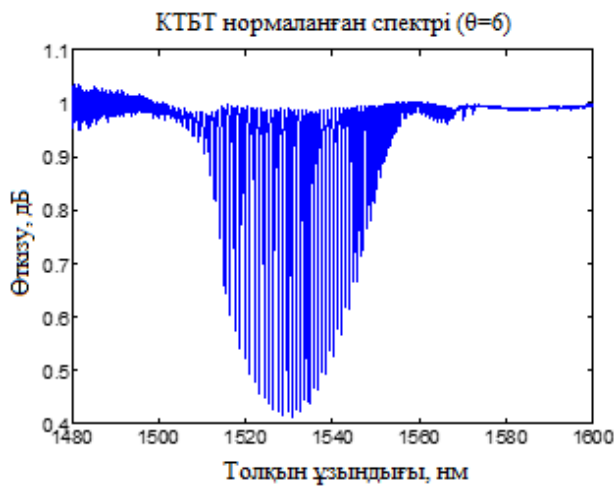


а

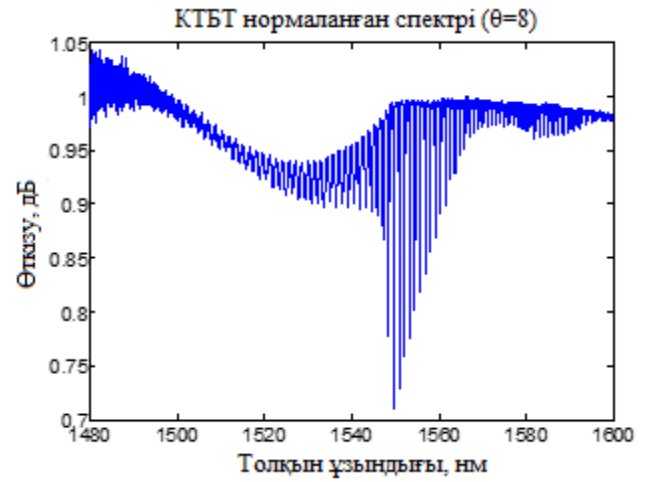


ә

Сурет 115 – $n=1.3526$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

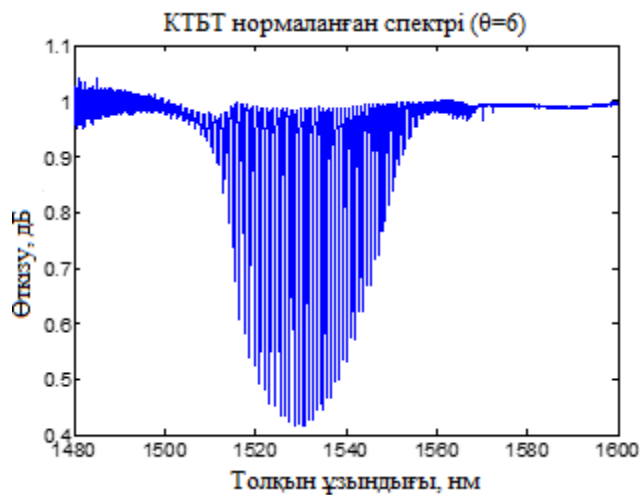


а

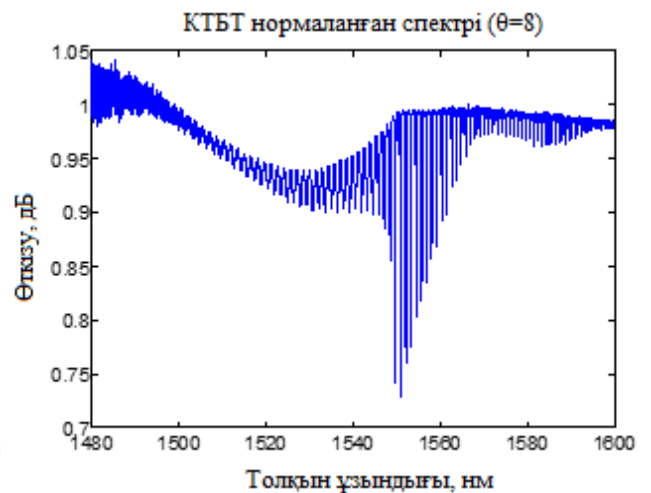


ә

Сурет 116 – $n=1.3541$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

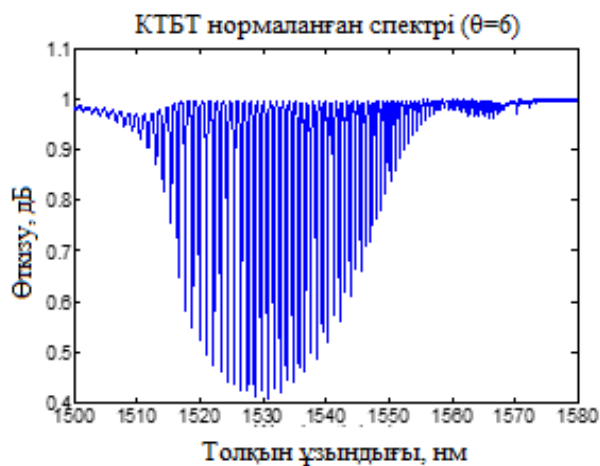


а

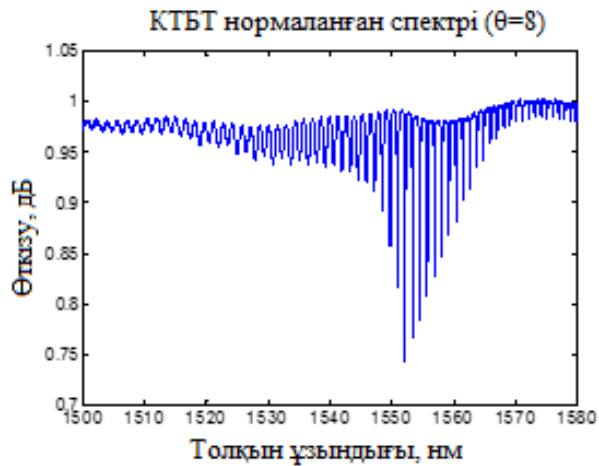


ә

Сурет 117 – $n=1.3557$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

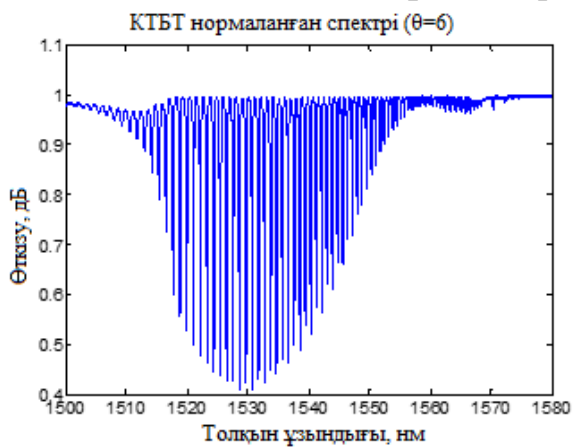


а

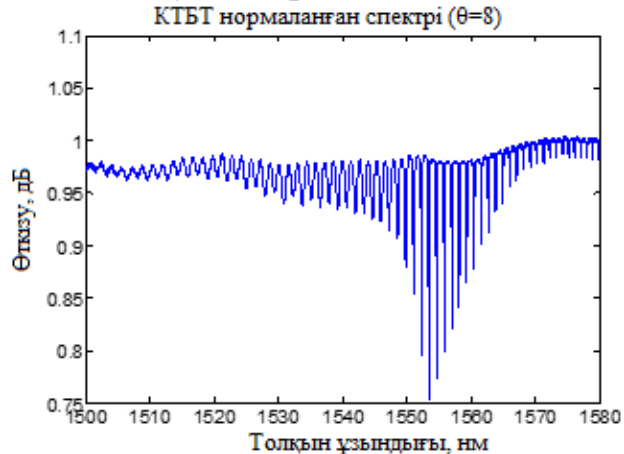


б

Сурет 118 – $n=1.3573$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

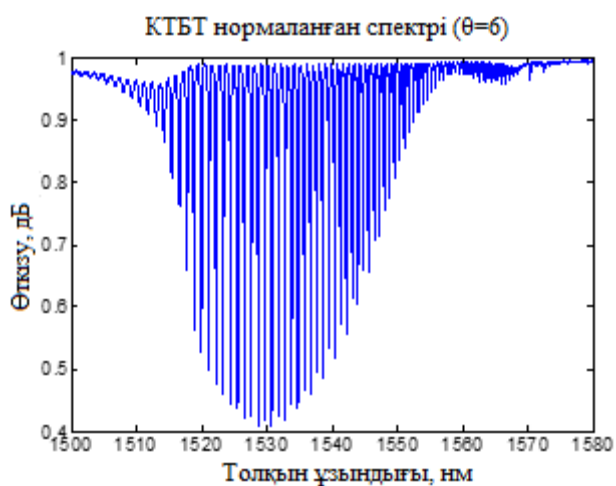


а

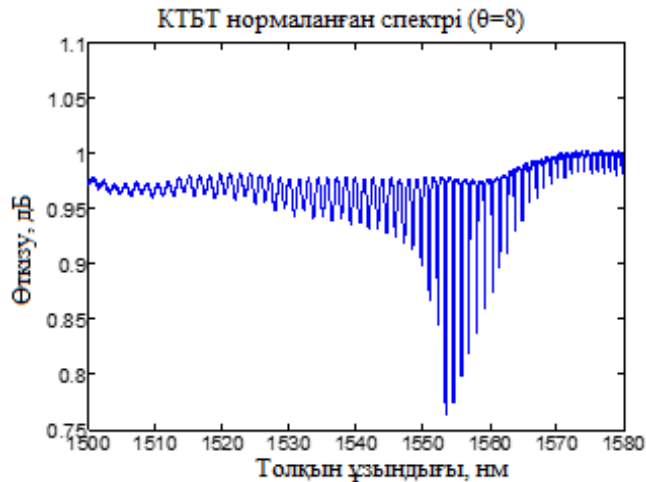


б

Сурет 119 – $n=1.3590$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

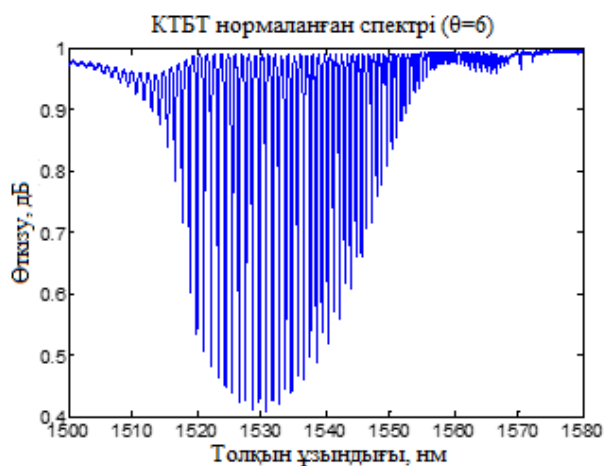


а

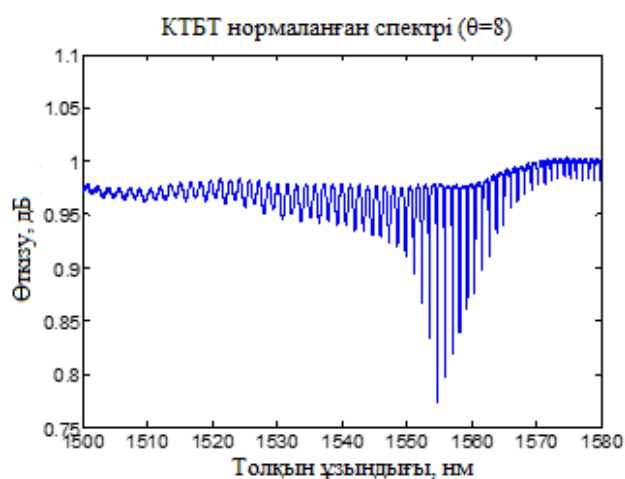


б

Сурет 120 – $n=1.3606$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (б) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

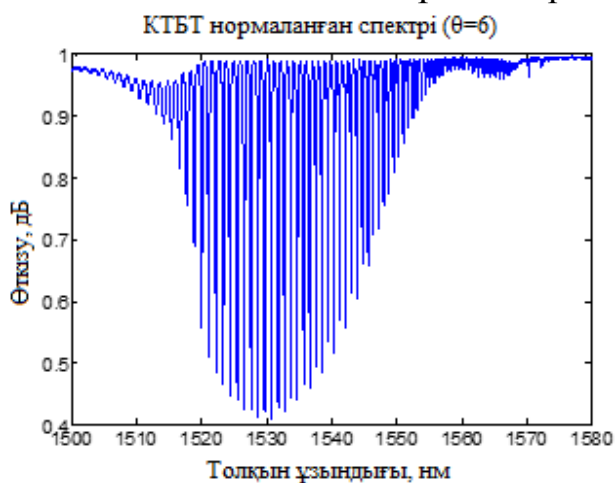


а

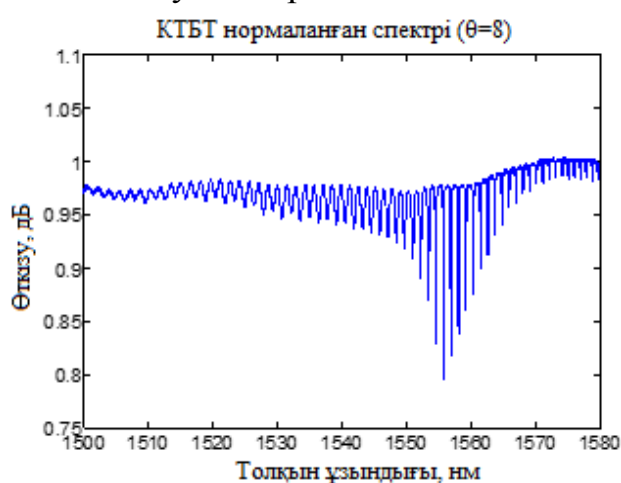


ә

Сурет 121 – $n=1.3622$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

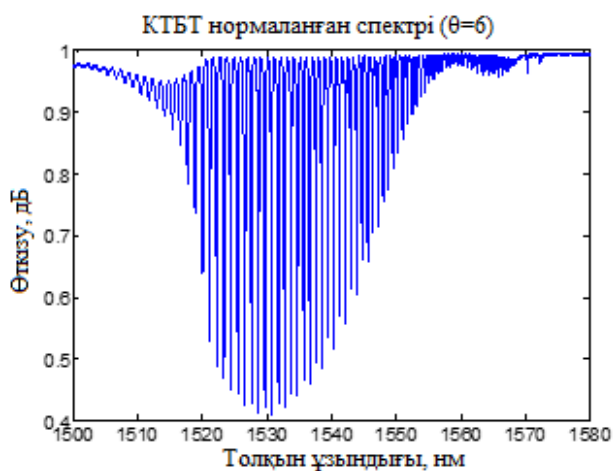


а

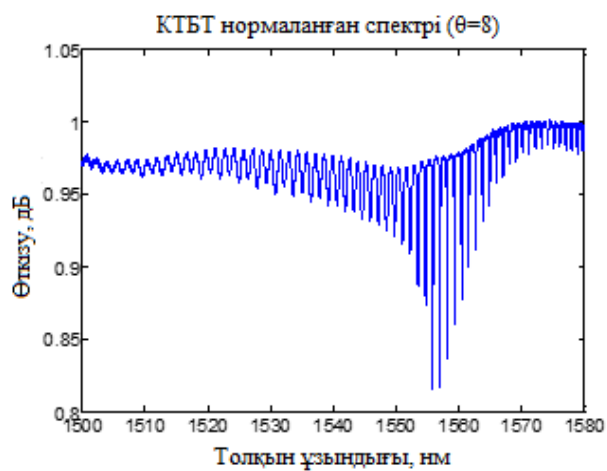


ә

Сурет 122 – $n=1.3639$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

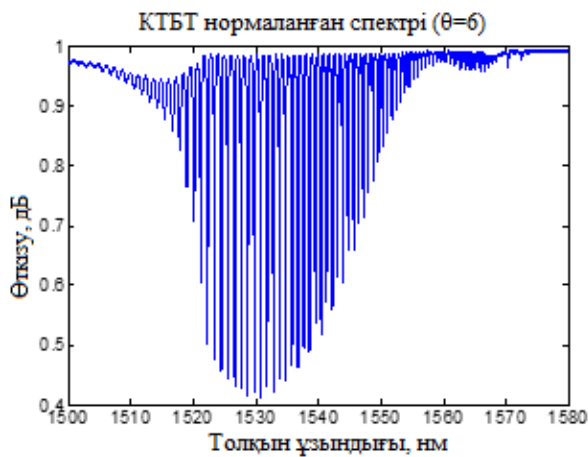


а

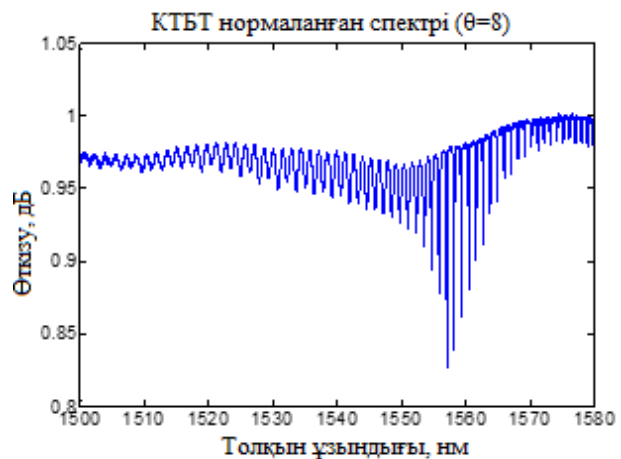


ә

Сурет 123 – $n=1.3655$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6^0 және (ә) 8^0 болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

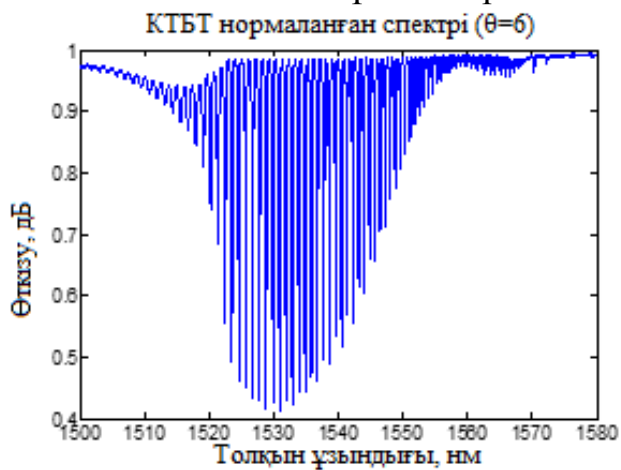


а

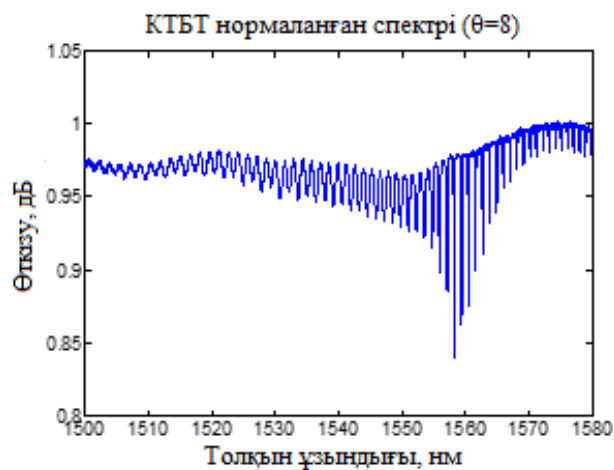


ә

Сурет 124 – $n=1.3672$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (ә) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі $n=1.3672$

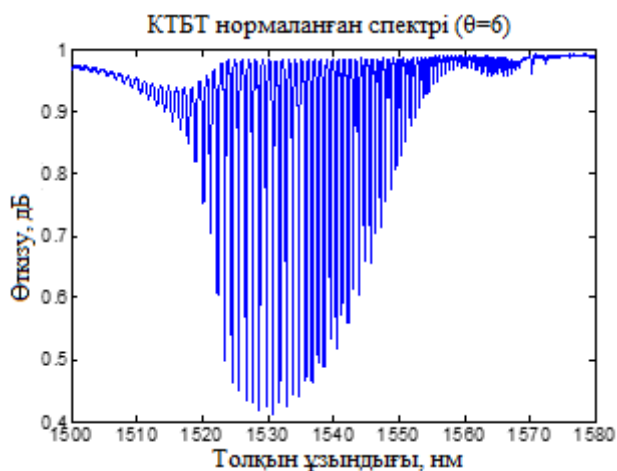


а

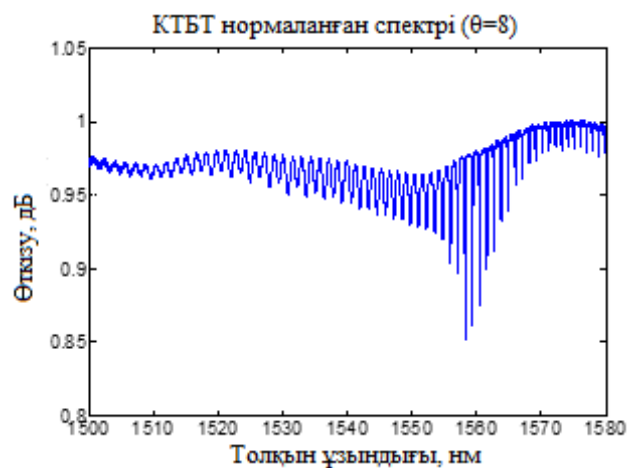


ә

Сурет 125 – $n=1.3689$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (ә) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі $n=1.3689$



а



ә

Сурет 126 – $n=1.3706$ кезінде көлбеу бұрыштары (а) 6° және (ә) 8° болатын TFBG үшін нормаланған өткізу спектрі

