

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

ӘОЖ 681.7.068.4.072

Қолжазба құқығында

СМАЙЛОВ НУРЖИГИТ ҚҰРАЛБАЕВИЧ

**Талшықты – оптикалық Брэгг торы негізінде температура сенсорын
модельдеу және зерттеу**

6D071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілері
физика-математика
ғылымдарының кандидаты, доцент
Жунусов Қ.Х.
техника ғылымдарының докторы,
профессор Waldemar Wojcik

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2017

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР	4
АНЫҚТАМАЛАР	5
БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР	6
КІРІСПЕ	7
1 БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНА ҚАТЫСТЫ ҒЫЛЫМИ ЕҢБЕКТЕРГЕ ШОЛУ	12
1.1 Зерттелген ғылыми жұмыстардың негізгі тақырыптары мен бағыттары	12
1.2 Талшықты Брэгг торының негізгі сипаттамасы	18
1.3 Брэгг торын жасауға қажетті материалдар мен технологиялар	23
1.4 Талшықты Брэгг торының жазылу жолдары мен әдістері	29
1.5 Брэгг торларын телекоммуникацияда қолдану	34
Бірінші бөлім бойынша тұжырымдамалар	35
2 ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН СЕНСОРЛАРДЫ, ТОРҒА ЖАЗУ ӘДІСТЕРІ МЕН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ЗЕРТТЕУ	37
2.1 Фазалық маска әдісі бойынша талшықты Брэгг торларын жазу	38
2.2 Талшықты Брэгг торын интерферометрлік әдіспен және кадамдау әдісі арқылы жазу	39
2.3 Талшықты Брэгг торының жазылуының арнайы әдістері. Біримпульсті және көпимпульсті жазылуы	41
2.4 Аподизацияланған Брэгг торының спектрлік сипаттамалары	50
2.5 Оптикалық талшықты Брэгг торларының жазбасы	53
2.6 Көпимпульсті экспозиция кезінде I типті Брэгг талшықты торлардың өсу динамикасы. Жоғары ретті Брэгг резонанстық сыну көрсеткіші	54
2.7 Талшықты Брэгг торларды фемтосекундты лазерлі импульспен жазу	56
2.8 Брэгг торы негізіндегі температура сенсоры, оларды жүзеге асыру, бағалау, спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы	65
2.9 Талшықты Брэгг торына негізделген сенсордың сипаттамасы	67
Екінші бөлім бойынша тұжырымдамалар	78
3 ҚҰРАСТЫРЫЛҒАН ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНЫҢ СПЕКТРЛІК СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ТӘУЕЛДІЛІК ЗАҢДЫЛЫҒЫН АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТХАНАНЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ	80
3.1 Талшықты Брэгг шағылыстыруындағы интерферометриялық сенсор	80
3.2 Маха-Цендер және Майкельсон интерферометрі негізіндегі сенсорлар	83
3.3 Талшықты Брэгг торы сенсорының спектрлік сипаттамаларының температуралық тәуелділік заңдылығын анықтау	87
Үшінші бөлім бойынша тұжырымдамалар	101

4	ТӘЖІРИБЕЛІК ЖҰМЫСТАРДАН АЛЫНҒАН НӘТИЖЕЛЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРАСТЫРУ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК ТАЛДАУ ЖАСАУ	102
4.1	Математикалық модельдің негізінде тәжірибелік нәтижелерді компьютерлік бағдарламада тексеру	102
4.2	Тәжірибелік өлшеулердің нәтижесін бағалау	102
4.3	Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру	103
	Төртінші бөлім бойынша тұжырымдамалар	125
	ҚОРЫТЫНДЫ	126
	ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	128
	ҚОСЫМШАЛАР	135

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі стандарттарға сәйкес сілтемелер берілген:

ҚР МЖМБС 5.04.034 – 2011 «Қазақстан Республикасының Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты. Жоғары оқу орнынан кейінгі білім. Докторантура». Негізгі ережелер ҚР білім және ғылым министрімен бекітілген. «17» маусым 2011 ж. №261 ж. Астана 2011.

«Диссертацияларды және авторефераттарды рәсімдеу бойынша нұсқаулық», ҚР БҒМ, Жоғары аттестаттау комитеті, Алматы 2004

МЕСТ 7.32-2001.- Ғылыми зерттеу жұмыстары туралы есеп. Рәсімдеудің ережесі мен құрылымы. – Астана, 2001.

МЕСТ 7.1-2003. Библиографиялық жазба.

ҚР СТ 34.007-2002. Ақпараттық технология. Телекоммуникациялық желілер. Негізгі терминдер мен анықтамалар.

Қазақстан Республикасының 2004 жылдың 5-ші шілдедегі № 567-ІІ «Байланыс туралы» Заңы.

Рекомендация МСЭ-Т G.650 Определение и методы проверки параметров одномодовых волоконно-оптических кабелей.

Рекомендация МСЭ-Т G.652 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля.

Рекомендация МСЭ-Т G.653 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля со сдвигом дисперсии.

Рекомендация МСЭ-Т G.654 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с затуханием, минимизированным на волне 1550 мкм.

Рекомендация МСЭ-Т G.655 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с ненулевой дисперсией.

Рекомендация МСЭ-Т G.663 Аспекты применения волоконно-оптических усилительных элементов и подсистем.

АНЫҚТАМАЛАР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі терминдерге сәйкес анықтамалар қолданылған:

Чирп дегеніміз – сыну көрсеткіші модуляциясы жиілігінің өзгерісі.

Брэгг торы дегеніміз талшықтың бойымен белгілі бір периодта орналасқан сыну көрсеткіші кезектесіп өзгертін құрылымдық аумақ.

Шағылу коэффициенті сыну көрсеткіші модуляциясының тереңдігіне байланысты, ол шағылудың орталық толқын ұзындығы Брэгг шарты бойынша анықталады.

Тордың аподизациясы дегеніміз тордағы бақыланатын сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасының өзгеруі.

БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

- ТБТ – талшықты Брэгг торы;
МБМШ – Мандельштам-Бриллюэн мәжбүрлі шашырауы;
ФМӘ – фазалық маска әдісі;
ИӨ – интерферрометрлік әдіс;
ОТ – оптикалық талшық;
УК – ультра күлгін;
ДИК–дифференциалды интерференцияны контраст;
 m – шағылысу реті;
 T – тәуелділік функциясының аналитикалық түрі;
 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;
 δn_0 – n_1 және n_2 орта мәні;
 δn – δn_0 мен n_0 қашықтығы;
 Δn – Брэгг торындағы сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы;
 z – талшық осі бойындағы қашықтық;
 $R(\lambda, l)$ – l тор ұзындығы;
 Ω – байланыс коэффициенті;
 Δk – толқындық вектордың өзгеруі;
 k – таралу тұрақтысы;
 $\eta(V)$ – талшық өзегінің негізгі мода интенсивтілігінің процентін анықтайтын функция;
 N – тордағы штрихтар саны;
 $\chi_{ij}^{T,\theta}$ – кристалл тордың поляризациясы;
 ρ_{ijkl}^{θ} – оптикалық майысқақтық эффектісінің коэффициенті;
 ρ_i^T – пирозлектрлік коэффициент;
 λ_B – Брэгг толқын ұзындығы;
 ε_z – талшық бойымен бағытталған кернеу;
 P_{eff} – эффективті оптикалық қысым тұрақтысы;
 P_{11} және P_{12} оптикалық талшық қысымы тензорының мүшелері;
 $n_{\text{эффт}}$ – және $n_{\text{эффж}}$ таза және жазылған эффективті сыну көрсеткіштері модуляциясы;
ҚИ – қарымталаушы интерферометр.

КІРІСПЕ

Жұмыстың өзектілігі. Қазіргі кезде талшықты оптикалық байланыс желілерінің пайдалану ауқымы артқан сайын, желінің жұмыс жасауын бақылайтын көмекші құралдар мен құрылғылар – талшықтың сыртқы ортаның әсерінен болған қысымына және ортаның температурасына тәуелділігін анықтау маңыздылығы артуда. Талшықты Брэгг торына (ТБТ) негізделген температуралық сенсорларды үлкен қашықтықта орналасқан және қауіпті әртүрлі жарылғыш, күшті электромагниттік сәуле шығаратын орталарда, мұнай, газ құбырларындағы температура мен қысымды өлшеуге, магистралды талшықты байланыс желісі жүргізілген орталардағы температураны анықтау мақсатында кеңінен қолданады.

Талшықты оптикалық сенсорларға төмендегідей негізгі талаптар қойылады:

- өлшеудің жоғары дәлдігі, дәлдіктің сенімділігі;
- құрылғының қарапайымдылығы және жаңа технологияға негізделуі;
- массасы мен пішіндерінің қарапайымдылығы мен ыңғайлылығы;
- металл элементтерінің барынша аз болуы;
- өзіндік құнының арзан болуы.

Жоғарыда аталған талаптардың ең негізгісі - металл элементтерінің болмауы. Себебі активті элементтер (транзисторлар, кедергілер, конденсаторлар, индуктивті катушкалар, логикалық элементтер) болмағандықтан, қолданылатын пассивті сенсорларды өндірістің кез-келген саласында адам қолы жете бермейтін жерлерге, ұшақтар мен кемелердің сыртқы қабаты мен ішкі қабаттарының арасына ешқандай ылғалдылық пен қысымдарға тәуелсіз орнатуға болады. Сонымен қатар, құбырдың ұзындығына тәуелсіз, кез-келген сұйықтықты тасымалдайтын құбырлардың ішіне орнату арқылы құбырдың әрбір нүктесіндегі қысым мен температураның өзгерісін анықтауға мүмкіндік береді.

Қазіргі кезде талшықты оптикалық сенсорлар пассивті элементтердің ішінде кең қолданысқа ие. Талшықты оптикалық сенсорлардың көпшілігі талшық бойындағы жарықтың шашырау құбылыстарына негізделген. Мысалы, талшықты Мандельштам-Брюллиэн мәжбүрлі шашырауына (МБМШ) негізделген сенсордың ерекшелігі: оптикалық талшықтың жүздеген немесе мыңдаған километр қашықтықтағы нүктелерінде орын алған жағдайды тіркеуге болады. Оптикалық талшықтың магистралды желілеріндегі ақауларды осы МБМШ эффектісіне негізделген рефлекторлармен анықтайды. Алайда, бұл сенсор тек сол ортаның температурасының немесе қысымының өзгергендігі туралы ғана анықтама бере алады. Брэгг торына негізделген сенсордың ерекшелігі: температураның немесе қысымның қандай мәнге өзгергендігі туралы нақты ақпаратты белгілі бір дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді.

Брэгг торына негізделген сенсорлардың температураға тәуелділігі, басқа физикалық құбылыстарға негізделген температуралық сенсорларға қарағанда, анағұрлым түзу сызықты болып келгендіктен, ТБТ арқылы анықталған

температура дәлдігі нақты болады. Сондықтан, жұмыстың басты мақсаты ТБТ сенсорларының температураға тәуелділігін дұрыс анықтаудың жаңа әдістерін ұсыну және аталған сенсорлардың математикалық моделін құру болып табылады. Себебі, әрбір сенсор әртүрлі температуралық диапазондар мен басқа да сыртқы әсерлерді ескеріп құрастырылатындықтан, Брэгг торына негізделген сенсорлардың барлығына жарамды әмбебап бір модель құрастыру мүмкін емес.

Қойылған мәселені шешу жолдары көптеген ғылыми еңбектердің нәтижесінде анықталып, қазіргі кезде кеңінен қолданысқа ие болған. Белгілі бір мақсатқа сәйкес Брэгг торын модельдеу және оны жасауда тордың негізгі параметрлерін ескеру қажет. Сондықтан, ұсынылған модель арқылы аталған мәселені шешудің оңтайлы жолы қарастырылады. Сонымен қатар, өзіміздің тарапымыздан ұсынылатын жаңа әдістің нәтижесінде кері шағылған жарық спектріндегі екінші және үшінші гармоникалардың әсерін аподизацияның көмегімен едәуір төмендету процесін ғылыми жұмыс үшін тұрақты деп қарастырамыз. Қойылған мәселенің шешімі - алынған температураға тәуелді толқын ұзындығы ығысуының функциясын матрицалық әдіспен шешіп, барынша объективті түзу сызықты байланысты анықтау болып табылады.

ТБТ кері шашырау спектрі өте жіңішке болғандықтан, ол талшықты лазерлерде талшық-оптикалық мәліметтерді анықтауыш құрылғы ретінде қолданылады. Брэгг торларына негізделген талшықты-оптикалық мәліметтерді анықтауыш ретінде қолдану кезінде өлшенетін шамалар (температура немесе сыртқы күштерден болған қысым) Брэгг толқын (талшықпен жіберілген жарық толқынының кері шашыраған толқыны) ұзындығы мәнінің ығысуына негізделеді. Тіркеуші жүйе осы кері шағылған Брэгг толқыны ұзындығының ығысуын «электрлік сигналға» түрлендіреді. Талшықты - оптикалық байланыс жүйесі аясында жазылатын ғылыми еңбектердің барлығында «электрлік сигнал» ұғымы мен «оптикалық сигнал» ұғымдары арасындағы айырмашылықты анықтау мақсатында осы атаулар кеңінен қолданылады. Шындығында, осы екі сигналдың да табиғаты электромагниттік толқын екендігін, олардың тек жиілігі мен толқын ұзындықтарында ғана айырмашылықтар бар екендігін ескеру қажет. Бұл сенсорлардың орта әсерін сезгіш бөлшегінде ешқандай активті электронды құрылғылар болмағандықтан жүзеге асады. Сондықтан, оны түбегейлі пассивті құрылғы болғандықтан қауіпті жарылғыш ортада, агрессивті орталарда, күшті электромагнитті орталарда, сонымен қатар, өте үлкен қашықтықтарда кеңінен қолдану үшін ыңғайлы құрал ретінде пайдаланылады. Бір талшыққа әрқайсысы жеке өзінің толқын ұзындығына ғана жауап беретін бірнеше Брэгг торларын жасауға болады, сәйкесінше толқын ұзындығы әртүрлі тексеру сигналдары көптеген мақсаттарда қолданылуы мүмкін. Бұл жағдайда бір нүктелік мәліметтер анықтағышының орнына толқын ұзындықтары бойынша мультиплекстелетін тіркеу жүйесін аламыз. Жарық толқынын ақпараттық параметр ретінде қолдану негізінде ТБТ мәліметтер анықтағышы сәуле көзі мен қабылдағышының ұзақ

уақыт бойы тұрақты қызмет атқаруы және талшықтағы оптикалық сигналдың кездейсоқ өшуіне тәуелсіз жұмыс жасауы оның қолдану аясын кеңейтеді.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты. Жұмыстың негізгі мақсаты - Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру, модельді құрастыру барысында сенсордың негізгі сипаттамаларын зерттеп, тәжірибелік нәтижелермен салыстыру.

Жұмыстың мақсатына жету үшін төмендегідей бірнеше негізгі мәселелерді шешу қажет:

- температураны өлшеуге арналған талшықты–оптикалық сенсорлардың заманауи жағдайына талдау жасау;

- металл және жартылай өткізгіш элементтері болмайтын температураны өлшеуге арналған талшықты–оптикалық сенсорлардың құрылымын талдау және модельдеу;

- эффективті сыну көрсеткішінен және Брэгг торы периодының мәнінен тәуелді Брэгг торын қолдану технологиясы негізінде жұмыс жасайтын сенсордың температуралық тәуелділік заңдылығын анықтау;

- аталған заңдылықтарды орнату мақсатында тәжірибелік зертхана ұйымдастыру және сенсордың температуралық диапазондардағы спектрлік сипаттамаларын бектіу;

- жұмыстың нәтижесінде алынған тәжірибелік және теориялық нәтижелерді талдау.

Зерттеу нысаны және мәні. Зерттеу нысаны – талшықты–оптикалық Брэгг торы негізінде температура сенсорын модельдеу. Талшықты Брэгг торының спектрлік сипаттамаларының ең үздік нәтижелерін алу зерттеу мәні болып табылады.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы:

- тиімді сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі заңдылығы анықталды;

- Брэгг торының периоды мәнінің температураға тәуелді болу заңдылығы алғаш рет анықталды;

- Брэгг торын қолдану технологиясы негізінде жұмыс жасайтын талшықты-оптикалық сенсордың спектральды және температуралық қасиеттеріне байланысты жаңа мәліметтер алынды;

- Брэгг торын қолдану технологиясы негізінде жұмыс жасайтын талшықты-оптикалық сенсордың спектральды және температуралық сипаттамаларына зерттеулер жүргізілді. Себебі зерттелген барлық ғылыми еңбектерде аталған байланыс қарастырылмаған.

Жұмыстың барысында Брэгг торының негізгі сипаттамалары қарастырылған және Брэгг торын сипаттайтын негізгі параметрлер туралы ақпараттар келтірілген. Брэгг торын құрастырудың ерекшеліктері сипатталып, оны құрастыру кезінде қажетті кіріс параметрлерінің өзгеру диапазондары мен тұрақты мәндерін пайдаланып математикалық моделін құрастыруда олардың (мысалы, аподизация коэффициенттері) өзгерісі ескерілмеген. Брэгг торын жасау және оны модельдеу жұмыстарына қатысты еңбектерге әдебиеттік шолулар

жасалды. Құрастырылған Брэгг торының негізгі сипаттамаларын анықтауға арналған зертханалық жұмысты ұйымдастыру, сонымен қатар, алынған нәтижелерді сипаттау мәселелері қарастырылды. Алынған нәтижелер бойынша Брэгг торы моделін құрастыру – байланысқан модалар теориясына негізделген математикалық модельдің негізінде тордың моделі құрастырылып, зертханалық нәтижелерге сәйкес келетін компьютерлік есептеулер жасалды. Алынған түзу сызықты параметрлік байланыстар анықталды.

Зерттеу әдістері

Алға қойылған талаптарды орындау барысында тәжірибелік зерттеулер жүргізіліп, алынған нәтижелер математикалық модельдеуді қолдану арқылы салыстырылған.

Жұмыстың тәжірибелік маңыздылығы.

Бұл диссертациялық жұмыстың нәтижелерінің құндылығы кері шашыраған жарық толқын ұзындығы мен өлшенетін температура арасындағы түзу сызықты функцияның түрін анықтау және әрбір нақты талшықтар үшін калибрлеу осы түзу сызықты функцияның эмпирикалық коэффициенттерін анықтау болып табылады. Сонымен қатар, талшық оптикалық Брэгг торы негізінде температура сенсорын модельдеу қабілеттілігін арттыру және диссертациялық жұмыста алынған нәтижелерді қолданысқа енгізу.

Диссертациялық жұмыстан алынған нәтижелер бойынша Люблин Техникалық Университетінің (Польша, Люблин қ.) «Оптоэлектроника» зертханасында талшықты Брэгг торларын жасау және дайындаумен қатар, спектрлік сипаттамаларын зерттеуде қолданылуы туралы акті алынды.

Жұмыстың апробациясы. Диссертацияның зерттеу нәтижелері төменде көрсетілген конференцияларда баяндалды: «Қазақстанның жаңа экономикалық саясатын таратуда жас ғалымдардың орны мен рөлі» атты халықаралық Сәтбаев оқуларының еңбектері (Алматы, 2015, 2016); «Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар: білім беру, ғылым, тәжірибе» атты II Халықаралық ғылыми - тәжірибелік конференциясы (Алматы, 2015); Біріктірілген шығарылым Халықаралық ғылыми конференция материалдары, Эль-Фараби атындағы ҚазҰУ Хабаршысы. Математика, механика және информатика сериясы Заманауи ақпараттық-телекоммуникациялық технологиялар атты халықаралық - ғылыми мультитүрлік конференциясы (Киев, 2016); «Білім және техникалық ғылымның бәсекеге қабілеттілігі. Қазақстан Республикасының тәуелсіздігіне 25-жыл» атты Халықаралық Сәтбаев оқуларының еңбектері, XX халықаралық «XXI ғасырдағы ғылымның дамуы» конференциясы Proceedings of SPIE - The International Society For Optical Engineering 2015 Optical Fibers And Their Applications 2015

Мақалалар. Жұмыс нәтижелері бойынша диссертация тақырыбына байланысты 12 мақала жарияланған: оның ішінде 3 - ҚР БЖҒМ бекіткен ғылыми баспаларда, 2 - Scopus базасына кіретін журналда, - 7 халықаралық конференцияларда, соның ішінде 3 шетелдегі конференцияларда.

Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс 143 беттен тұрады: кіріспе, 4 бөлім, қорытынды, 113 сурет, 3 кесте, сондай-ақ 90 атаулы әдебиеттер тізімі мен қосымшалардан тұрады.

Кіріспеде диссертациялық жұмысқа байланысты жалпы сипаттамалар келтірілген: жұмыстың өзектілігі, жұмыстың мақсаты, зерттеу міндеттері, зерттеу нысанасы және мәні, ғылыми жаңалығы және тәжірибелік маңыздылығы, зерттеу әдістері, жұмыстың апробациясы және жарияланған мақалалар.

Бірінші бөлімде Брэгг торына негізделген сенсорларды пайдалану жағдайларын ескере отырып, сыртқы ортаның нақты қандай температуралық диапазондарда қолданылатыны, осы диапазонға сәйкес келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазондарын нақты есептеп шығаруға байланысты ақпараттық шолу жасалды. Брэгг торының негізгі спектрлік сипаттамаларының әдістерін дайындау технологияларының артықшылығы мен кемшілігі қарастырылған.

Екінші бөлімде талшықты Брэгг торларын құрастыруда негізгі параметрлердің өзгеру заңдылықтары қарастырылған, сонымен қатар Брэгг торының моделін құру кезінде қажетті негізгі параметрлердің спектрлік заңдылықтары мен бір-біріне байланыстары зерттелген.

Үшінші бөлімде Брэгг торының температуралық сезімталдығы Λ Брэгг торы периоды және n_{eff} - эффективті сыну көрсеткіштері арқылы анықталған. Аталған екі параметр сыртқы температуралық және қысымдық әсерлерге тәуелді. Осы тәуелділіктің негізінде талшықты Брэгг торына негізделген сенсорды зерттеу жұмыстары ұйымдастырылған.

Төртінші бөлімде математикалық модель негізінде тәжірибелік нәтижелер компьютерлік бағдарламамен тексерілген. Ол үшін тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерді негізге ала отырып, Брэгг торына негізделген сенсордың кіріс параметрлерінің мәндері, сонымен қатар матрицалық әдісті қолдана отырып, тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері алынды.

Қорытындыда диссертациялық жұмыстың негізгі тұжырымдамалары мен нәтижелері көрсетілген.

1 БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНА ҚАТЫСТЫ ҒЫЛЫМИ ЕҢБЕКТЕРГЕ ШОЛУ

1.1 Зерттелген ғылыми жұмыстардың негізгі тақырыптары мен бағыттары

Талшықты Брэгг торының сипаттамаларын зерттеуге қатысты көптеген ғылыми еңбектер бар. Ғылыми еңбектердің жүзден аса данасы қарастырылды. Зерттелген ғылыми еңбектерді негізгі қарастырған тақырыптары мен бағыттары бойынша бірнеше үлкен топтарға жіктеуге болады:

- талшықты Брэгг торын жасау кезіндегі негізгі мәселелерді шешу (жасау әдістерін қарастырады);

- талшықты Брэгг торынан алынған сигналдың сипаттамаларын зерттеу арқылы Брэгг торын модельдеу және теориялық модельден алынған нәтижелерді тәжірибедегі нәтижелермен салыстыру;

- ТБТ қолданыс аясын кеңейту мақсатында зерттеулер жүргізу.

Ғылыми жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі – кері шашыраған жарық толқын ұзындығы мен өлшенетін температура арасындағы түзу сызықты функцияның түрін анықтау және әрбір нақты талшықтар үшін калибрлеу ретінде осы түзу сызықты функцияның эмпирикалық коэффициенттерін анықтау. Осы процесті жүзеге асыру үшін ТБТ жасау кезіндегі мәндері кері есептеу әдісі арқылы өзгеріске ұшырап отырады. Алдын-ала температуралық диапазондарды

$$\lambda_{min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{max} \quad (1.1)$$

$$T_{min} \leq T_i \leq T_{max} \quad (1.2)$$

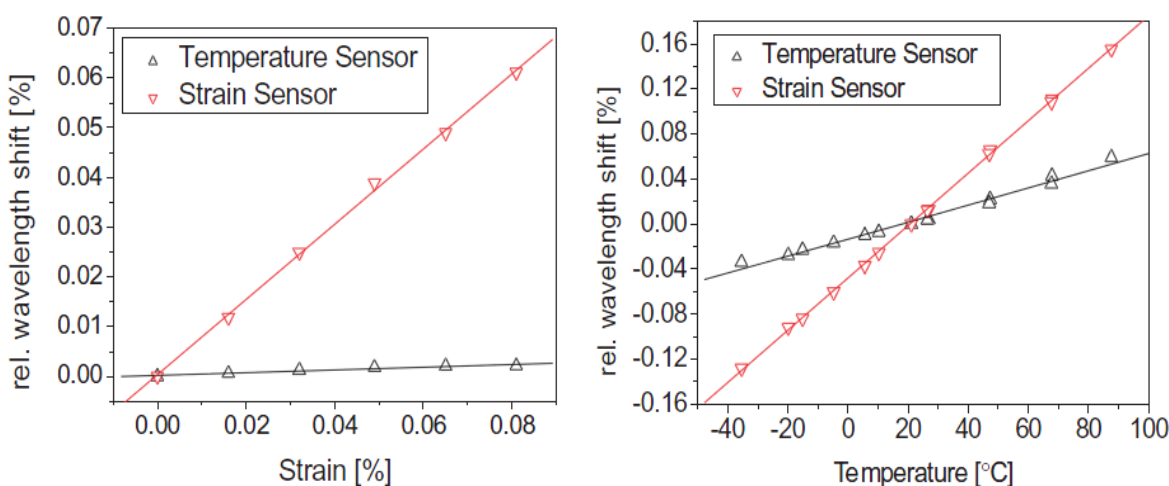
анықтап, ультракүлгін сәулелердің көмегімен бір модальды оптикалық талшықтың өзегін күйдіру арқылы сыну көрсеткішінің модуляциясын алу әдісі ашылғаннан кейін, талшықты Брэгг торларын алу мәселелері кеңінен талқыланатын тақырыпқа айналды. Талшықты-оптикалық Брэгг торын әзірлеудің негізгі әдістері мен қасиеттері қарастырылған ғылыми еңбектерде, талшықты бетін өріске әсерлесуге дейін жанамалап үйкеп-жұқарту арқылы тор жасауға қажетті әдістер қарастырылды. Содан кейін жұқартылған жерін интенсивті сәулемен сәулелендіру арқылы тор жазылды. Бұл әдісті іштен торды жасау әдісі деп атайды. Мұндай әдіспен алынған тордың кемшіліктері көбірек болады, себебі кері шағылысу коэффициенті 95%-ға, ал сигналдың жоғалуы жарты дБ-ге дейін жетеді. Оптикалық талшықтың сыртқы орта әсеріне оптикалық сезгіштігі құбылысы ашылғаннан соң (мұндай материалдарды қазіргі кезде смарт - материалдар деп атайды) Брэгг торынан жасалған анықтағыштар жасау мүмкіндігі туды. Бір ультракүлгін сәуле көзінен шыққан кемінде екі сәуле жолдарын бір-біріне қайтадан түйістіріп, интерференциялық құбылыстың түзілу тұсында бір модальды оптикалық талшықты орналастыру арқылы периоды жарық сәулесінің толқын ұзындығына шамалас келетін Брэгг

торын жасауға болады. Аталған тордың ерекшелігі: сыртқы ортаның әсерінен талшық бойымен жүрген ақпарат тасушы жарықтың кері шағылған немесе тордан өткен бөліктерінде жарықтың толқын ұзындығы өзгереді.

Бұл жұмыста Брэгг торын модельдеу және оны тәжірибе нәтижелерімен салыстыру арқылы алынған Брэгг торы сенсорының сипаттамаларын зерттеу жұмыстары ұйымдастырылады. Брэгг торын модельдеу жұмысы осы уақытқа дейінгі ғылыми жұмыстарда да қарастырылған. Брэгг торы сенсорын модельдеу жұмысында оны құрастырушылар мен нақты жағдайда пайдаланушылар арасында, байланыстырушы виртуалды құрал ретінде қолданысқа ие болатын нақты бағдарламалық өнімді жасап шығару қажет. Зерттелетін Брэгг торының пайдалану жағдайларын ескере отырып, сыртқы ортаның нақты қандай температуралық диапазондарда қолданылатынын, осы диапазонға сәйкес келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазондарын нақты есептеп шығару үшін Брэгг торының негізгі спектрлік сипаттамаларының әдістерін бекіту қажет.

Брэгг торына негізделген сенсорларды модельдеу жұмыстарының көпшілігі байланысқан модалар теориясын негізге ала отырып, талшық бойындағы жарықтардың бір-бірімен әсерлесу теңдеулерін құрған.

G. Thursby., B. Culshaw., D.C. Betz зерттеулерінде [1] Брэгг торларын бір уақытта сыртқы қысым және ультрадыбыстың мультисенсоры ретінде қолдану ұсынылады. Зерттеу нәтижелері бойынша сыртқы механикалық әсерлерді қысым мен ультрадыбыстың түрлеріне сенсор ретінде қолдану кезінде сәуленің Брэгг торынан кері шағылған және өткен толқындарының спектрлік сипаттамаларының қысымға және ультрадыбыстың параметрлеріне тәуелділік заңдылығы алынады (сурет 1.1). Бұл нәтижелерді температуралық тәуелділіктен ажыратуға қажетті салыстыру графиктері ұсынылған.



Сурет 1.1- Қысым мен температуралық тәуелділікті салыстыру графигі

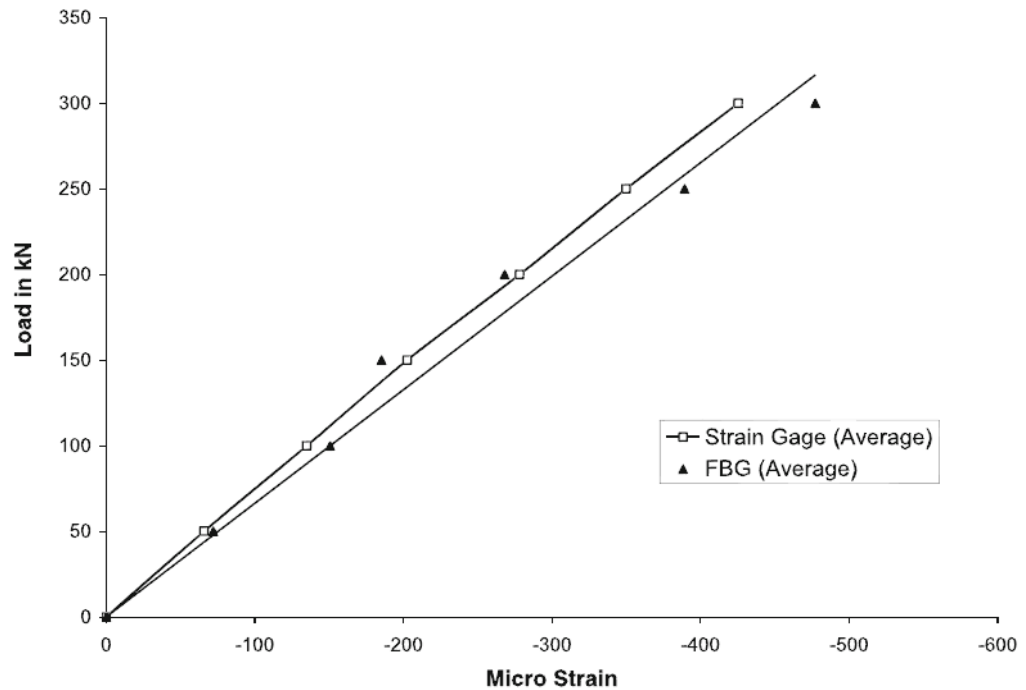
Xia Xiao, Yan Xu зерттеулерінде температура мен қысымды бір уақытта тіркеуге арналған сенсор ретінде Брэгг торының төмендегідей математикалық моделін ұсынады [2]:

$$dP_i = \left(\frac{\partial P_i}{\partial T_{kl}} \right)_{E,\theta} dT_{kl} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial E_j} \right)_{T,\theta} dE_j + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta} \right)_{T,E} d\theta \quad (1.3)$$

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

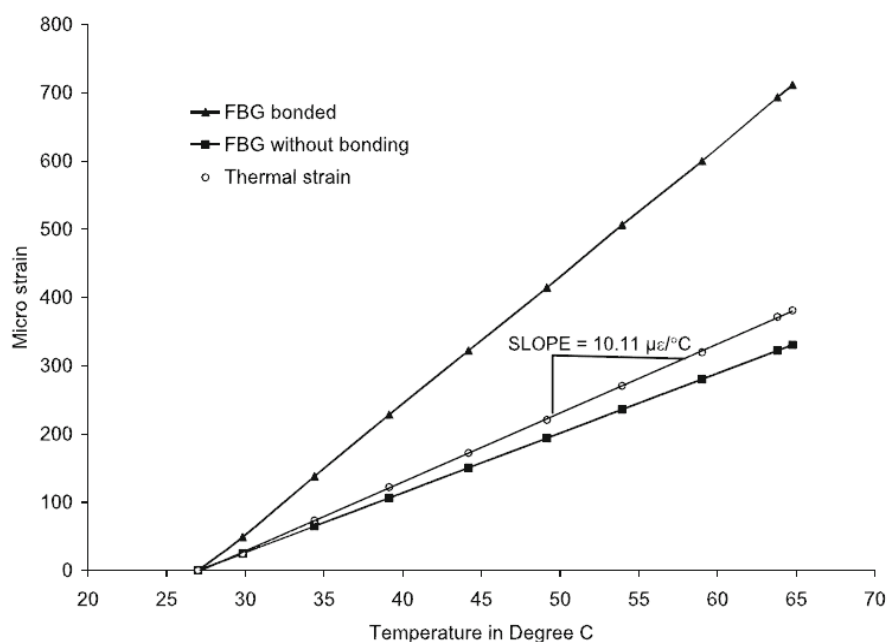
мұндағы $\chi_{ij}^{T,\theta}$ - кристалл тордың поляризациясы, p_{ijkl}^θ - оптикалық майысқақтық эффектісінің коэффициенті, p_i^T - пирозлектрлік коэффициент.

К Kesavan, В Arun Sundaram, А К Farvaze Ahmed, зерттеулерінде [3] құрылыс материалдарындағы (ғимараттар мен көпірлер, т.б.) микроқысымдар мен үлкен қысымдардың өзгерісін Брэгг торы сенсорымен өлшеу әдістері ұсынылған. Зерттеу жұмыстарының нәтижесінде төмендегідей заңдылықтар анықталды (сурет 1.2).



Сурет 1.2 - Микроқысымды нанометрмен және Брэгг торымен өлшеулер нәтижелерін салыстыру

Микроқысымдардың нанометрмен өлшенген нәтижелерін эталон ретінде алып, Брэгг торының параметрлерін өзгертіп, сәйкестікті арттыру арқылы Брэгг торы сенсорына калибрлеу жасалады. Алынған сенсорды пайдаланып, микроқысымның температураға тәуелділік графигін алады.(сурет 1.3).



Сурет 1.3 - Брэгг торын пайдаланып микроқысым және температура арасындағы байланысты анықтау

Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. ғылыми зерттеулерінде Брэгг торы негізінде жасалған сенсордың негізгі қасиеттері мен торды жазу технологиялары туралы ғылыми еңбектерге шолу жасаған [4]. Зерттеу нәтижелері талшықты Брэгг торларының сыну көрсеткіші модуляциясының негізгі түрлеріне, тордың жұмыс жасау принциптеріне, ұзын периодты торлардың қасиеттеріне, торды жазудың негізгі түрлеріне, торды жазуға арналған сәуле көздерінің түрлеріне және торды жазатын орта – оптикалық талшықтың фотосезгіштік қасиеттеріне, оның ішіндегі германосиликатты жарық жолдардың қасиеттеріне қатысты мәліметтерді қамтиды.

Қысымның температуралық градиентін зерттеуге арналған Michael C. Kennedy В. ғылыми еңбектерінде [5] микроқысым және температураны өлшеуге арналған Брэгг торы сенсорының математикалық моделін құрастырып, оның температуралық тәуелділігінің графиктерін анықтайды.

Соңғы кезде Брэгг торын қолдану ауқымы кеңейген сайын оны пайдаланудың жаңа әдістері мен технологиялары ұсынылуда. Сонымен қатар, көптеген еңбектерде Брэгг торы негізінде жасалған сенсорлардың тобын бір талшықтың бойына жазу технологияларымен топтап жасалған сенсорлардан алынатын мәліметтерді бір нүктеден басқару модельдері ұсынылады.

Дикевич А.А., Njuguma James ғылыми еңбектерінде Брэгг торы сенсорын мұнай мен газ құбырларының ішінде температураның өзгерісін анықтау мақсатында пайдалануға арналған модель құрастырған [6, 7]. Олар математикалық модель ретінде байланысқан модалар әдісін пайдаланып, қысым мен температураның әсеріне тәуелділікті төмендегідей заңдылықпен көрсетті:

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

мұндағы λ_B -Брэгг толқын ұзындығы, ε_z – талшық бойымен бағытталған кернеу, P_{eff} - эффективті оптикалық қысым тұрақтысы. Эффективті оптикалық қысым тұрақтысы төмендегідей өрнектеледі:

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

Мұндағы P_{11} және P_{12} оптикалық талшық қысымы тензорының мүшелері, n_{eff} – эффективті сыну көрсеткішінің модуляциясы.

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

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

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

В.Д. Бурков ғылыми зерттеуінде Брэгг торындағы жарық сигналдарының сыртқы электрлік өрістің әсерінен өзгеріске ұшырауына негізделген сенсорды математикалық модельдеу жұмыстары қарастырылған [8]. Бұл жұмыста Джонс матрицасын пайдаланып, модалардың әсерлесуі нәтижесіндегі кері шағылу коэффициентіне қатысты келесі түрдегі теңдеу алады:

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

мұндағы өзіндік толқындар арасындағы нормаланған фазалардың айырмасы:

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

Қос сәулелік сынудың сызықтық параметрі:

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

Сенсордың сыртқы электр өрісіндегі поляризациясы сызықтық түрден эллипстік түрге түрленуі арқылы жүзеге асады. Бұл өз кезегінде кристалдағы сызықтық электрооптикалық эффектімен түсіндіріледі.

Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С. ғылыми [9] жұмысының негізгі мақсаты Брэгг торына негізделген сенсор арқылы Брэгг торы орналасқан сұйық ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруін рефрактометрлік әдіспен анықтау болып табылады. Ол үшін π – жарты айналымдық фазалық ығысуына ТБТ негізделген рефрактометрлік сенсордың математикалық және физикалық моделі ұсынылған. Фазасы π -ығысуымен болатын ТБТ рефрактометрлік сенсордың теңдеулер жүйесі төмендегідей түрде өрнектелген:

$$\begin{cases} \lambda_{B1} = \lambda_{BT} \left(\alpha + \frac{1}{n_{эфф}} \frac{\partial n_{эффT}}{\partial T} \right) T \\ \lambda_{B2} = \lambda_{BJ} \left(\alpha + \frac{1}{n_{эфф}} \frac{\partial n_{эффJ}}{\partial T} \right) T + 2n_{эффJ} \Lambda \end{cases} \quad (1.13)$$

мұндағы $\lambda_B = 2n_{эфф} \Lambda$ - Брэгг толқын ұзындығы, $n_{эффT}$ және $n_{эффJ}$ - таза және жазылған эффективті сыну көрсеткіштерінің модуляциясы, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ - кварцтың жылулық созылу коэффициенті, $\xi = \left(\frac{\partial n_{эфф}}{\partial T} \right)$ – термооптикалық коэффициент. Ортаның $n_{орта}$ - сыну көрсеткіші талшықтың өзегіндегі сыну көрсеткіші мен Брэгг торы жазылған тұсының сыну көрсеткіштері арқылы анықталады:

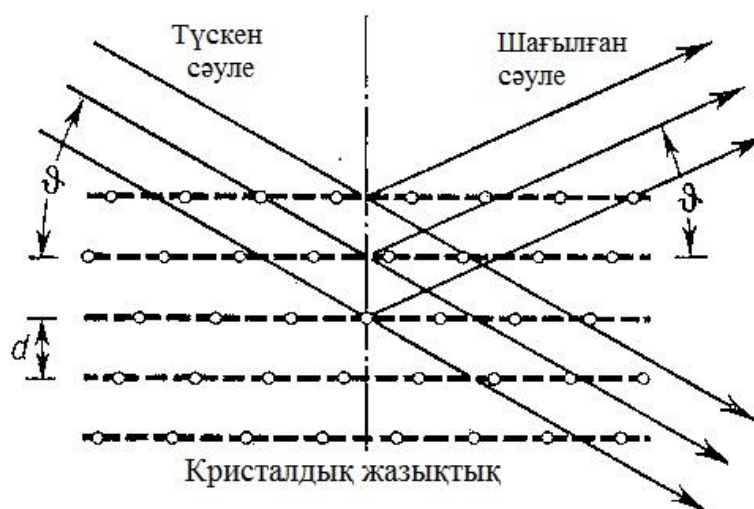
$$n_{орта} = n_e \sqrt{1 - \frac{1 - n_e^2 n_{эффJ}^2}{v^2}} \quad (1.14)$$

Брэгг торына негізделген сенсорларды зерттеуге қатысты ғылыми еңбектердің көпшілігі Брэгг торын жасаудың ерекшеліктеріне, оны жасау кезінде өзгеретін негізгі параметрлердің сипаттамаларына, Брэгг торын қолдану кезінде сенсордың негізгі параметрлерінің сыртқы әсерлерге – қысым мен температураға тәуелділігі заңдылығын зерттеуге және сенсордың жаңа түрлерін жасауда пайда болатын мәселелерді шешу жолдарына бағытталған. Ғылыми әдебиеттерге шолу жасау нәтижесінде Брэгг торына негізделген сенсорды модельдеу тақырыбына қатысты ғылыми еңбектердің өте аздығын атауға болады. Брэгг торының математикалық модельдері сыртқы әсерлердің түрлеріне байланысты әртүрлі болуымен қатар, модельдің өзі принципті түрде әмбебап болуы мүмкін емес, яғни әрбір қолданыс жағдайы үшін сенсор моделінің жеке қалыптастырылуы тиістігін ескеру керек. Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері мен құрастырылған модельдің нәтижелерін салыстырғаннан кейін, жұмыстың жаңалығы ретінде айтуға болатын нәтижесі – эффективті сыну көрсеткіші модуляциясының температураға тәуелділігі заңдылығы мен тордың периодының температураға тәуелділігі заңдылығының графигі алынды. Осындай есептеулер жүргізген ғылыми еңбектердің кездеспейтіндігін ескеріп, жұмыстың жаңашылдығын бекітуге болады.

1.2 Талшықты Брэгг торының негізгі сипаттамасы

Талшықты Брэгг торы жарық тасымалдайтын оптикалық талшықтың өзекшесіндегі сыну көрсеткішінің периодты өзгеруінің нәтижесінде Брэгг-Вульф шартының орындалуы арқылы жарықтың шашырауы болатын жасанды тор. Ол дифракциялық тордың бір түрі болып саналады.

А.М. Прохоров Брэгг-Вульф шарты бойынша кристалдағы серпімді шашырауының әсерінен түскен сәуле дифракциясы интенсивтілігінің максимум мәндерінің туындауы мүмкін болатын бағыттарды анықтады [10]. Егер шартты түрде кристалды бір-бірінен d қашықтықта орналасқан атомдық жазықтықтардың жиынтығы ретінде қарастыратын болсақ (сурет 1.4), онда сәуленің дифракциясын осы жазықтықтардан шағылысуы ретінде қарастыруға болады.



Сурет 1.4 - Брэгг-Вульф шарты

Бұл жағдайда интенсивтіліктердің максимум мәндері (дифракциялық максимумдер) Брэгг-Вульф шарты орындалатындай жағдайларда ғана – түскен сәуленің бағытына 2θ бұрыш жасап, барлық атомдық жазықтықтардан шағылысу арқылы және бір фазада бір-бірін күшейту арқылы пайда болады. Көрші жазықтықтардан шағылған екі сәуле арасындағы жол айырымы $2d \sin \theta$, жарық толқын ұзындығы λ -ның еселік мәндеріне тең болуы қажет.

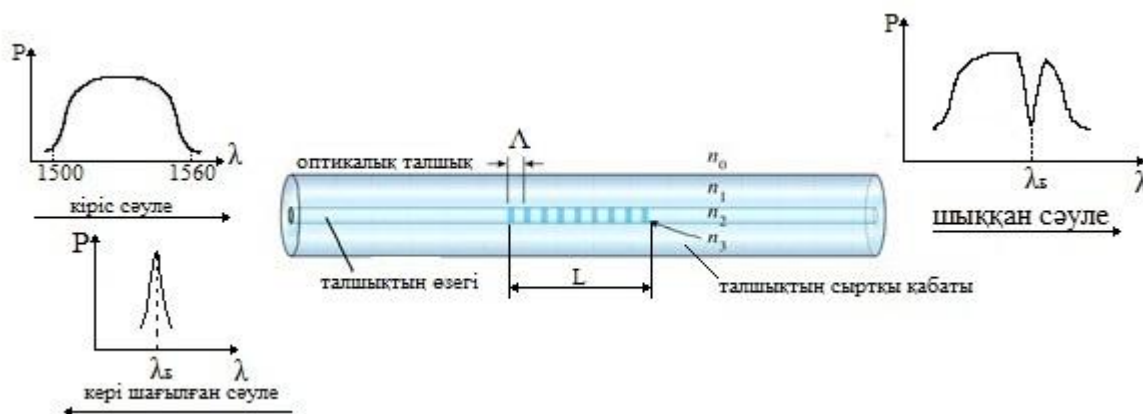
$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (1.15)$$

мұндағы m - шағылысу реті деп аталатын бүтін сан.

Жасалған әрбір талшықты - оптикалық желінің химиялық құрамы мен кристалдық торларының ерекшелігі әртүрлі болғандықтан, ол талшықтан жасалған ТБТ сенсорының да температураға тәуелділігі әртүрлі болады. Сондықтан, ТБТ температураға тәуелділік заңдылығын анықтау жұмысы кері шағылған сигнал спектрінің аподизациясын анықтап, паспорттау жұмысы

маңызды. Сәйкесінше температураға тәуелділігін анықтау үшін, талшық бойына торды жасау принциптерін ескеру қажет.

Талшықты Брэгг торын құрастыру мәселелері де қазіргі кезде бірнеше әдістерді қамти алады. Талшықты Брэгг торын жарық сезгіш бір талшықты ультракүлгін лазердің көмегімен сәулелендіру арқылы жасайды. Интерференцияланып түскен сәуленің әсерінен талшықтың өзекшесіндегі кристалдық торлардың атомдарына жоғарғы энергиялы сәуле әсер етіп сыну көрсеткіші қайтымсыз өзгереді. Бұл өзгерістің кеңістік бойынша (талшық осі бойымен) таралу периодын түскен сәуленің интерференциялық параметрлерін бақылау арқылы анықтайды. Нәтижесінде талшықтың бойымен белгілі бір периодта орналасқан сыну көрсеткіші кезектесіп өзгертін құрылымдық аумақ пайда болады. Бұл аумақты Брэгг торы деп атайды. Тордың әрбір жолағы талшық бойымен таралған жарықтың кіші бөлігін кері шағылыстырады. Осы кері шағылған жарық спектрінің өзгерісі арқылы сол ортаның температурасын анықтау мүмкіндігі туады. Тордың периоды ұзындығынан екі есе үлкен толқын ұзындығы болатын жарық кері шағылысып, фазалары бойынша бір-бірін күшейте отырып, жалпы талшықпен жіберілген жарықтың 1-5% шамасындағы жарықты кері шашыратады (сурет 1.5).



Сурет 1.5 - Брэгг торынан өткен сәуле мен кері шағылған сәуле мәндерінің сыртқы температурадан тәуелділік қасиетін сенсор ретінде қолдануы

Белгілі бір толқын ұзындықтағы жарықтың кері шашырауы Брэгг шарты деп аталатын жағдайларда ғана орындалып, кері шашырау шарты мен кері шашырау коэффициенттері талшықты Брэгг торын пайдалану мерзімі аяқталғанша тұрақты болып қалуы тиіс. Бұл жағдайлар талшықты Брэгг торын құрастыру кезінде ескерілуі қажет. Сәйкесінше тек осы толқын ұзындықтағы жарық кері шашырап, қалған жарықтар үшін талшықтағы торлар мөлдір күйінде қала береді. Алайда кері шашырау шарттары мен коэффициенттері сыртқы ортаның (қысым мен температураның) әсерінен өзгереді. Телекоммуникация саласында бұл өзгеріс кері ықпалын тигізетіндіктен, ол әсерлерден болған өзгерістер компенсациялануы тиіс, ал аталған эффект пассивті талшықты-оптикалық анықтағыш ретінде сыртқы ортаның әсерлерін

анықтау мүмкіндігін жасады. Қарапайым шағылыстырушы торлардан басқа ТБТ жіңішке жолақты фильтрлерді, сонымен қатар, ТБТ-ны қолданудың негізгі бағыттары ретінде төмендегілерді атауға болады:

- телекоммуникациялық жүйелер үшін оптикалық жиілікті мультиплексорлар;
- өзгертін және тұрақты жіңішке жолақтық фильтрлер;
- талшықты оптикалық байланыс жүйелеріндегі дисперсияны компенсациялаушы;
- талшықтан шығатын жарықты бақылауға арналған құрылғылар мен жиіліктік-селективті тармақтаушылар;
- сыртқы шағылдырушы ретінде Брэггтік торы бар лазерлік диодтар;
- Эрбий қосылған талшықты күшейткішер (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA);
- мультиплексті пассивті талшықты-оптикалық мәліметтерді анықтағыш Брэгг торына негізделген сенсордың негізгі ерекшелігі ретінде температуралық функциясын зерттеп, байланыстарын анықтау керек:

$$\lambda = f(T) \quad (1.16)$$

Брэгг торынан өткен немесе шағылған электромагниттік толқын импульсының максимум мәніндегі толқын ұзындығы - λ мәнінің сыртқы ортаның температуралық әсеріне $-T$ тәуелділік функциясының аналитикалық түрі және нақты байланысы тәжірибе түрінде де түзу сызықты болуы тиіс:

$$\lambda = k * T + b \quad (1.17)$$

мұндағы b мәні және

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

коэффициенттерінің мәндері толқын ұзындығының өзгеріс диапазоны мен температуралық өзгерісі диапазоны арасындағы коэффициенттің мәнін анықтау және сенсорды қолдану барысында үнемі тұрақты шама болып қалуы тиіс. Өз кезегінде бұл екі шама арасындағы байланысты нақты анықтау үшін Брэгг торы сенсорын жасау кезіндегі барлық негізгі параметрлерді өлшеу және олардың температураға тәуелдігін анықтау қажет.

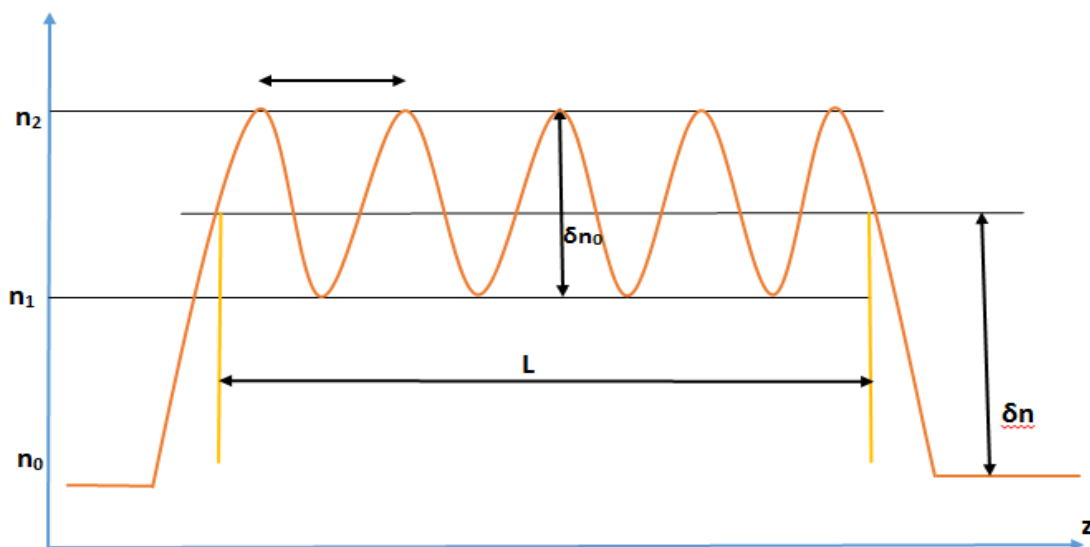
Брэгг торының ұзындығы қолдану мақсатына байланысты бірнеше миллиметрден бірнеше сантиметрге дейін өзгереді. Модуляция периоды бірнеше жүздеген нанометрге дейін өзгереді. Othonos A. еңбектерінде сыну көрсеткішінің флукуациясы талшық бойымен таралған жарықтың жіңішке спектрлік жолағы Брэгг шартын орындау арқылы кері шағылуын көрсетеді [11].

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \cdot \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \Rightarrow \lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.19)$$

мұндағы Λ - тордың периоды, λ - жарықтың вакуумдағы толқын ұзындығы және n_{eff} - жарықтың талшықтағы эффективті сыну көрсеткіші.

Оптикалық талшық бойымен таралатын сәуле тура бағытталған сәуле мен кері шағылған жарықтың бірі-бірімен әсерлескен модальдық комбинациясы ретінде қарастырылады. Оптикалық талшықтың тура бағытталған сәуле модалары үздіксіз функцияны қалыптастырады, ал бағыттауышы β_i тұрақты таралуының дискретті жиынтығына сәйкес келеді. Сыну көрсеткішінің өзгерісі болмаған жағдайда, модалар бір-бірімен әрекеттеспей таралады. Сол себептен сыну көрсеткішінің модуляция периоды, таңдалған жарық жолы модалардың арасында қажетті резонанстық әрекеттесу болатындай етіп таңдалады. Бұл сыну көрсеткішінің модуляциясы оптикалық талшықтың негізгі модасын кері бағытта таралатын модамен байланыстырады. Соның нәтижесінде, талшықты Брэгг торынан оптикалық талшық бойымен дискретті толқын ұзындықта таралатын сәуле шағылады. Шағылу коэффициенті сыну көрсеткіші модуляциясының тереңдігіне байланысты, ал шағылудың орталық толқын ұзындығы (1.5) Брэгг шарты бойынша анықталады.

Оптикалық талшықтың өзегі бойынша таралатын жарықтың сыну көрсеткіші әр тор бойынша шағылады. Егер Брэгг шарты орындалмаса, онда тордың әр қырына фаза бойынша жарық түспейді, соның салдарынан өшеді. Kashyap R. ғылыми зерттеуінде Брэгг шартын қанағаттандыратын толқындар үшін сыну көрсеткіш торының әр қырынан шағылған жарықтар қосылады және талшық бойымен кері бағытта таралады [12]. Орташа сыну көрсеткіші n_0 бірмодаль оптикалық талшықтың өзегінде қалыптасқан біртекті Брэгг торын қарастырайық. Сыну көрсеткішінің профилі келесі теңдеулер арқылы көрсетіледі. Сыну көрсеткішінің модуляциясы (сурет 1.6) периодты талшық бойымен периодты өзгеретіндей етіп жазылауы мүмкін:



Сурет 1.6 - Талшық өзегіне жазылған сыну көрсеткішінің модуляциясының Брэгг торын құрауы

Мұндағы Λ - тордың периоды, L - тордың ұзындығы, n_1 және n_2 - сыну көрсеткішінің минимум және максимум мәндері, n_0 – тордың екі шетіндегі талшық өзегінің сыну көрсеткіші, δn_0 - n_1 және n_2 орта мәні, δn - δn_0 мен n_0 арақашықтығы.

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

Δn - Брэгг торындағы сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы Λ - тордың периоды, z – талшық осі бойындағы арақашықтық. Байланысқан модалар теориясы арқылы Брэгг торынан кері шағылған спектрдің функциясын төмендегідей өрнектеуге болады:

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

мұндағы $R(\lambda, l)$ – l тор ұзындығының және λ - толқын ұзындығының функциясы ретінде тордың шағылуы, Ω – байланыс коэффициенті, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ – толқындық вектордың өзгеруі, мұндағы $k = 2\pi n_0/\lambda$ – таралу тұрақтысы және $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$. Сыну көрсеткішінің модуляция функциясы мен байланысу коэффициенті:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda} \quad (1.22)$$

мұндағы $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$, ($V \geq 2,4$) – талшық өзегінің негізгі мода интенсивтілігінің процентін анықтайтын функция.

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

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l) \quad (1.23)$$

ТБТ шағылу коэффициенті мәні артқан сайын талшықты Брэгг торының ішіндегі модуляцияның сыну көрсеткішінің тереңдігі көп болады. (1.1) өрнекте көрініп тұрғандай, ТБТ резонанстық толқын ұзындығы световод өзегінің сыну көрсеткішінен және сыну көрсеткіштің модуляция периодынан тәуелді. ТБТ негізгі параметрлерінің бірі Δn сыну көрсеткішінің бағытталған модуляциясы болып есептелді. Әлсіз шағылатын ТБТ сыну көрсеткішінің бағытталған модуляциясының амплитудасын бағалау үшін келесі формуланы қолдануға болады:

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

мұндағы r_{max} – Брэгг резонанстық торының орталық толқын ұзындықтағы шағылу коэффициенті. Мысалы Брэгг резонансы 1550нм, шағылу 10% коэффициенті және ұзындығы 15мм тор ТБТ үшін Δn сыну көрсеткішінің бағытталған модуляциясы шамасы (1.25) формула бойынша шамамен $1,077 \times 10^{-5}$ болады.

Жартылай биіктіктегі ТБР шағылу спектр жолағын есептеу келесі түрде болады [11, с. 8]:

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

мұндағы N – тордың штрихтар саны. α параметрі болады тек күшті-шағылдыратын торлар үшін 1 – ге тең (100% ТБР шағылдыруы), ал әлсіз-шағылдыратын торлар үшін $\alpha \approx 0,5$.

1.3 Брэгг торын жасауға қажетті материалдар мен технологиялар

Брэгг торын жасауға қажетті материалдар мен технологиялар туралы қысқаша мағлұматтарды С.А. Варжелдьдің әдістемелік құралынан [13] қарастыруға болады.

Германий-силикатты шынысының фоторефрактивтілікті құбылысы деп оның сәулелену әсерінен сыну көрсеткішінің өзгеру қасиетін айтады. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. ғылыми әдебиеттерде шыныдағы шағылысуы кезінде болатын процестерді сипаттау үшін «фотосезімталдық» кең мағынасын қолданады, бұл кезде тек оның сыну көрсеткіші ғана өзгермей, сонымен қатар басқа да материалдық қасиеттері өзгереді [14].

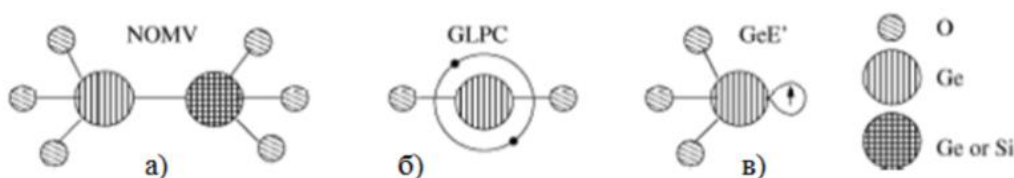
Yuen M.J. зерттеулерінде германий-силикатты шыныларында жұтылуларында 185, 242, 325 нм маңында орналасқан УК диапазон спектрінің үш максимум мәндері бар [15].

Германийдің GeO_2 мен GeO химиялық жалғанулары сәйкес келетін Ge^{+4} пен Ge^{+2} қышқылдануының екі тұрақты жағдайы болады. 185 нм-ге жұтылудың максимум мәні GeO_2 -мен байланысты, өз кезегінде 242 мен 325 нм-гі жұтылу максимум мәні GeO -мен байланысты. Дегенмен 242 нм-ге жұтылу максимум мәні синглет-синглетті ауысуға сәйкес келеді, бұл кезде 325 нм жұтылу максимум мәні триплет-синглетті ауысуға сәйкес келеді. Санның спиндік кванттық ережесі триплет-синглетті ауысуға тиым салынған деп айтса да, шын мәнінде мұндай ауысымның болу мүмкіндігі айтарлықтай төмен. 242 нм жұтылуының шыңы 325 нм қарағанда 1000 есе қарқынды болады. Бұл ауысу мүмкіндігіне байланысты жұтылу 325 нм жолағымен салыстыру бойынша 242 нм жолағы үшін 1000 есе көп екендігін білдіреді; басқаша айтқанда, синглет-синглетті ауысу триплет-синглетке қарағанда 3 ретке «рұқсат етілген». Осылайша, 325 нм-ге жұтылу жолағы GeO триплет-синглетті ауысыммен қоздырылған, ал 242 нм-ге жұтылу жолағы GeO синглет-синглетті ауысыммен қоздырылған деп қорытындылауға болады.

242 нм-ге жұтылу жолағы ультра күлгін сәулеленуі көмегімен GeO_2 қоспаланған сыну көрсеткішінің торын талшыққа жазу үшін ең тиімді және жиі қолданылатыны болып табылады. Берілген толқын ұзындығы 5 эВ энергиясына сәйкес келеді.

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

5 эВ шамасындағы жұтылу жолағының нақты зерттелуі Hosono H., Abe Y., Kinser D.L., Weeks R.A., Muta K., [17] жұмысында келтірілген. Авторлармен жұтылу екі 5,06 мен 5,16 эВ шыңы бар екі фактормен байланысты екендігі көрсетілген, олар сәйкесінше германий-силикатты шынысының құрылымының біртекті еместігімен байланысты, нақты айтқанда, бейтарап оттегі вакансиясымен (БОВ) (немесе, сөзбе сөз айтқанда бейтарап оттегі моновакансиясы – neutral oxygen monovacancies (NOMV)) және германидің екі валентті күйімен Ge^{2+} . Бірінші ақау 1.7(a) суретінде көрсетілген, оның құрылымында оттегі атомы жоқ, ал германий атомы басқа германий атомына немесе кремний атомына жалғанады. Екінші ақау 1.7 (б) суретінде көрсетілген және оттегінің екі атомымен жалғанған, еселенбеген екі электроны бар Ge^{2+} ионын білдіреді. Janer C., Rivas L.M., Rubio R.M., Galo J.L., Navarro L., Dong L., Pinkstone J., Russell P.St. J., Payne D.N. зерттеулерінде берілген ақауларды жалпы жағдайда, германий оттегі-дефицитті орталық деп атайды (ГОДО) [18-19].



Сурет 1.7 - Ақаулардың құрылымы

5,06 эВ-ге жұтылу жолағы 0,38 эВ жартылай биіктіктегі толық енге ие, ал 5,16 эВ жұтылу жолағы – 0,48 эВ [17, с. 9].

1.1-кестесінде $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ мен GeO_2 шыныларында Ge^{2+} бейтарап оттегі вакансиясы мен германидің дивалентті жағдайының концентрациясы келтірілген. Кестеден көрініп тұрғандай, GeO_2 концентрациясының өсуімен бейтарап оттегі вакансиясының германийдің дивалентті күйіне қатынасы да өседі, бірақ Ge^{2+} иондары талшықтың фотосезімталдығын анықтаушы негізгі ақауы болып табылады, өйткені германидің дивалентті күйінің мөлшері бейтарап оттегі вакансиясына қарағанда екі қатарға көп.

Кесте 1.1 - $\text{GeO}_2:\text{SiO}_2$ шыныда Ge^{2+} иондары мен бейтарап оттегі вакансиясының концентрациясы

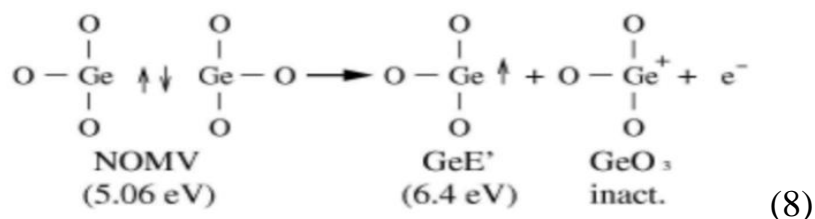
Шынының құрамы	БОВ концентрациясы (см ⁻³)	Ge ²⁺ иондарының концентрациясы (см ⁻³)	БОВ-ның иондарына қатынасы	Ge ²⁺
5GeO ₂ :95SiO ₂	2,2x10 ¹⁶	1,8x10 ¹⁸	0,012	
10GeO ₂ :90SiO ₂	6,0x10 ¹⁶	1,3x10 ¹⁸	0,046	
GeO ₂	2,2x10 ¹⁸	1,3x10 ¹⁹	0,18	

SiO₂ шыны сонымен қатар 5,02 мен 5,15 эВ-ге екі ұқсас жұтылу шыңы бар, олар силикатты шынының ұқсас ақауларына байланысты. Дегенмен ақаулар концентрациясына негізделген SiO₂ мен GeO₂ шынылар арасында айтарлықтай айырмашылықтар бар. GeO₂ мен GeO₂:SiO₂ шыныларында екі ақаудың да концентрациясы Ge иондарының жалпы санының 10⁻³-10⁻⁴ құрайды. Осы кезде SiO₂ әйнегінде ұқсас ақаулардың концентрациясы Si иондарының жалпы санының 10⁻⁹ құрайды. Бұл GeO₂ жалғануы SiO₂ жалғануына қарағанда тұрақты және осыған байланысты GeO₂-ның GeO-ға бөлінуі SiO₂-ның SiO-ға бөлінуіне қарағанда айтарлықтай оңайлығымен түсіндіріледі.

5 эВ-ге германий-силикатты шынының фотосезімталдығының толық моделі зерттеу жұмыстарында келтірілген.

Nishii J., Fukumi K., Yamanaka H., Kawamura K., Hosono H., Kawazoe H. зерттеулерінде жоғарыда көрсетілгендей, 5,06 эВ-ге жұтылу жолағы бейтарап оттегі вакансиясына жатады және төменгі қуат көзімен УК сәулеленуімен түссізденуі мүмкін, мысалы Hg немесе Хе шамдарымен [20,21].

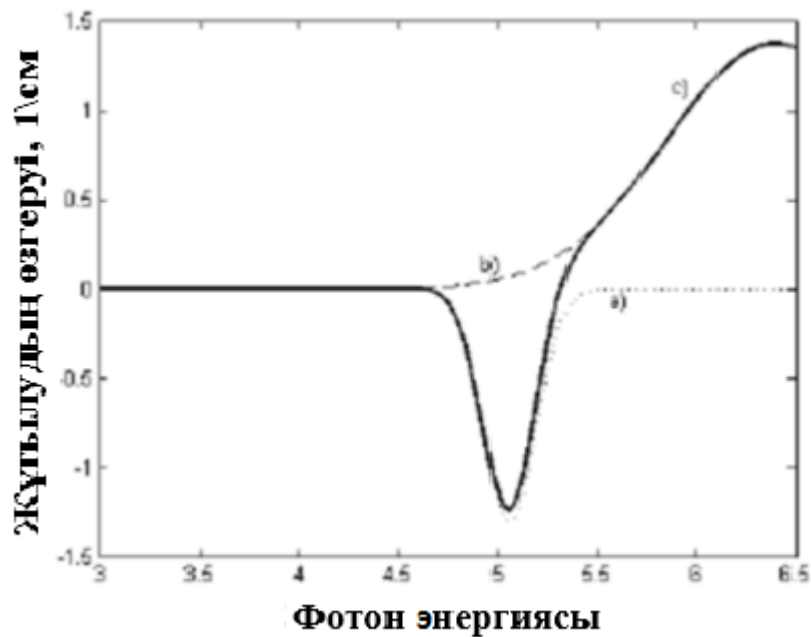
(8) реакциясы бейтарап оттегі вакансиясынан GeE' орталықтарын түзу процесін көрсетеді.



1.7(в) суретінде, сонымен қатар ілулі байланыс деп аталатын оттегінің үш атомымен және бір еселенбеген электронымен жалғанған германий атомын білдіретін GeE' орталығы келтірілген. Неуструев В.Б. зерттеуінде берілген ақау сыну көрсеткішінің ультра күлгін сәулелену әсерінен оң өзгеру көзінің бірі болып табылады [22].

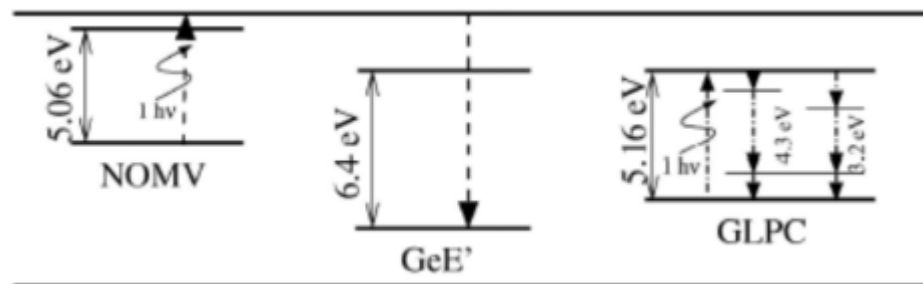
1.8-суретте 230 сағат ішінде Hg шамамен шағылыстырудан кейінгі 10GeO₂:90SiO₂ әйнегінің жұтылуының өзгеру спектрі келтірілген. Суреттен (8) реакциясына сәйкес 5,06 эВ жұтылу жолағы төмендейтіні, ал 6,4 эВ жұтылу жолағы өсетіндігі көрініп тұр.

5,16 эВ жұтылу жолағы төмен қарқынды ультракүлгін сәуле көзімен түссіздене алмайды, бірақ ол 3,2 эВ мен 4,3 эВ байқалатын люминесценттігіне жауапты. Бұл жағдай GLPC төменгі қарқынды УК сәулеленуінің әсерінен басқа ақауға ауыспайтындығы, неғұрлым жоғары энергетикалық деңгейге ауысатындығын көрсетеді [18, с. 11] (сурет 1.9).



Сурет 1.9 - 230 сағат ішінде Hg шамымен шағылыстырудан кейінгі $10\text{GeO}_2:90\text{SiO}_2$ айнегінің жұтылуының өзгеріс спектрі

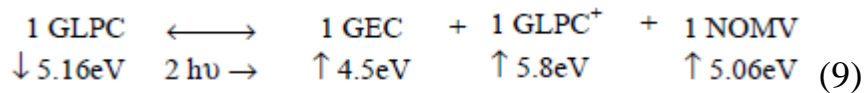
50,6 эВ мен 5,16 эВ бірфотонды жұтылудың сұлбалық энергетикалық диаграммасы 1.10 - суретте келтірілген.



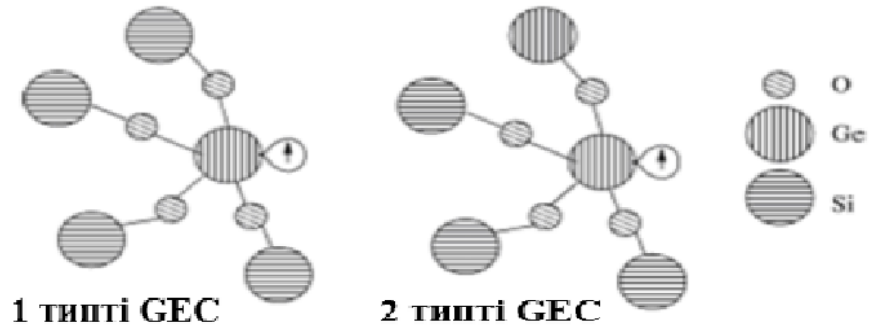
Сурет 1.10- Бірфотонды жұтылудың сұлбалық энергетикалық диаграммасы

ТБТ бірфотонды жұтылуы тиым салынған аумақтың ішіндегі жоғары деңгейіне қоздырылады, бірақ, берілген деңгей өткізгіштік аймағына жақындығы сонша, жылу энергиясы иондауды жүргізуге жеткілікті.

5,16 эВ жұтылу жолағы жоғары қарқындылықты УК көзімен түссізденуі мүмкін, мысалы эксимерлі лазермен (ArF, KrF). Осы лазерлердің сәулелену қарқындылығы Hg шамдарына қарағанда 7 рет үлкен болғандықтан, энергияның тығыздығы екі фотонды жұтылу үшін жеткілікті. Осылайша, GLPC-мен байланысты 5,16 эВ жұтылу жолағының түссізденуі кезінде GEC мен GLPC^+ жаңа бояу орталықтары түзіледі.



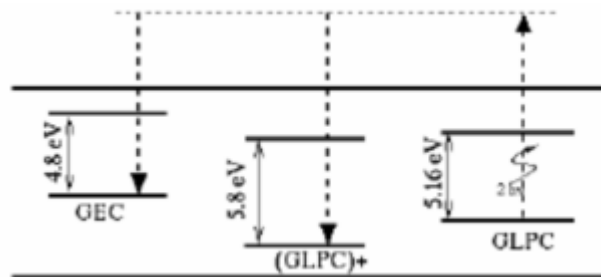
GEC орталығы германидің төрт координацияланған атомын электрондардың басып алуы нәтижесінде түзіледі. GEC-ті Ge көршілес атомдарының мөлшеріне тәуелді I мен II типтеріне бөледі. Берілген орталықтардың құрылымы 1. 11- суретте келтірілген.



Сурет 1.11 - GEC орталықтарының құрылымы

GEC орталықтары болып түзу үшін электрондардың доноры GLPC орталықтары болып табылады, олар өзінің электронын беріп GLPC⁺ орталықтарына айналады.

5,16эВ жұтылу жолағының түссізденуі кезінде GEC орталықтарының концентрациясының өсуіне байланысты 4,5 эВ жұтылу жолағының өсуі туындайды және GLPC⁺ орталығының концентрациясы өсуіне байланысты 5,8 эВ жұтылу жолағының өсуі туындайды. Екіфотонды жұтылу үшін сұлбалық энергетикалық диаграммасы 1.12- суретте келтірілген.

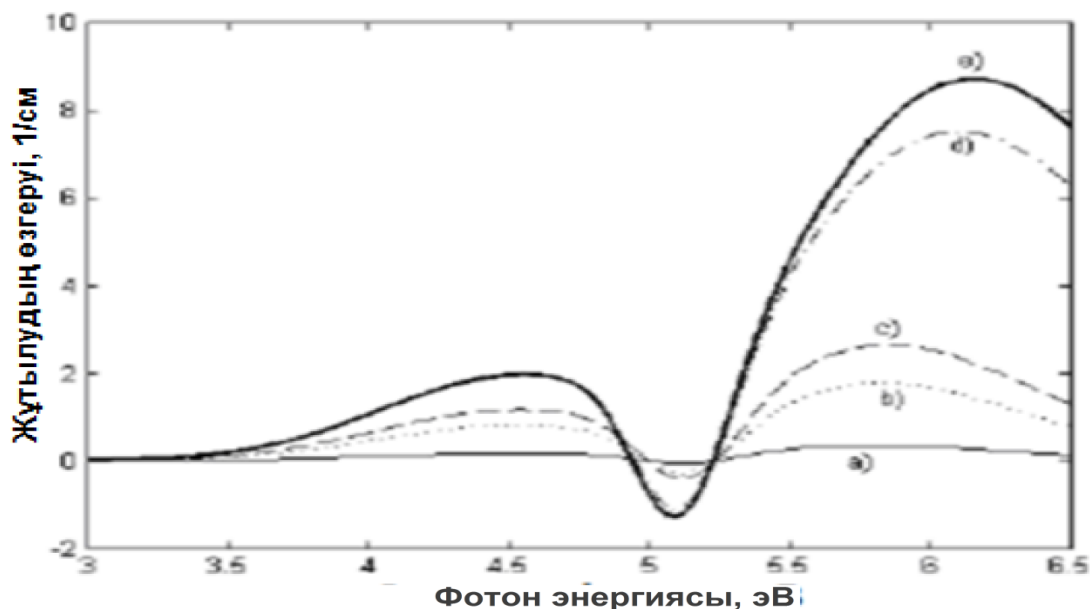


Сурет 1.12 - Екіфотонды жұтылу үшін сұлбалық энергетикалық диаграммасы

Екіфотонды жұтылуында 5,16 эВ жолағы ХеСІ эксимерлі лазерімен (4 эВ) сәулелену [20, с. 12] кезінде түссізденеді, ал жоғарыда айтылғандай сәулеленудің жеті есе төмен қарқындылығына ие Нg шамымен сәулелену кезінде түссізденбейді [18, с. 12]. Германий-силикатты шынының тиым салынған аймағының ені 7,1 эВ мен 5,63 эВ аралығындағы шекте жатады, ол кремний диоксиді мен германий диоксидінің тиым салынған аймағының еніне сәйкес келеді. Кез-келген жағдайда бұл мән KrF пен ХеСІ эксимерлі

лазерлерінің фотондарының еселенген энергиясынан айтарлықтай төмен болады.

1.13-суретте KrF эксимерлі лазерімен сәулеленуі кезінде $10\text{GeO}_2:90\text{SiO}_2$ әйнегінің жұтылуының өзгеру спектрі көрсетілген. Суреттен 5эВ маңындағы жұтылудың төмендеуі мен 4,5 эВ өсуі көрініп тұр. 6 эВ маңындағы жолақ жұтылу спектрінде GEC орталығымен байланысты 5,8 эВ және GeE орталығымен байланысты 6,4 эВ жолағының суперпозициясы болып табылады.



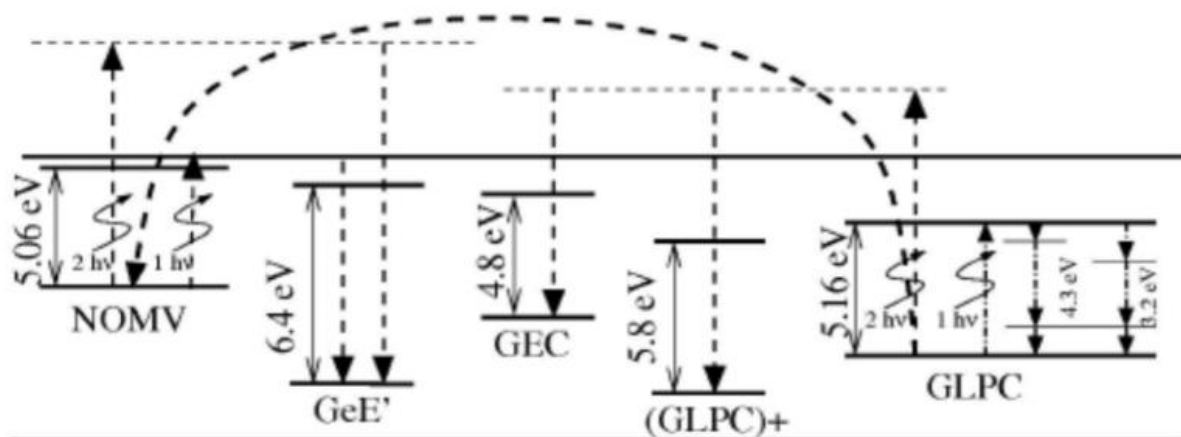
а) 10 импульс, б) 60 импульс, с) 100 импульс, д) 1000 импульс, е) 30000 импульс

Сурет 1.13 - KrF эксимерлі лазерімен сәулеленуі кезінде $10\text{GeO}_2:90\text{SiO}_2$ әйнегінің жұтылуының өзгеру спектрі

Германий-силикатты шынының ТБТ концентрациясы GLPC - ке қарағанда екі есе аз. Дегенмен, түссізденген GLPC мен түзілген GeE орталығының арасындағы пропорция шамамен 1:1 құрайды. Бұл ерекшелікті түсіндіру үшін (3) реакция жүзінде GLPC мен GEC орталықтарының бояуынан басқа виртуалды ВОВ (NOMV) түзіледі деп тұжырымдаған.

Бұдан басқа [18, с. 13]; авторлары ТБТ (NOMV) байланысты 5,06 эВ жұтылу жолағының түссізденуі бастапқы немесе виртуалды деп көрсеткен (яғни (9) реакциясы тек бірфотонды кезінде ғана емес, сонымен қатар екіфотонды жұтылу кезінде де ағады).

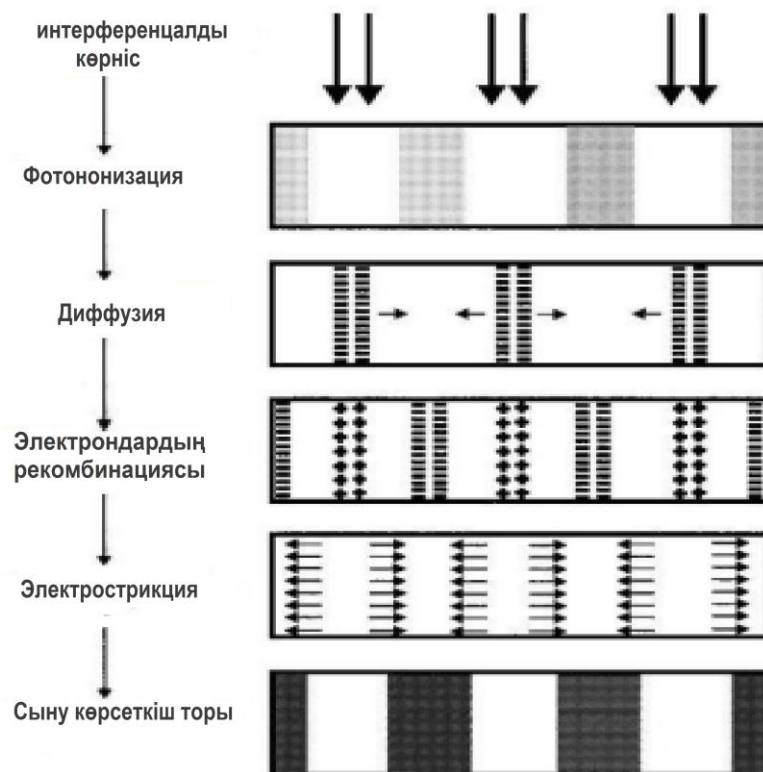
Осылайша, германий-силикатты шынының фотосезімталдық моделінің сұлбалық энергетикалық диаграммасының соңғы түрі көрсетілген. (сурет 1.14)



Сурет 1.14- Германий-силикатты шынының фотосезімталдық моделінің сұлбалық энергетикалық диаграммасы

1.4 Талшықты Брэгг торының жазылу жолдары мен әдістері

Жұмыста фоторефрактивтік эффекттің электрострикциялық моделі көрсетілген [22, с. 14]. Электрострикция құбылысы ультра күлгін сәуленің интерференциялық суреттері арқылы жазудың нәтижесінде зарядтардың кеңістіктік периодтық тор құру құбылысымен түсіндіріледі. Автордың бағалауы бойынша, электрострикцияны ТБТ-ға қалыптастыруға қарағанда электролиттік эффект үлесі жоғарылайды. Бұдан басқа электрострикция германийдың үлкен концентрациясы бар оптикалық талшықтарға ІІа типті ТБТ ді қалыптастыруды түсіндіреді. Экспозиция кезінде сыну көрсеткіші $\sim 10^{-4}$ модуляциясы мен ТБТ құрастыру үшін қолданыстағы фотозлектрондардың 0,1% -дан кем болмауы керектігі жұмыстың авторы Неуструев В.Б. тарапынан көрсетілген (сурет 1.15).



Сурет 1.15 - Сыну көрсеткіштерін пішіндеудің электрострикциялық моделі

Электрострикциялық модель төмендегідей процестермен анықталады 1.3 бөлімде көрсетілгендей, германий-силикатты талшықтарда фото иондалуы оң зарядталған орталық және еркін электрондарды тудырады. Еркін электрондар кедергі үлгісінің үлкен қарқынды аймақтан кіші қарқынды аймаққа өтуін сөйілтеді (сурет 1.15).

Зарядтар торын тұрақты қалыптастыру үшін электрондардың тұрақты тұзақтары қажет. Олар германийдің төрттік келісілген атомында электрондарды ұстау нәтижесінде қалыптасқан белгілі парамагнитті орталықтар болып табылады. Ұсыну процесінде бос электрондар бөлімі бастапқы донорларына қайтпайды. Релакциядан кейін интерференциялық жолақтарда артық оң зарядтар қалыптасады. Артық теріс зарядтар әрбір интерференциялық жолақтар шетіне теңдестірілген максимумдар қалыптастырады. Зарядтар торында талшықтар осі бойымен ауысып тұратын U электр өрісі туындайды. Электрострикция нәтижесінде өзекті максималды басқанда OT максималды U аймағында $U = 0$ аймағы сияқты серпімділік заңы бойынша созылу болады. Осылайша зарядтар торы $OB = (V - V_0)/V = \Delta V/V = AU^2$ өзегі көлемінің серпімді периодты деформациясын тудырады.

Германий-силикатты талшықтардағы сыну көрсеткіші торының электрострикционды моделінің қалыптасуының түсіндірмесі [22, с. 14] жұмыста көрсетілген.

Оптикалық сәулелену мен II типті ТБТ әсерінен ТБТ пішіндеудің мүмкін болатын модельдерін қарастырайық. Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C. зерттеулерінде торлардың өсуінің әртүрлі динамикасы, сонымен қатар

торлардың әр түрлі типтерінің айтарлықтай ерекшеленетін термоберіктілігі оптикалық сәулелену әсері астында сыну көрсеткіші индексінің өзгеруіне қатысатын бірнеше механизмінің бар болуының көрсетеді [23]. Торларды қалыптастыру механизмі бойынша Кукушкин С.А., Осипов А.В., Шлягин М.Г. еңбегінде келтірілген мәндер көп мәнді емес және кейде талшықтың және колданыстағы лазерлердің әр түрлі типтеріне жатады [24]. Жоғарыда қарастырылғандай оптикалық радиациялау көмегімен ТБТ - ді электрострикционды модельмен қалыптастыру орталық бояу моделін, ісу моделін және созу моделін бөледі. Берілген модельдер германий-силикатты талшықтарда I типті ТБТ қалыптастыруына үлес қосады, бірақ олар ТБТ II типті қалыптасуды түсіндіре алмайды.

Термосерпімді кернеулермен түзілген II типті торлары кварц шынысының шектік бұзуының лазерлік импульсына жақын энергияның тығыздығы ~ 1 Дж/см²[14, с. 15] кезінде жазылады.

Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. зерттеулерімен II типті тордың қалыптасуы көрінбейтін денелердің жоғарғы бөліктерінің лазерлік зақымдану механизмімен түсіндіруге болады [25]. Мөлдір қатты денелердің зақымдануы лазерлік радиация энергиясын түрлі механизмдермен созуынан туындауы мүмкін: Термо серпімді жылу жарылысы және өздік механизм (шок немесе көп фотонды иондалу) [25, с. 15].

Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. зерттеулерінде лазерлік зақымдану кезінде жарықшаларды қалыптастыру процесі радиация энергиясын сіңіру механизміне байланысты емес, бірінші кезекте лазерлік импульстің ұзақтығына байланысты [26]. Бұзылу сипаттамасын іске асыратын 15 лазерлік импульстардың ұзақтығының диапазоны қатты дене материалдарының жылу физикалық параметрлерімен анықталады. Германи-силикатты шыны үшін ұзақтығы милли секунд болатын импульстар аймағында балқытуды бақылау тиіс, үлкен және аз ұзындықтағы импульстер аймағында - абеляция, ал наносекунд аймағында – зақымдану локальді термо серпімді кернеуден жарықшаларды қалыптастыру механизмі бойынша жүреді [26, с. 16].

Теориялық тұрғыдан ТБТ термосерпімді кернеу мен қалыптастыру дамыған. Авторлар механикалық кернеу локальданған талшық аймағында оптикалық радиация көмегі нәтижесінде атомның және микропордың өсуі болатын сыну көрсеткіші торларын қалыптастыру механизмін ұсынған. Авторлар еңбегіндегі қарапайым талшық үшін өзектің орталық бөлімі және өзектің арасы мен талшық қабықшалары арасындағы бөлім шекара болып табылады. Осындай аймақтағы ішкі қосымша қабықшасы бар талшық үшін механикалық кернеу локализациясына екі аралықтағы бөлімнің кез-келген шекарасы қызмет етуі мүмкін. Микробос орындармен локализацияның өсуі нәтижесінде екі аралық бөлімнің шекараларында жарықшалар туындайды.

Оптикалық талшықтың екі арасындағы бөлім шекарасында лазерлік зақымдану нәтижесінде қалыптасқан жарықшалар ось бойымен таралатын жарық тудырады. Өз кезегінде сыну көрсеткіші модуляциясын құрастырады.

Reekie L., Archambault J.L., Russell P. St. J. зерттеулерінде II типті Брэгг торы үшін сыну көрсеткіш модуляциясы $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ [27] шамасына жетеді.

[24, с. 16] жұмыста автор тарапынан II типті ТБТ қалыптастырудың электрострикциондық моделіне негізделген басқа моделі ұсынылған. I типті ТБТ жазу кезінде де зарядтар торы туындайды. Айырмашылығы, импульстің үлкен энергиясы кезінде шынының құрылымына өзгеріс әкелетін электрлік тесу болады.

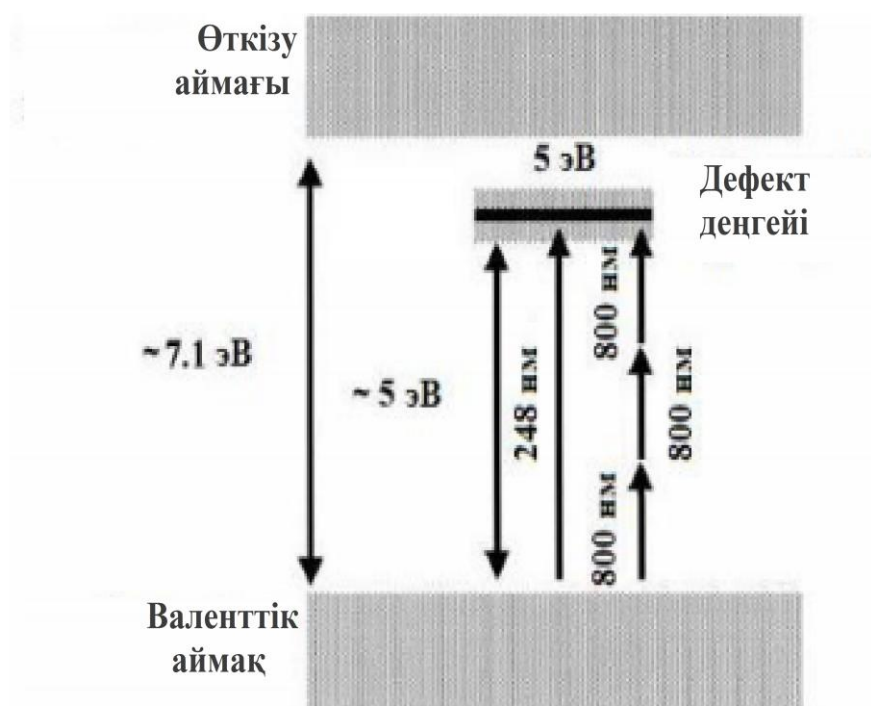
Оптикалық талшықтардың фоторефрактивтілігін арттыру жолдарын қарастырайық. SMF-28 стандартты телекоммуникациялық талшықта Брэгг торларын жазу кезінде, мұндай талшықтар фото сезімталдығы нашар және сыну көрсеткіші торын эффективті жазылуына жетпейтін қанықтығы төмен болғандығынан проблемалар туындайды [14, с. 16]. Әдебиетте германий-силикатты оптикалық талшықтың фоторефрактивтілігін арттырудың бірқатар жолдары көрсетілген. Талшық өзегіндегі германий диоксидінің концентрациясын жоғарылату негізгі әдіс болып табылады [19, с. 16]. Басқа әдістер бор, олово, азот, фосфор, сурьма сияқты химиялық элементтерді қолдана отырып, фоторефрактивтілікті арттыруға бағытталған.

Жоғарыда көрсетілген әдістермен дайындалған оптикалық талшықтар толқын өткізгіштік және материалдық сипатқа ие болады. Көрсетілген кемшіліктеріне байланысты оның толқын өткізушілік сипатамасына ешқандай өзгерістер енгізбестен талшықтың фото сезімталдығын арттыруға қызығушылық туындайды. (Bilodeau F., Malo B., Albert A., Johnson D.C., Hill K.O., Hibino Y., Abe M., Kawachi M.) Мысалы, грелка отымен шыныны қанықтыру әдісі, сыну көрсеткіші стандартты талшықтың ретін арттыруға қабілетті [28]. Сонымен қатар бұл сіңіру жолағы бар аймақтардағы кварцтық шыны құрылымында ОН тобының концентрациясының өсуі болады. Басқа әдісте температураның төмен және қысымның жоғары кезінде шынының молекулярлы сутегімен қанықтыру түсіндіріледі. Бұл жағдайда сутегі шыныда физикалық еріген жағдайда болады. Осылай көшкен талшықты түзеу шыны құрылымында сутегі бар кезде жоғары фотосезімталдыққа ие. Сутегінің кері диффузиясы кезінде бастапқы мәнге қайта отырып, қоршаған ортаның фото сезімталдығы азаяды. Сондықтан сутегілік өңдеуге көшкен талшықты төмендетілген температурада сақтау қажет [14, с. 17]. Chojetzki C., Rothhardt M., Ommer J., Unger S., Schuster K., Mueller H.R. еңбектерінде қоспалау және сутегі мен өңдеу талшықтың фото сезімталдығын жоғарылатауына және I типті ТБТ үшін 40% ке дейінгі және II типті ТБТ үшін 100% ға дейінгі шағылу коэффициенті бар оптикалық талшықта Брэгг торын дифракциялық жазуды жүргізуге мүмкіндік береді [29].

II KrF типті Брэгг торларын эксимерлік лазермен жазу әдісі УФ силикатты кварцты радиациалаумен бұзу әсерімен байланысты болады. Ол 1970 жылдан бастап талшықтар мен жұқа пленкаларда оптикалық құрылғыларды шығару мақсатында кең зерттелуде. Бірақ, көрінетін лазермен және ИК сіңірумен шыныны бұзу ұзын толқындарда фотон энергиясының аздығы әсерінен еленбеді. Davis K.M., Laser Miura K., Sugimoto N., Hiraio K. ғылыми

еңбектерінде лазерлердің дамуы арқасында фемтосекундты ұзындықтағы импульсті тудыру қабілеті пайда болды [30].

Mihailov S.J., Dragomir A., Bernier M., Becker M., Fang X., Walker R.B., Kelleher P. зерттеулерінде соңғы уақыттарда фемтосекундты ұзындықтағы импульсті лазерлер көмегімен сыну көрсеткіші торларын жазуға арналған жұмыстар басылымы көбейді [31-37]. Аз ұзындықтағы радиацияны сіңіру импульсінде өте жоғары интенсивтілікте радиациялау жоғары фотонды процесс нәтижесінде болады. Германий-силикатты шыныларда бірфотонды және көпфотонды сіңіру арқылы фотоиондалудың серпімді сұлбасы сурет 1.14-те көрсетілген. Фотондарды сіңіру кезіндегі сияқты германий-оттегі тапшы ортасына сәйкес электрон валентті зонадан дефектілі деңгейге көше алады. Бір уақытта энергиясы аз бірнеше көп фотонды сіңіру кезінде толқын ұзындығы сіңіру жолағына түспеуі мүмкін. Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалеv В.Е. зерттеулерінде электронның дефектті деңгейге өтуі қоздыру қуатының көп энергиясын талап етуі мүмкін [38]. Дегенмен, наносекундты ұзындықтағы импульстарға жететін 10-100 МВт/см² интенсивті радиациямен салыстарғанда бұндай сіңірудің ықималдылығы аз және фемтосекундты ұзындықтағы импульсте оңай жететін 10-100 ГВт/см² интенсивті тәртіпке көшу кезінде тез артады. Германи-силикатты ОТ фемтосекундты ұзындықтағы импульспен радиациялау кезінде туындайтын механизмнің фотоиондалуы 1.16 - суретте көрсетілген.



Сурет 1.16-Германий-силикатты шыныда бір фотонды және көп фотонды жұтылу арқылы фото-иондалудың жеңілдетілген сұлбасы

Загорулько К.А., Крюков П.Г., Дианов Е.М., Драгомир А. еңбектеріндегі фемтосекундты импульстар мен оптикалық талшықтарды зақымданусыз және теспей сәулелендіруге болатындығын ерекше атап өтуге болады [39]. Бұдан бөлек сыну көрсеткіші сәулелендіру мен фемтосекундты лазерлерді қолдану ОТ-ны стандартты қамту арқылы ТБТ тікелей жазуға мүмкіндік береді. Бұл әдіс фазалық маскаларды ТБТ қадамдау әдісі мен жазуды талап етпейді және қосымша процедураларсыз стандартты коммерциялық талшықтарды қолдану үшін жарамды. Өндіріс процессінде қойылатын талаптарды төмендету үшін тордың аз уақытта дайындалуы және механикалық төзімділігінің жоғары болуы осы әдіспен ұсынылған басты артықшылығы болып табылады.

Алайда бұл әдісте айтарлықтай кемшіліктер қатары бар: жинақталған сәулеленуді бойлай ОТ жоғары дәлдікті механикалық трансляциясының қажеттілігі және сыну көрсеткіші торларды дара импульспен жазу мүмкіндігінің жоқтығы.

1.5 Брэгг торларын телекоммуникацияда қолдану

Телекоммуникациялық құрылымның жетілуіне байланысты ақпаратты таратудың өсу жылдамдылығының қажеттілігі, ақпараттық ағындардың өсуімен, жаһандық ақпараттық жүйенің деңгейімен және пайдаланушылар санының деректер қоры, талшықты оптикалық байланыс желісі спектрлік мультипликациялық оптикалық арналарда әзірлене бастады (WDM). Қазіргі таңда байланыс желісінің стандарттарына сәйкес әзірленген, көрші арналар арасына қойылған интервал 50 ГГц (шамамен 0,4 нм спектрлік диапазонда 1,5 мкм жақын). Бір арнаның тәжірбиелік байланыс желісінің жылдамдығы олардың ортақ саны 200 ге жеткен уақытта 20 Гбит/с құрайды. Осындай байланыс желісінің ортақ ақпарат беру жылдамдығы 8 Тбит/с құрайды. Қатты дискінің барлық құрылымы 100 Гбайт шамасындағы осындай жылдамдықта ақпаратты беру - 100 миллисекунд. Осындай маңызды прогресс талшықты оптикалық жүйенің күнделікті шарықтауына және олардың элементтік базаларына негізделеді. Жеке алғанда, үлкен көлемді жүйелік бағдарлар және ақпарат қабылдау сәтті игерілуде, жарық өткізгіштерді өткізу белдеуі және оптикалық күшейткіштер жұмысының спектральдық диапазоны кеңейтіледі. Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е. еңбектерінде осыған байланысты сыну көрсеткіші белгіленген жүйелік жұмыста [38-18с] талшықты торлардың маңызды бөлігін белгілеп кеткен жөн.

Талшықты Брэгг торларын қолдануды шектеудің түрі де кездеседі. Бүйірлік ТБТ резонансты басу үшін оның тордағы ұзындығы бойынша сыну көрсеткіші модуляциялық амплитуданы өзгертуге ұсыныс жасалды. Ең жақсы спектрлік мінездеме белгілі бір профильдік заңға сәйкес торлардан тұрады, сыну көрсеткіш модуляциясын тордың ұзындығы бойынша есептейді. ТБТ-ға белгілі бір деңгейлік жүйесін бастыру үшін тәсілдер ұсынылды.

Заманауи байланыс жүйесіндегі ақпаратты беруді шектеу жылдамдығының тағы бір факторы - талшықты түстердің хроматикалық дисперсиясы болып

табылады. Бұл қашықтықты арттыру үшін талшықты түстердің дисперциясының орнын арттыру қажет болып табылады.

Бұл компакттік талшықты элементті пайдалану арқылы жасалуы мүмкін. ТБТ ауыспалы кезеңде болғанда, мұндай тор белгілі бір уақытқа кешігудің спектрлік компоненттік импульс арасында енгізуді және оны бастапқы қалыпқа келтіруді қамтамасыз етеді. Ережеге сәйкес дисперсияның компенсациясы үшін үлкен ұзындықтағы торлар қажет етіледі. Қазіргі таңда 1 метр ұзындықтағы сапалы торлар алынды. Айнымалы кезеңдік тордағы қолжетімді дисперсия шамасы 1000 пс/нм дисперсияның талшықты оптикалық стандартты 50 км бөлігі бойынша 1,55 мкм жүйесінің толқындық ұзындығы бойынша орнын толтыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, компенсациялық дисперсиондық импульсті кеңейтудегі ақпаратты берудің қашықтығын арттырудан бөлек, уақытылы оптикалық сигналды күшейткен жөн. Заманауи талшықты түстердің оптикалық шығындарының әлсізденуін (~0.2-0.3 дБ/км) ескермеген жөн. Ережеге сәйкес, сигналдың күшеюінде әрбір 50-100км байланыс желісінен кейін эрбиондық талшықты күшейткіштер қолданылады (1,55 мкм диапазонының желісі үшін). Бірнеше оптикалық каналдардың бірдей күшейтілуі үшін, күшейткіш вореациялық коэффициенттің күшейтілуі толқын желісі бойынша көп болмауы қажет болып табылады. Ол қолданбалы спектрлік диапазонда күнделікті коэффициенттік күшейтішкішінің жақын болуына байланысты. Өкінішке орай, эрбиондық күшейткіштер спектрлік вариациялық коэффициенттік күшейткішті құрайды. Ол иондық эрбиялық концентрация, оның локальдық ортасы, толқын ұзындығы және оптикалық интенсивті күшейткіші, өзіндік түстік ұзындығы және т.б. сияқты көптеген факторларға тәуелді болып табылады. Талшықты торларды пайдалану спектрлік күшейткішті түрлендіруге мүмкіндік береді, оны тегістейді немесе сигналды күшейткеннен кейінгі қажетсіз спектрлік бұрмалауды жөндейді. Спектрлік күшейткішті белгілеу үшін ТБТ қолданылуы мүмкін екендегін атауға болады.

Бірінші бөлім бойынша тұжырымдамалар

Бірінші бөлімде Брэгг торына негізделген сенсорларды пайдалану жағдайларын ескере отырып, сыртқы ортаның нақты қандай температуралық диапазондарда қолданылатыны, осы диапазонға сәйкес келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазондарын нақты есептеп шығаруға байланысты ақпараттық шолу жасалды. Брэгг торының негізгі спектрлік сипаттамаларының әдістері, дайындау технологияларының артықшылығы мен кемшілігі туралы анықтама берілген.

Берілген тарауда Брэгг торына негізделген сенсорларды зерттеу тақырыбына қатысты ғылыми еңбектер қарастырылды және олардың көпшілігі Брэгг торын жасаудың ерекшеліктеріне, жасау кезінде өзгеретін негізгі параметрлердің сипаттамаларына, Брэгг торын қолдану кезінде сенсордың негізгі параметрлерінің сыртқы әсерлерге – қысым мен температураға тәуелділігі заңдылығын зерттеуге және сенсордың жаңа түрлерін жасаудағы

пайда болатын мәселелерді шешу жолдарына бағытталған. Әдебиеттерге шолу жасаудың нәтижесінде қарастырылатын Брэгг торына негізделген сенсорды модельдеу тақырыбына қатысты ғылыми еңбектердің өте аздығын атауға болады.

Сонымен, Брэгг торын модельдеу және тәжірибелер нәтижелерімен салыстыру арқылы алынған Брэгг торы сенсорының сипаттамаларын зерттеу жұмыстары қарастырылды. Брэгг торын модельдеу жұмыстарына ғылыми шолу жасалынды. Брэгг торы сенсорын модельдеу жұмысында Брэгг торын құрастырушылар мен оны нақты жағдайларда пайдаланушылар арасында байланыстырушы виртуалды құрал ретінде қолданысқа ие болатын нақты бағдарламалық өнімді жасап шығару болып табылады. Зерттелетін Брэгг торының пайдалану жағдайларын ескере отырып, сыртқы ортаның нақты қандай температуралық диапазондарда қолданылатыны, осы диапазонға сәйкес келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазондарын нақты есептеп шығару мақсатында Брэгг торының негізгі спектрлік сипаттамаларын бекіту жұмыстың мақсаты болып табылады.

Берілген бөлім бойынша зерттеу нәтижелері «Қазақстанның жаңа экономикалық саясатын таратуда жас ғалымдардың орны мен рөлі» атты халықаралық Сәтбаев оқуларының еңбектерінде, «Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар: білім беру, ғылым, тәжірибе» атты II «Білім және техникалық ғылымның бәсекеге қабілеттілігі» Қазақстан Республикасының тәуелсіздігіне 25-жыл атты Халықаралық Сәтбаев оқуларының еңбектерінде, Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясында және ҚР БҒМ бақылау Комитетімен ұсынылған ғылыми басылым «ПМУ хабаршысы» энергетика бөлімінде қарастырылды және жарияланды [73-83].

2. ОПТИКАЛЫҚ-ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН СЕНСОРЛАРДЫ, ТОРҒА ЖАЗУ ӘДІСТЕРІ МЕН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Жұмыстың негізгі мақсаттарының бірі ретінде талшықты Брэгг торларын құрастырудың әдістері мен технологияларын зерттеу және құрастырудың негізгі параметрлерінің өзгеру заңдылықтарын қарастыруды атауға болады. Брэгг торының моделін құру кезінде қажет болатын негізгі параметрлердің спектрлік заңдылықтары мен бір-біріне байланыстары қарастырылады. Becker M., Bruckner S., Lindner E., зерттеулерінде Брэгг торын құрастыруға қатысты ғылыми еңбектерді қарастыру нәтижесінде құрастыру процестері – жазуға қолданылатын лазердің түрлері, сәуле шығарудың толқын ұзындығы, жазу әдістері, сәулелену ұшырайтын оптикалық талшықтың түріне және қолданушыға қажетті тордың түрлері бойынша жіктеледі [40].

ТБТ жазуға қолданылатын лазерлер үздіксіз, импульстік, толқын ұзындығы жоғары болатын – ИҚ (инфрақызыл) сәуледен бастап ультракүлгін диапазонға дейін болуы мүмкін. Сәуле көздерінің мұншалықты көп түрінің болуы кеңістіктік және уақыттық когеренттілігін анықтап, ТБТ қандайда бір түрін жазу әдісін таңдауға мүмкіндік береді. ТБТ жазу әдістерінің ішінде кезектесіп жасалынатын фазалық маска әдісі (ФМӘ) және интерферометрлік әдісін (ИӘ) ерекше атап өтуге болады.

Hill K.O., Fujii Y., Kawasaki B.S., зерттеулерін қазіргі кезде әлемнің көптеген ғылыми зерттеу ұйымдары мен құрастыру мекемелері [41, 42] кеңінен қолданады. Уақыт бойынша тұрақты сыну көрсеткіші бар ТБТ 1978 жылы Канадалық зерттеу институтында (Communications Research Centre, Canada) негізгі құрамы кремний оксиді екі (SiO_2) болатын талшықтың өзегіне германий оксиді екіні (GeO_2) легирлеуші қоспа ретінде пайдаланып жасалды. Талшықтың өзегіндегі сыну көрсеткішін модуляциялауды толқын ұзындығы 488 нм болатын аргон-иондық лазерден шыққан сәуле жолын екіге айырып, осыны қайта кездестіру арқылы интерференциялық құбылыстың тұрақты толқынына жолықтыру арқылы құрастырылды.

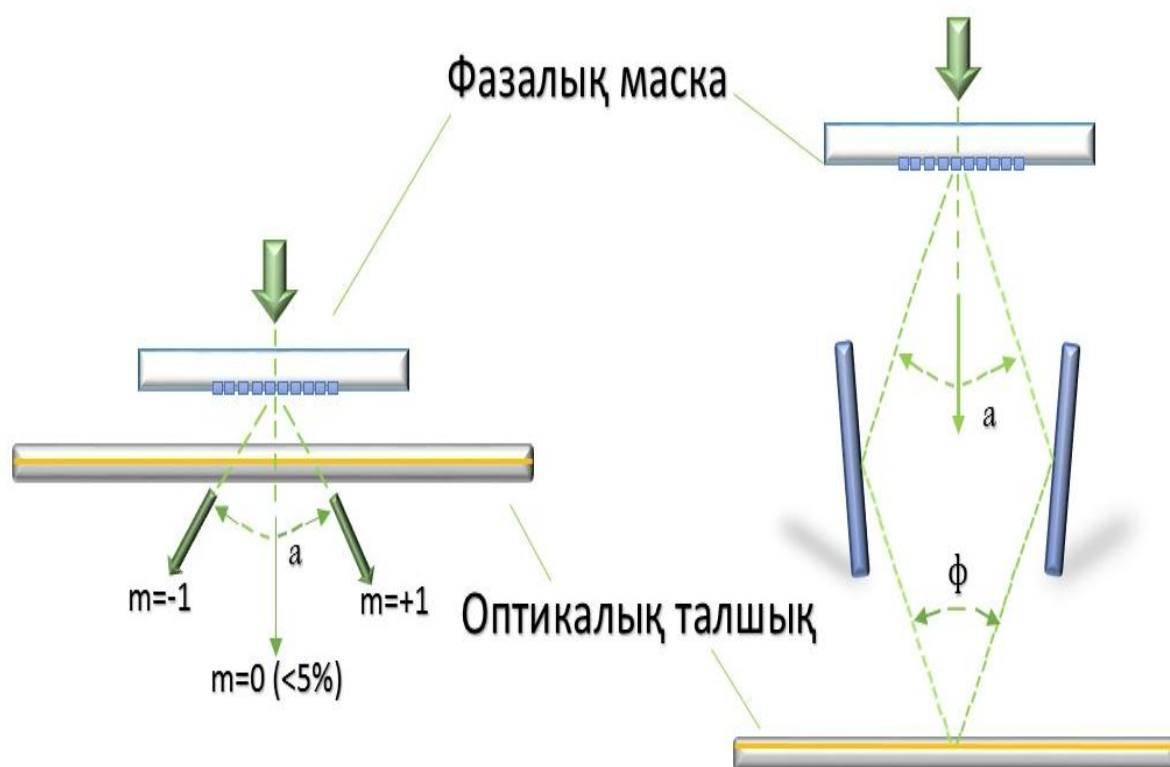
Аталған әдіспен алынған кеңістіктік сыну көрсеткіші жарықтың жүретін жолында резонанстық кері шағылдырушы ретінде Брэгг шартына сәйкес қандай жиілікте жазылса, сол жиіліктегі жарық толқынын кері шағылыстыратын қасиеті бар. [42, с. 17].

Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. 1984 жылы [43] ультракүлгін сәулелерді өзара қиылыстырғандағы интерференциялық суреттердің көмегімен талшықты сәулелендіріп, сыну көрсеткішінің торларын алу мүмкіндігін жариялады.

Осы уақыттан соң талшықты Брэгг торларын зерттеу жұмыстары белсенді дамуын бастады, және қазіргі кезде кері шағылдыру ені -0.01-10 нм болатын, ал эффективтілігі 0.1-99.9% болатын талшықты Брэгг торларын әзірлейтін әдістер кеңінен қолдана бастады.

2.1 Фазалық маска әдісі бойыншы талшықты Брэгг торларын жазу

Бір импульсті эксимерлі лазермен фазалық маска әдісін пайдаланып оптикалық талшыққа Брэгг торын жазу әдісі көп импульстік жазуға қажетті дірілден сақтайтын үстелдер мен дінгектерден қымбат, тұратын сұлбасыз жазуға мүмкіндік береді. Фазалық маска әдісімен ТБТ жазудың принциптік сұлбасы 2.1-суретте көрсетілген.



Сурет 2.1- Брэгг торын фазалық маска әдісімен жазу

Цилиндрлік линза екі өстің бірінен шыққан сәуле көзін фокусқа жинап қажетті энергия тығыздығын қамтамасыз етеді. Сәуле көздері фазалық маскадан өткен соң +1 және -1 мәндеріне дифракцияланады.

+1 және -1 тәртібімен түскен интерференциялық сурет оптикалық талшықтың өзегіне сыну көрсеткіштері кезектесіп өзгертін торды жазады.

Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А. зерттеулерінде бұл әдіс фазалық масканың периоды тұрақты болғандықтан талшықты Брэгг торынан кері шағылған сәуленің толқын ұзындығын өзгертуге мүмкіндік бермейді. Сонымен қатар, бұл әдіс талшықты әзірлеп созу процесі кезінде де қолдануға мүмкіндік бермейді. Себебі бұл кезде қозғалып келе жатқан жарық жолдың жанында оптикалық элементтердің болмауы қамтамасыз етілуі тиіс [44].

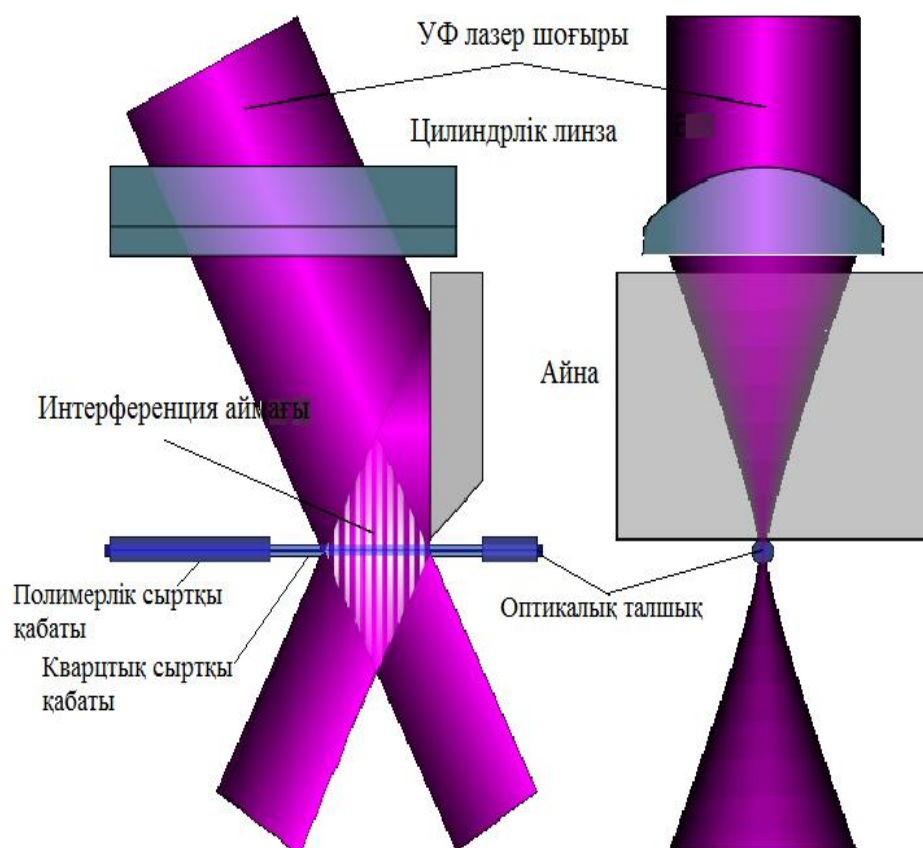
Сонымен қатар, ультрафиолетті сәулені қолданып торды жазар алдында талшықтың сыртқы қорғаныс полимерлі бетін алып тастау қажет. Бұл процесс

талшықтың стандартты қорғаныс полимерлі қабаты ультракүлгін сәулесіне өткізбейтіндіктен қажет. Алайда қорғаныс қабатын алу процесі талшықтан әзірлеу процесінің уақытын созады және оптикалық талшықтың беріктілігін төмендетеді.

Полимерлі қорғаныс қабатын алмастан ультракүлгін сәулелермен сыну көрсеткіштерінің торын жазу әдістері де бар, бірақ олардың тиімділігі төмен. Солардың бірі дәстүрлі жазу диапазондарына (300-364 нм) қарағанда жақын ультракүлгін диапазонда (244-248 нм) стандартты полимерлі қорғаныс қабаты едәуір мөлдір болғандығына негізделген. Бірақ бұл талшықтың фотосезімталдығы жоғары болуы үшін тағы да қосымша химиялық элементтерді легирлеуді (қосуды) талап етеді.

2.2 Талшықты Брэгг торын интерферометрлік әдіспен және қадамдау әдісі арқылы жазу

Өз кезегінде Тальботтың интерферометрінде Брэгг торын жазуды оптикалық талшықты жасап созу кезінде ұйымдастыруға болады, себебі бұл әдісте қозғалып бара жатқан талшықтың жанында оптикалық элементтер болмайды (сурет 2.2).



Сурет 2.2 – Коллоидтың интерференциялық әдісі бойынша Брэгг торын жазу

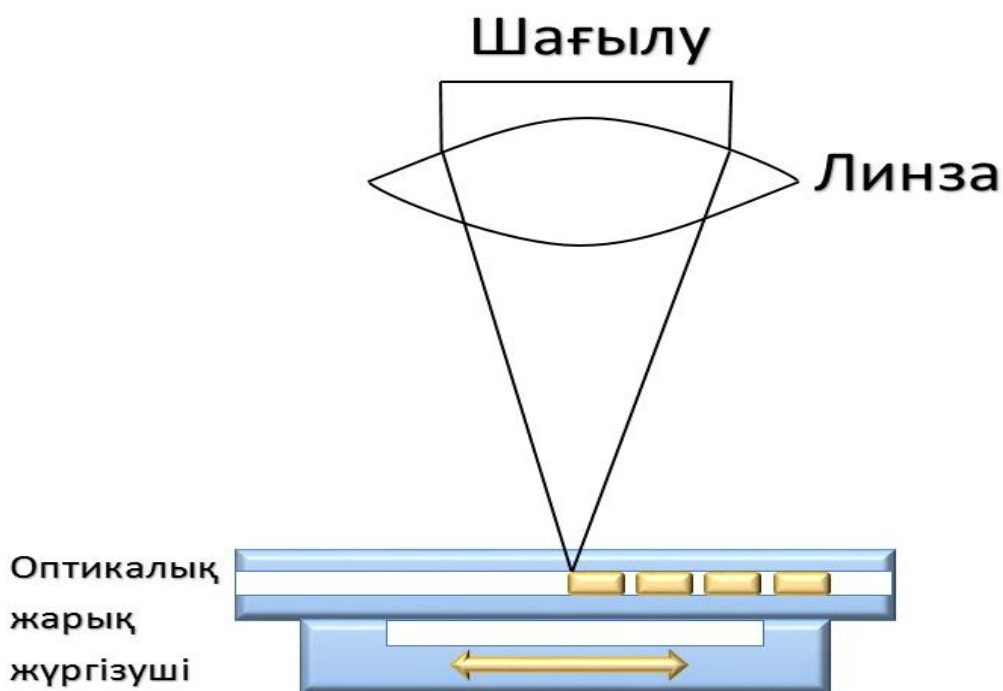
Көрсетілген сұлбадан сәулелердің арасындағы бұрышты өзгерту арқылы интерференциалық көріністің периодын таңдауға, сәйкесінше Брэгг шартымен сәйкес келетін толқын жолымен жүретін сәуленің сәйкес толқын ұзындығындағы жарықты кері шағылыстыратын Брэгг торының сыну көрсеткішінің периодын таңдауға мүмкіндік беретіндігін байқауға болады. Сондықтан аталған әдіспен кез келген жарық толқынын кері шағылыстыратын өте кең диапазондағы Брэгг торын жазуға болады. Сонымен қатар, бұл әдіс фазалық маскадан дифракцияның нөлінші ретін толық алып тастауға мүмкіндік береді және бір нүктеден шыққан лазердің интерференциясынан пайда болатын лазердің кеңістіктік когеренттік таралымына тәуелді болатын интерференциялық көріністің қосымша қасиетіне тәуелсіз болады.

Сонымен қатар, Тальбот интерферометрі оптикалық сәулеленудің амплитудалық бөлінуін анықтайды және ФМӨ арқылы немесе көрсетілген сұлба арқылы (сурет 2.2) немесе жарық бөлгіш пластина арқылы орындалады.

Васильев С.А., Медведков О.И., еңбектерінде Лойд интерферометр көмегімен жүзеге асатын жарық шоғыры кеңістікті бөлу арқылы жазылған ТБТ интерферометрлік сұлбасы 2.3- суретте көрсетілген [45]. Жарық шоғыры кеңістіктік бөлу арқылы жазылған ТБТ интерферометрлік сұлбасымен салыстырғанда оптикалық элементтер санының аз болуынан берілген сұлба едәуір тұрақты болады.

Берілген сұлбаның кемшілігі оптикалық сәулеленудің кеңістіктік когеренттілікке жоғары талап қойылуында болып тұр, себебі жарық шоғырының әртүрлі нүктелерінен шыққан сәулелер интерференцияланады.

Бүгінгі таңда қолданылатын жазылу әдісінің тағы бірі - ол қадамдау әдісі. Lai Y., Zhou K., Sugden K. зерттеулеріндегі әдістің ерекшелігі, фазалық масканы қолдануды қажет етпейді және Брэгг резонансының кез-келген толқын ұзындықта тордың жазылуына мүмкіндік береді [46]. Берілген әдіс тордың жеке әр штрихтарында еркін профиль жасауға және жалпы бағытталған сыну көрсеткіштің барлық амплитудалық таралуына мүмкіндік береді, сонымен қатар тордың ұзындығы бойымен периодты өзгертуге болады, яғни ФМ қолданбастан ұзындық бойымен айнымалы период арқылы ТБТ чирп жасауға болады. Чирп дегеніміз – сыну көрсеткіші модуляциясы жиілігінің өзгерісі. Қадамдау әдісі арқылы ТБТ жазылудың принциптік сұлбасы 2.3-суретте көрсетілген.



Сурет 2.3 - Қадамдау әдісі ТБТ жазылу әдісінің сұлбасы

Сонымен қатар, берілген әдістің бір қатар кемшіліктері бар: оптикалық талшық бойымен фокустелген сәулеленуді прецизионды механикалық келтіру қажеттігі және тордың жеке импульстармен сыну көрсеткішінің жазылуы мүмкін емес.

2.3 Талшықты Брэгг торының жазылуының арнайы әдістері. Біримпульсті және көпимпульсті жазылуы

Талшықты Брэгг торының біртекті спектрлерінде, орны тордың ұзындығымен анықталатын әдетте жанындағы максимумдар бақыланады [45, с. 26]. Fröhlich H.G., Kashyap R. Брэгг торының аподизациясы едәуір жанындағы максимумдарды басады, DWDM жүйелерде оптикалық арналардың жақын орналасуы рұқсат етіледі, жүйедегі олардың арасындағы қабаттасу бөгеуілдердің неғұрлым бәсеңдеуінен болады. Тордың аподизациясы дегеніміз тордағы бақыланатын сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасының өзгеруі [47]. Сонымен қатар, талшықты Брэгг торының бақыланатын сыну көрсеткішінің Гаусс жанама қисығын пайдалану негізгі резонанстан жанындағы ұзын толқын максимумдарын алып тастауға мүмкіндік береді. Жанындағы максимумдардың қысқа толқын жағына ығысуы тордың орташа бағытталған сыну көрсеткішінің өзгерісіне байланысты, оларды берілген шаманы тордың барлық ұзындығы бойынша тұрақтылығын қамтамасыз ету арқылы бәсеңдетуге болады.

Қазіргі заманға сай талшықты-оптикалық байланыс жолдарында жарық импульстерінің уақыттық дисперсиясын бәсеңдету әдістері үшін, резонанстық толқын ұзындығы олардың ұзындығы бойымен сатылы немесе үздіксіз

өзгеретін торлар кеңінен қолданылуда. Берілген тордың сыну көрсеткіші модуляциясының өзгерісі, шағылу/өткізу кең жолақты спектрі (100нм жоғары) немесе үлкен дисперсиясы (1000пс/нм) бар. Осы түрдегі тордың жазылуы бағытталған сыну көрсеткішінің модуляция периодын немесе тордың ұзындығы бойымен эффективті сыну көрсеткіштің негізгі модаларын өзгерту арқылы жүзеге асады.

Сонымен қатар, [45, с. 27] зерттеулерде бірнеше талшықты Брэгг торының арнайы құрылымы белгіленеді, солардың негізгілері:

- Тор құрылымының фазалық ығысуы (phase-shifted Bragg grating). Фазалық ығысуды енгізу кеңдігі бірнеше мегагерц болатын, тар өткізу аймағының ішкі жолағының шағылуына әкеледі. Тордың фазалық ығысуы барлық құрылымның жазылуында қалыптасады, сонымен қатар оның алдынала жазылған торында жеке қалыптасу жолдары да қарастырылады. Фазалық ығысудың жоғарлау кезінде (λ_{BG} екі бірдей кеңістік бойынша орналасқан жазылу арқылы жүзеге асырылады) шағылу жолағында өткізу аймағының саны артады және берілген құрылымды көлемдік оптика бойынша Фараби-Перо интерферометрі деп атайды (немесе фильтр).

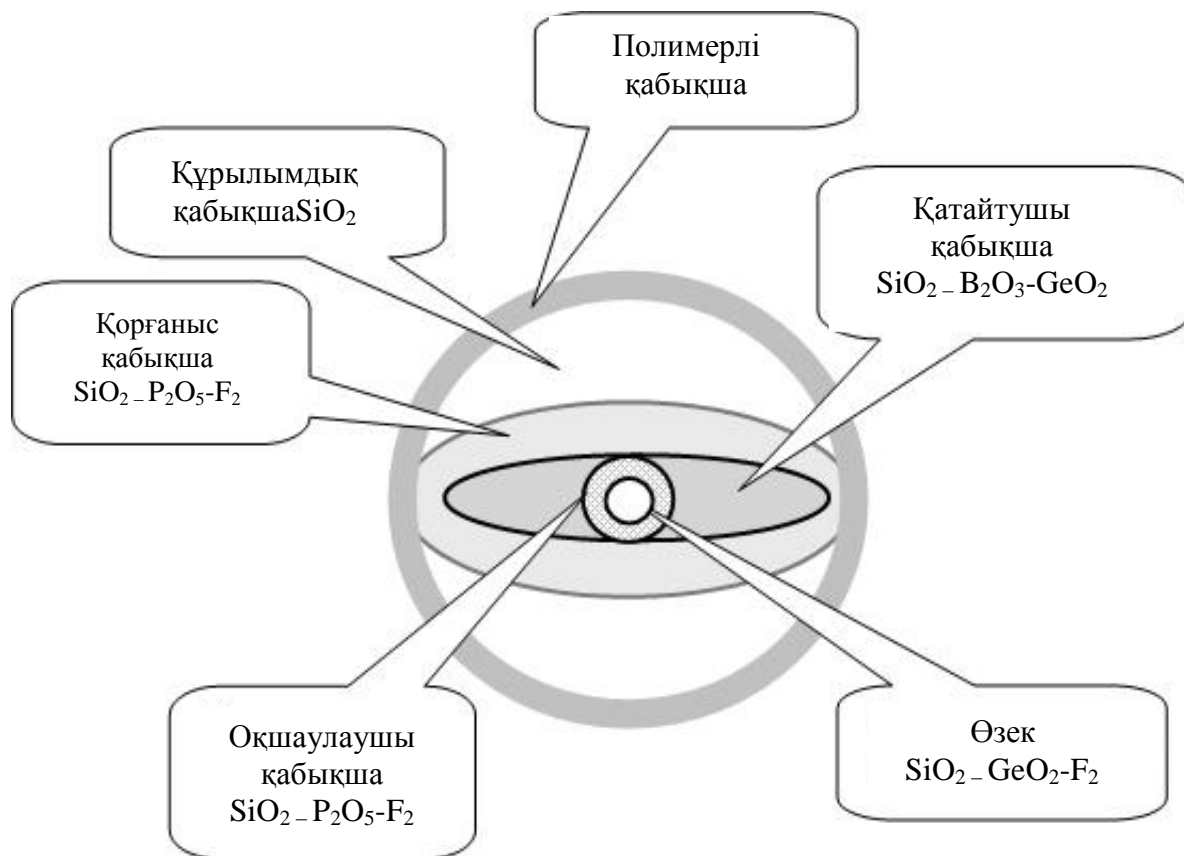
- Супер құрылым негізінде талшықты Брэгг торы (superstructured/sampled Bragg grating). Егер талшықты Брэгг торының параметрлері периодты түрде ұзындық бойымен тордың өзіндік периодынан (әдетте 0,1-10мм) неғұрлым үлкен периодпен өзгерсе, онда оның спектрінде белгілі спектрлік интервалды толтыратын бірнеше тар жолақты максимум мәндер пайда болады. Бұндай супер құрылым, жеке периодты орналасқан Брэгг торларының тізбектей жазылуы арқылы жасалынады.

- Бірнеше талшықты Брэгг торларының суперпозициясы (superimposed Bragg grating). Жоғары фотосезімталдық кезде, оптикалық талшықтың өзегінің бір ғана орнында, әртүрлі периодта бір-біріне қабаттасқан бірнеше тізбектей торлар жазылады. Келесі әр торлардың қабаттасуы алдыңғы торлардың шағылу коэффициенттерінің кемуіне әкеледі.

Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н. зерттеулерінде қазіргі заманға сай талшықты Брэгг торының жазылу әдістері кез-келген параметрлерде дифракциялық құрылымды ұзақ экспозицияда жасауға мүмкіндік береді [48, 49]. Технология бойынша алынған эллипстік созылған қабаты бар қоссәулелі сынатын оптикалық талшықты қолдану арқылы Брэгг торының жазылуын қарастырайық. Талшықтың фоторефрактивтілігін жоғарлату үшін оның өзегінің GeO_2 концентрациясын талшықтың анизатропты көрсеткішіне байланысты 12, 16 және 18 мол. % жоғарылатқан. Оптикалық талшықты созып жасау үшін диоксидты германий қоспаларын (GeO_2) дайындау әдісі уақыт бойынша өзгермейтін фотосезімталдықтың коэффициентін ұстап тұруға тиімді және қарапайым әдіс болып табылады.

Сонымен қатар, оптикалық созып жасалыну процесі кезінде қалыптастыруды дайындау барысында фоторефрактивтіліктің өсуі Брэгг торының массивтерінің жазылуын қамтамасыз етеді. Берілген әдістің кемшілігі сәуле көзінің сызықты оптикалық жоғалтуларының өсуінде. Мысалы, 1550нм

толқын ұзындық үшін 16 мол. % GeO_2 концентрацияда осы әдісті қолдану 18дБ/км жоғалтуға тең. Дәл осы технологияны 4 мол. % GeO_2 концентрациясында пайдалансақ, 1550 нм толқын ұзындықта жоғалтулар 1дБ/км аспайды. Эллипстік қатайтушы қабықшасы бар екі сәулелі сынушы ОТ құрылымы 2.4-суретте ұсынылған.



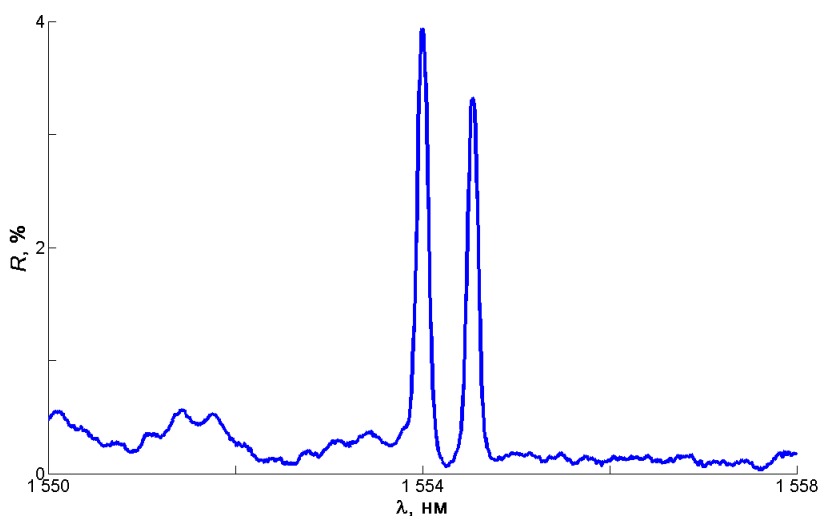
Сурет 2.4 - Эллипстік қатайтушы қабықшасы бар екі сәулелі ОТ

Брэгг торларының жазбасы үшін технология бойынша алынған эллипстік азайтушы қабықшасы бар екі сәулелі сынушы ОТ қолданылды [48, с. 29; 49, с. 30].

Талшықтың фоторефрактивтілігін жоғарылату үшін оның өзекшесіндегі GeO_2 шоғырлануы 12, 16 мен 18 мол. % дейін ұлғайтылуы аннизотропты талшықтың әр түрлі үлгісі үшін болған. Оптикалық талшықты германий диоксидімен сору үшін дайындықтарды қосындылау тәсілі қарапайым, тиімді және фотосезімталдықты уақыт ішінде өзгертпейтін өсіру коэффициентін береді. Одан басқа, дайындықты пішіндеу сатысында фоторефрактивтілікті ұлғайту болашақта оптикалық талшықты сору процесінде ТБТ массивтердің жазбасын жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Таңдалған тәсілдің кемшілігіне жарық өткізгіштің сызықты оптикалық шығынының ұлғаюы жатады. Мысалы, жұмыста қолданған құрамында 16 мол. % GeO_2 -мен керілімелі эллипсті қабаты бар екі сәуле сындыру ОТ-ның шығындары 1550 нм толқын ұзындығында шамамен 18 дБ/км құрайды. Бұл кезде осындай технологиямен өндірілген

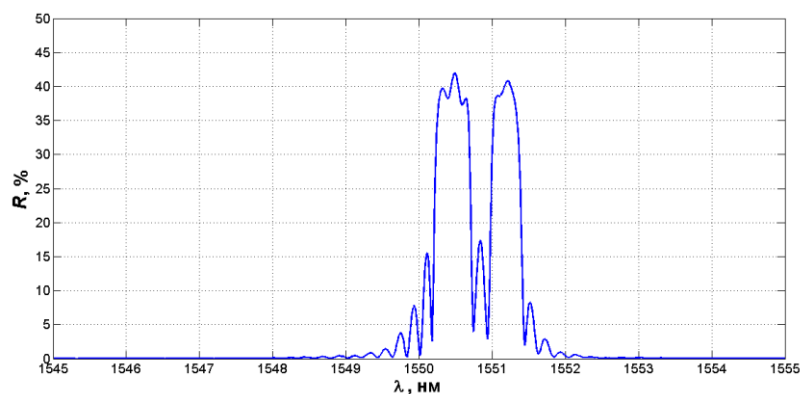
құрамында 4 мол. % GeO_2 -мен керілімелі эллипсті қабаты бар екі сәуле сындыру ОТ-ның шығындары 1550 нм толқын ұзындығына 1дБ/км аспайды.

Фазалық маска тәсілімен эксимерлі лазердің KrF жеке импульсімен жазылған I типті ТБТ шағылысу спектрі 2.8-суретте келтірілген. Тор құрамында 18 мол. % GeO_2 -мен керілімелі эллипсті қабаты бар екі сәуле сындыру ОТ-мен жазылған. Шағылысу коэффициенті – 2 %, жартылай биіктіктегі шағылысу шыңының ені – шамамен 0,1 нм құрайды. Көрсетілген ТБТ 400 мДж/см² талшықта эксимерлі лазердің 20 нс импульсті энергиясының тығыздығы кезінде жазылған 2.4-суретте бірінші типтегі KrF эксимерлі лазерінің фазалық маска әдістері арқылы жазылған жеке импульстерінің Брэгг торының шағылу спектрі көрсетілген. Берілген тор эллипстік созылу қабаты бар қоссәулелі сынатын 18 мол. %. қоспасы бар GeO_2 оптикалық талшықты қолдану арқылы жазылған. Шағылу коэффициенті ~ 2%, шағылудың максимум кеңдігі жартылай биіктікте 0,1нм құрайды. Қолданылған талшықты Брэгг торы талшықтағы эксимерлі сәуленің импульсі 20 нс, энергия тығыздығы ~ 400 мДж/см² болғанда жазылған. 2.4-суреттегі екі максимумдардың болуы қоссәулелі сынатын оптикалық талшықты тордың индукцияланғанын көрсетеді. Анизотропты талшықтардың әрқайсысына белгіленген осьтері үшін сыну көрсеткіштің эффективтілігі әртүрлі болғандықтан, Брэгг резонансының толқын ұзындығы әртүрлі болады.



Сурет 2.5 - I типтегі ТБТ шағылу спектрінің жеке импульспен жазылуы

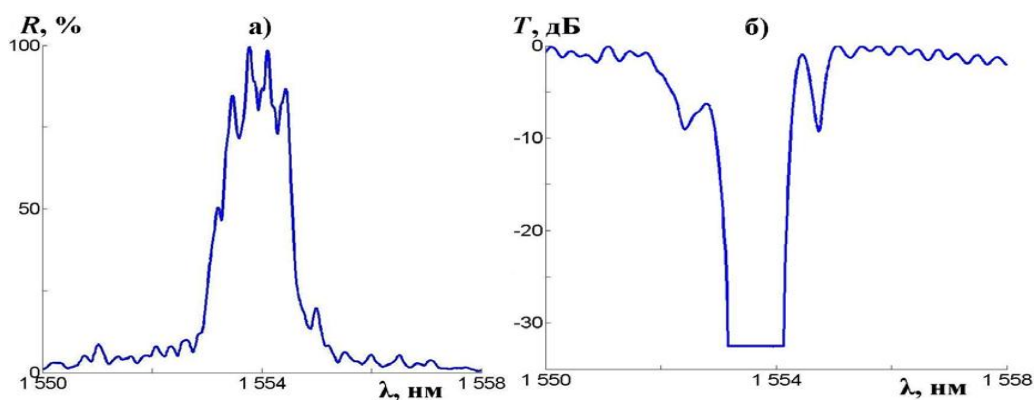
KrF эксимерлі сәулемен қоссәулелі сыну оптикалық талшықтың экспозициялық ұзақтылықта интерферометрлік әдіспен жазылған бірінші типтегі Брэгг торының шағылу спектрі көрсетілген. Берілген тор эллипстік созылмалы қабаты бар қоссәулелі сынатын 12 мол. %. қоспасы бар GeO_2 оптикалық талшықты қолдану арқылы жазылған. Экспозиция уақыты -1 сағат. Шағылу коэффициенті шамамен ~ 42%, шағылудың максимум кеңдігі жартылай биіктікте 0,5 нм құрайды (сурет 2.6).



Сурет 2.6- I типтегі ТБТ шағылу спектрінің экспозиция ұзақтығы бойынша жазылуы

KrF эксимерлі сәулемен эллипстік созылу қабаты бар қоссәулемелі сынатын 16 мол. % қоспасы бар GeO₂ оптикалық талшықты қолдану арқылы жазылған. Берілген талшықты Брэгг торы аттенюатордың шығысында энергиясы 75,9 мДж кезінде жазылған. Талшықты Брэгг торы I типтегі тор болып табылады.

Аттенюатордың кірісіндегі энергиясының шамалы өзгерісі кезінде 79,3 мДж дейін, оптикалық талшықтың энергиясының тығыздығы 1 Дж/см², II типтегі тор тура сол талшыққа жеке импульсті эксимерлі сәуле арқылы жазылған. 2.6- суретте II типтегі талшықты Брэгг торының спектрлері көрсетілген: (а) шағылу, (б) өткізу (сурет 2.7).



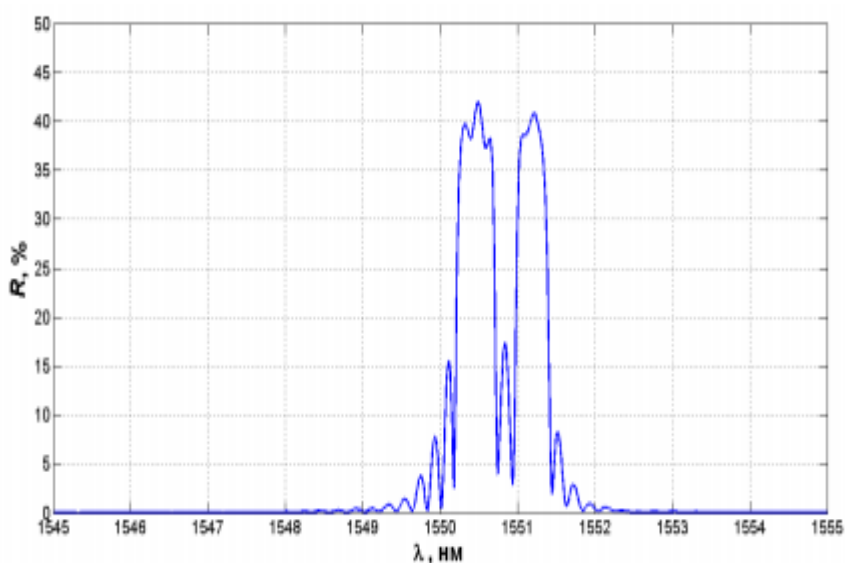
а) шағылу; б) өткізу

Сурет 2.7 -II типтегі ТБТ спектрі

II типтегі талшықты Брэгг торы 100% дейін шағылады және жартылай биіктіктегі спектр ені 1 нм. Спектрдің кеңеюіне байланысты екі ортогональды поляризацияның шағылу максимумдері бірігеді. Varzhel' S.V., Kulikov A.V., Bartelt H., Chojetzki C. еңбектерінде ТБТ-на температуралық әсерді зерттеулер мен олардың нәтижелері [50, 51] 300 °С кезінде оптикалық талшықтан жойылатын 1-ші типті ТБТ-рымен салыстырғанда, 2-ші типтегі ТБТ-лардың жоғары температураға (1000 °С дейінгі) төзімділігі дәлелденді.

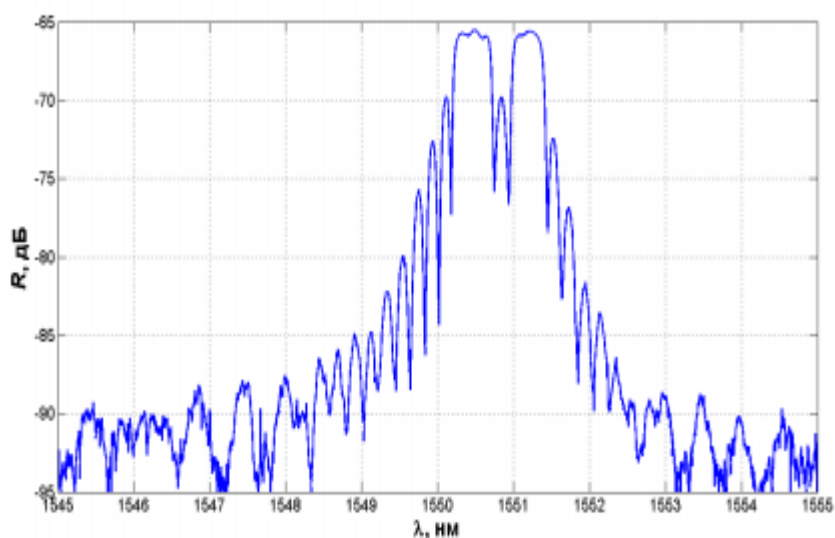
2.11-суретінде көрсетілген шағылысулардың екі шыңының болуы екі сәулелі сындырудың ОТ индукциялануына негізделген. Анизотропты талшықтың әр бөлінген осьтері үшін тиімді сыну көрсеткіші әртүрлі болғандықтан, екі сәулелі сындырушы жарық өткізгіштің тез және баяу осі бойынша таралатын жарық үшін Брэгг резонанстың толқын ұзындығы да әртүрлі болады.

2.7-суретте эксимерлі лазермен KrF интерферометрлік тәсілімен ұзартылған экспозициясы кезінде жазылған I типті ТБТ шағылысу спектрі көрсетілген. Тор құрамында 12 мол. % GeO_2 эллипсті керілу қабаты бар екі сәуле сындырушы ОВ-мен жазылған. Экспозиция уақыты – 1 сағат. Шағылысу коэффициенті – 42%, жартылай биіктіктегі шағылысу шыңының ені – шамамен 0,5 нм құрайды.



Сурет 2.8- Ұзақ экспозиция кезінде жазылған I типті ТБТ шағылысу спектрі (сызықты шкала)

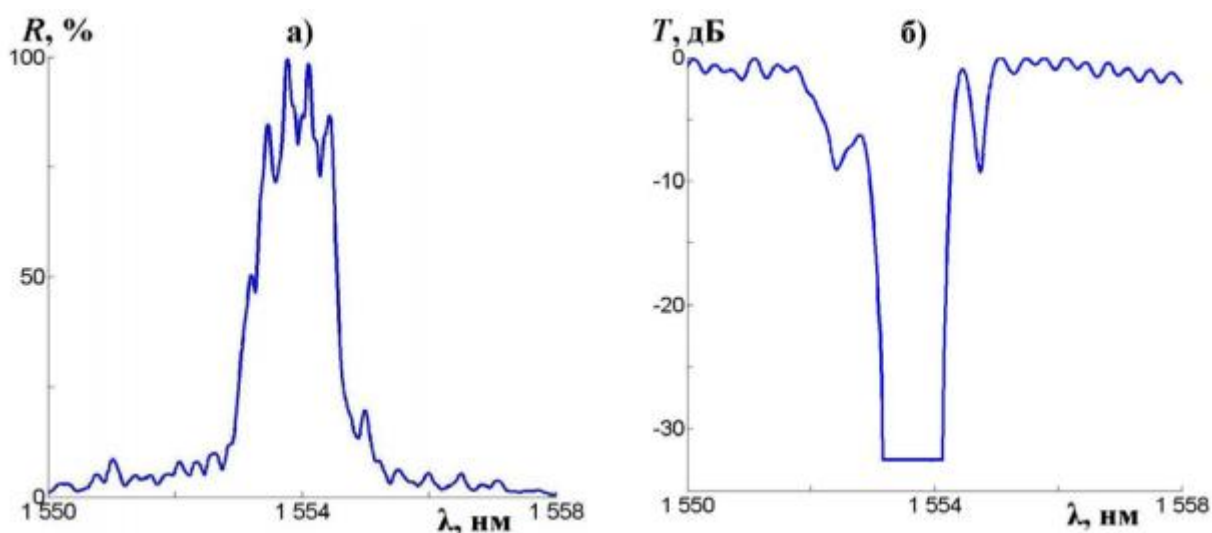
2.8-суретте тура сол ТБ-дің шағылысу спектрі логарифмдік шкалада көрсетілген.



Сурет 2.9 - Ұзақ экспозиция кезінде жазылған I типті ТБТ шағылысу спектрі (логарифмдік шкаласы)

16 мол. % GeO_2 эллипсті керілу қабаты бар екі сәуле сындырушы ОТ-ғы KrF эксимерлі лазерінің жеке импульсімен жазылған ВБР көрінісі келтірілген. Көрсетілген ТБТ шығысында 75,9 мДж энергиясы бар аттенюаторда жазылған (сурет-2.10). Берілген ТБТ I типті тор.

ОТ-ғы энергияның тығыздығы 1 Дж/см^2 жақын болатындай аттенюатордың шығысындағы энергияны 79,3 мДж дейін жоғарылату кезінде II типті тор эксимерлі лазердің жеке импульсімен сол талшыққа жазылған. II типті ВБР спектрі 2.9-суретте көрсетілген: шағылысуы (а), жіберуі (б).



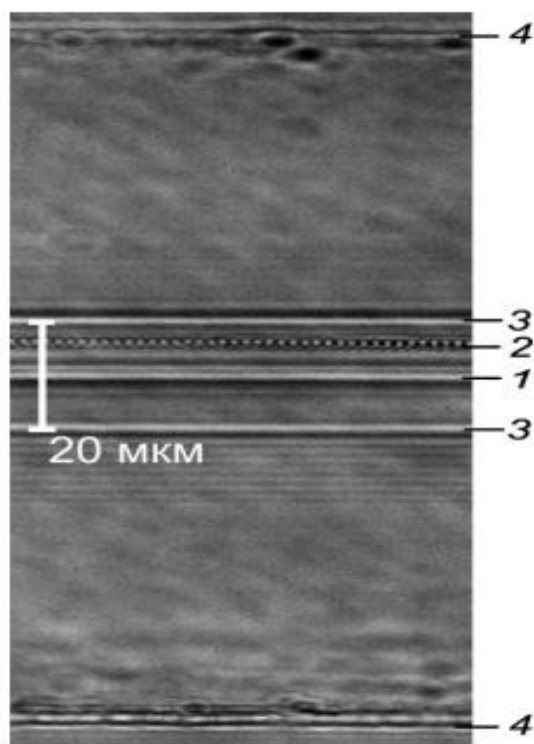
а) шағылысуы; б) жіберулері

Сурет 2.10 - II типті ТБТ спектрі

II типті ТБТ 100 % дейін шағылысу мен жартылай биіктікте 1 нм көп спектр еніне ие. Спектрлердің кеңеюі салдарынан екі ортогоналды поляризацияның шағылысу шыңдарының бірігуі болады.

Malo B., Johnson D.C., Bilodeau F. еңбектерінде көрсетілген индукцияланған тордың импульстегі энергияға қатынасы [52] да келтірілген тәжірибелік қатынасқа сәйкес келеді.

405 нм лазері бар дифференциалды интерференциялық контраст (ДИК) тәсілімен алынған 16 мол. % GeO_2 бар екі сәулелі сындырушы ОТ-тың ТБТ бейнесі 2.11-суретте көрсетілген [53]. Торлардың бейнесі Axio Imager.Z1 тура оптикалық микроскобының негізіндегі Zeiss LSM-710 конфокальді сканерлеуші люминисцентті микроскоппен алынған. ОТ-ғы микропор жүйесімен түзілген ТБТДИК-пен қара өрісі арқылы да, жарық өрісті дәстүрлі микроскопия тәсілі арқылы да алынған бейнесінде торлардың бейнесі жақсы көрініп тұрғандығын ескерген жөн.



1 – өзекшесі; 2 – біртекті емес периодты құрылым; 3 – оқшауланған және керілген қабат арасындағы аймақ; 4 – оптикалық талшықтың сыртқы аймағы

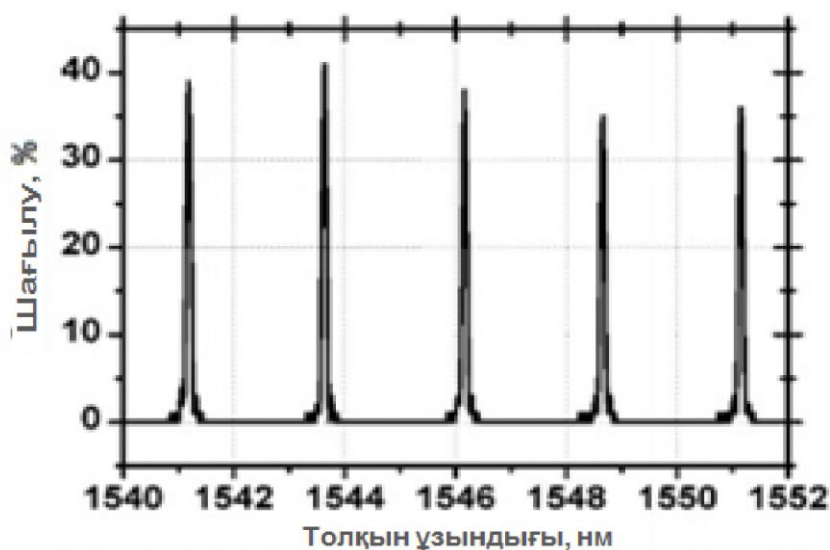
Сурет 2.11- 405 нм лазері бар дифференциалды интерференциялық контраст (ДИК) тәсілімен алынған 16 мол. % GeO_2 бар екі сәулелі сындырушы ОТ-тың ТБТ бейнесі

II типті торлардың түзілуіне негізделген микропорлар өзекше мен оқшаулағыш қабаттың арасындағы аймақта, сонымен қатар оқшауланған және керілу қабатының арасында орналасады.

II типті ТБТ-дің бір импульсті жазылуы ОТ-да эллипсті керілу қабатымен жазықтық периоды ФМЭ периодына тең ($\Lambda_{\text{ФМ}} = 1065,3 \text{ нм}$) болатын біртекті емес периодты құрылымын түзеді. ТБТ-дің өлшенген периоды (сурет-2.13) 1,06 мкм құрайды. ФМЭ дифракциясының ретімен +1/-1 құрайтын интерференционды бейненің периоды оның периодының жартысына $\Lambda_{\text{ФМ}}/2$ тең, осындай периодты торлар суреттерде бақыланбайды. Дегенмен $\Lambda_{\text{ФМ}}/2$ периоды бар торлардың фотолық суреттерде болмауы оптикалық микроскоптың қабілетімен шешілетін жұмыспен пайда болуы мүмкін.

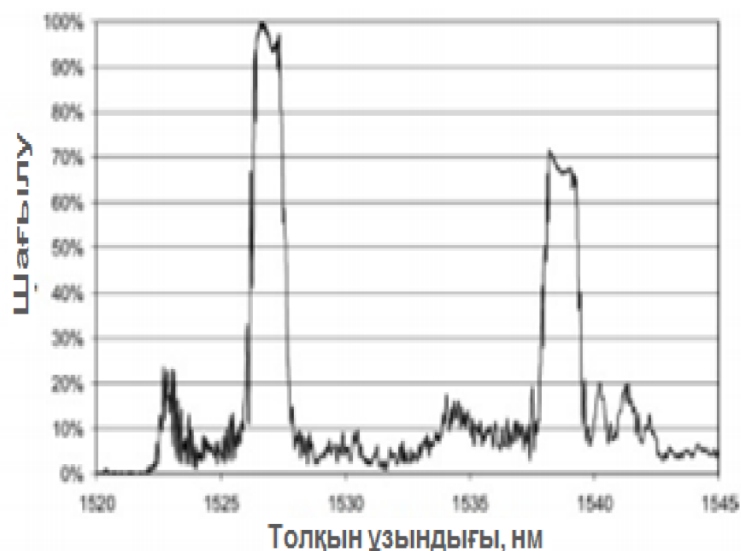
Дифракцияның және интерференционды бейненің күрделі кеңістікті таралуының 0-ші мен одан жоғары реті болуының салдарынан жазудың кірістік механизмін ескерумен талшықта II типті ТБТ кеңістікті периоды $\Lambda_{\text{ФМ}}$ болатын периодты құрылымын тудыратын қарқындылық максимумы $\Lambda_{\text{ФМ}}$ периодына.

Chojetzki C., Rothhardt M., Ommer J., Unger S., [54] жұмысында авторлар ТБТ жазбаларының нәтижесін және сору мұнарасындағы ТБТ массивтерін көрсеткен. Авторлар ТБТ массивін талшықтың сорылу процесінде жазбаны жүргізе алған. I типті ТБТ үшін торлардың шағылысуының 40%-ға дейінгі және II типті ТБТ үшін 100 %-ға жуық коэффициентіне жеткен. Талшықтың сорылу процесі кезінде алынған I типті ТБТ массивінің спектрі 2.12-суретте көрсетілген. Бұндай массивтерді толқын ұзындығы бойынша мультиплекстенуі бар таратылған температура сенсорларын тұрғызу үшін қолдануға болады.



Сурет 2.12- 5 ТБТ-нан массивтің шағылысу спектрі

II типті 2 ТБТ-дан массивтің шағылысу спектрі 2.13-суретте келтірілген.



Сурет 2.13 - II типті 2 ТБТ-ден массивтің шағылысу спектрі

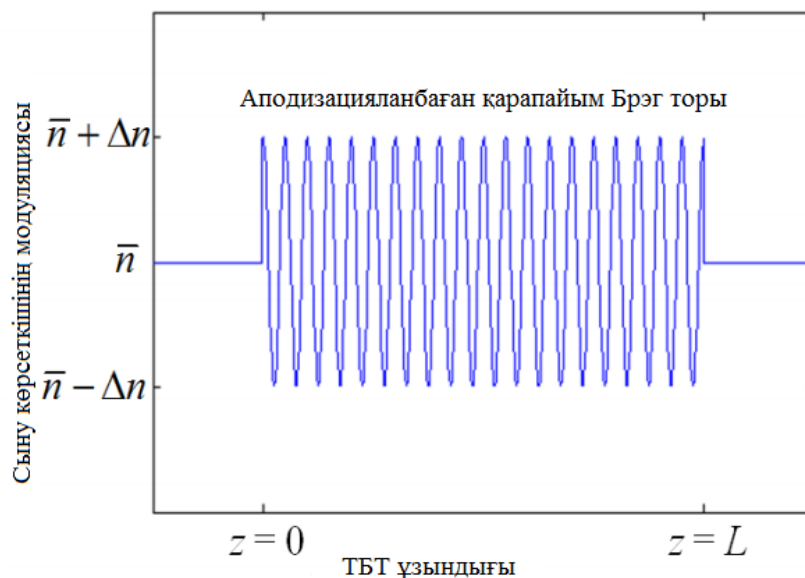
Брэгг талаптарына сәйкес әрбір құрамдас сипаттамаларының ішінен ТБТ дің спектрлік сипаттамасына Брэггты резонансын береді. Брэгг резонанстарындағы толқын ұзындықтарының шағылуын келесі әдіспен анықтауға болады.

Ұзартылған экспозиция кезіндегі жазылған ТБТ-да ғана емес, сонымен қатар II типті ТБТ де германий-силикатты шынының бұзылуына жақын толық қуаты бар біреулік лазерлік импульспен индукцияланған Брэгг резонанстары жоғары дәрежеде бақыланады.

II типті ТБТ-дің фотографикалық суреті алдыңғы бөлімде қарастырылған. сыну көрсеткіш торының кезеңі 1,06 мкм құрады. Брэггты резонанстың 2-ші тәртібіне сәйкес бақыланған толқынның ұзындығы 1550 нм көрсетті, 1-ші кезең 3100 нм толқын ұзындығын көрсетуі тиіс. Берілген жағдай ФМӘ-ға нольдік тәртіптегі дифракциялық болуымен және ОТ-ға интерференциалды бейненің кеңістікте таралу қиындығымен түсіндіріледі.

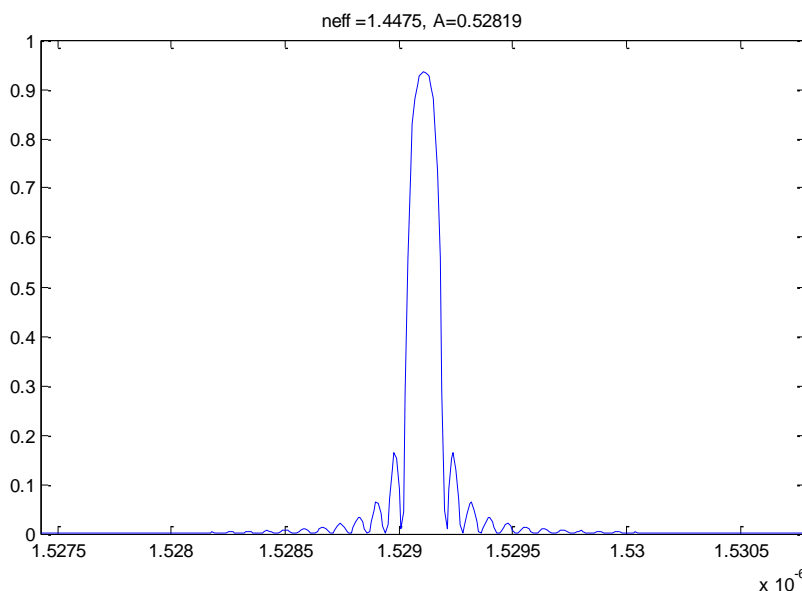
2.4 Аподизацияланған Брэгг торының спектрлік сипаттамалары

Қарапайым Брэгг торында талшық өзегі амплитудасы тұрақты түрде жазылған сыну көрсеткішінің модуляциясы болады (сурет 2.14).



Сурет 2.14 - Аподизацияланбаған қарапайым Брэг торындағы сыну көрсеткішінің модуляциясы

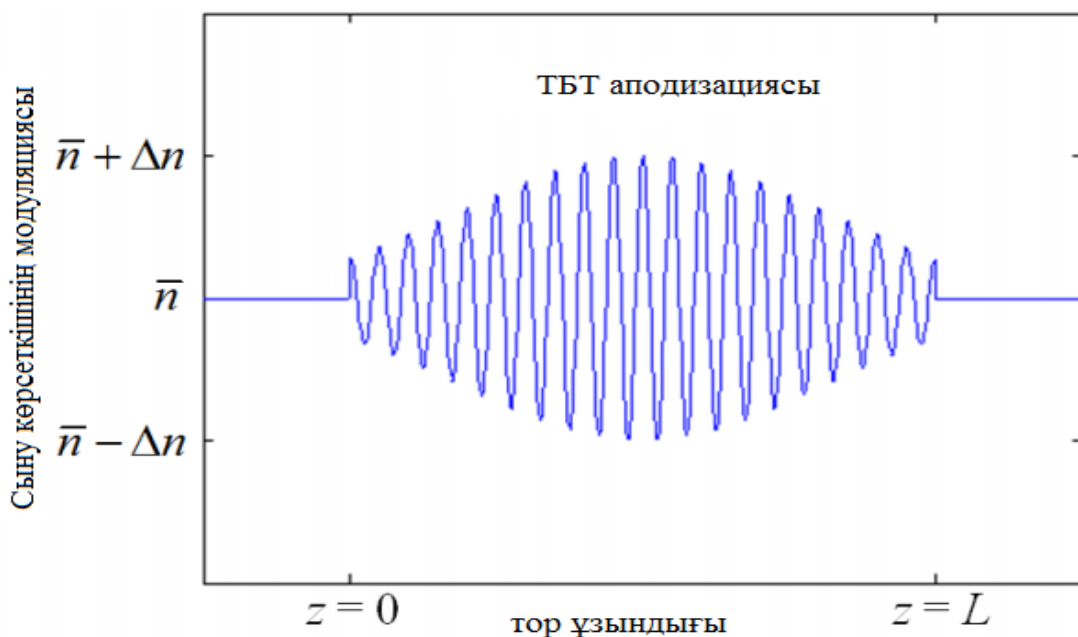
Мұндай біртекті жазылған сыну көрсеткішінің модуляциясынан кері шағылған сәуленің спектрлік сипаттамасында Фурье түрлендіруіндегі гармоникалық тербелістердің шексіз көптігінің себебінен, негізгі гармониканың жанындағы екінші және үшінші гармоникалардың кері әсері болғандықтан (сурет 2.15), оларды ыңғайлы терезелермен түзету қажет болады.



Сурет 2.15- Аподизацияланбаған қарапайым Брэгг торынан кері шағылған сәуленің спектрі

Бұл екінші және үшінші гармоникалардан құтылудың жолы – сыну көрсеткішінің модуляциясын біртекті емес етіп жазу (сурет 2.16). Осы процесті аподизация деп атайды. Аподизация кезінде сыну көрсеткіші модуляциясының

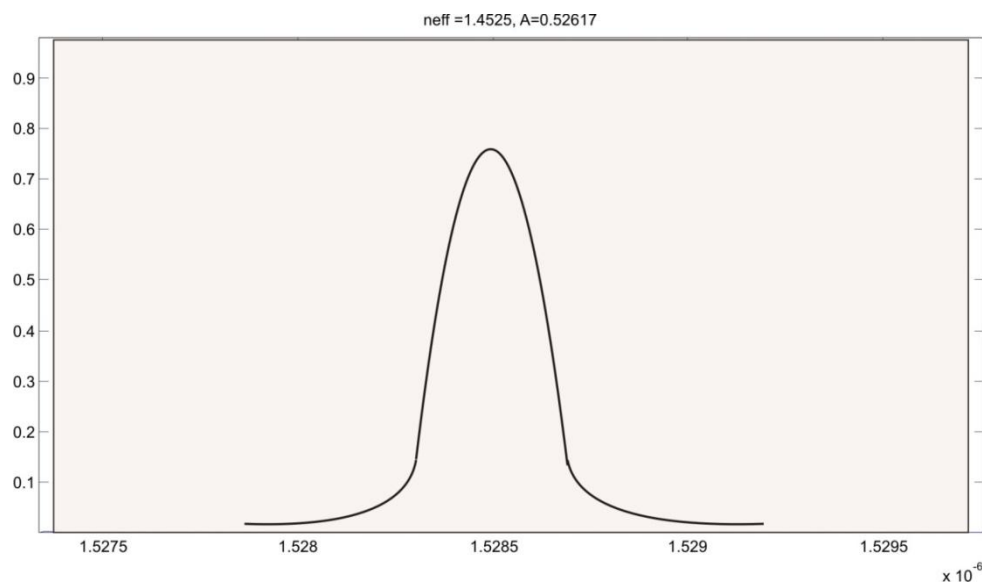
амплитудасы тордың екі жағында кіші болып, ортасында максимум мәнге тең болатындай етіп ультракүлгін сәулемен жазу қажет.



Сурет 2.16- Аподизацияланған сыну көрсеткіші модуляциясы амплитудасы

Брэгг торының бойымен біркелкі емес, екі шетінде төмен болып, ортасында жоғары мәнге тең болатындай етіп жазу қажет.

Аподизацияланған тордан өткен немесе шағылған сәуленің спектрлік сипаттамасында негізгі гармониканың жанындағы екінші және үшінші гармоникалардың әсері жоғалады. (сурет 2.17).



Сурет 2.17- Аподизацияланған толқынның спектрлік сипаттамасы

2.5 Оптикалық-талшықты Брэгг торларының жазбасы

Бірыңғай ТБТ спектрінде бүйір максимумдары бақыланады (сурет 2.6), олардың күйі торлар ұзындығымен анықталады. Брэгг торлардың аподизациясы бүйір максимумдарды едәуір басып тастауы мүмкін, бұл оптикалық каналдар арасындағы айқасқан кедергілердің азаюы салдарынан, олардың DWDM жүйелерінде жақынырақ спектрлі орналасуын болдырады. Торлар аподизациясы деп, торларға ұзындығы бойынша бағытталған сыну көрсеткіш модуляциясының ауытқу шегінің бірқалыпты өзгеруін айтамыз. Осылайша, ТБТ бағытталған сыну көрсеткіші пішінінің Гаусстық айналып өтуін қолдану ұзын толқынды аймақтағы бүйір максимумдарды негізгі резонанстан жоюға мүмкіндік береді. Қысқа толқынды аймақта бүйір максимумдарының болуы торларда бағытталған орташа сыну көрсеткішінің өзгеруінен болады; егер торлардың ұзындығы бойынша осы шаманың тұрақтылығын қамтамасыз ететін болса, оларды жоюға болады.

Байланыстың бүгінгі талшықты-оптикалық желісіндегі жарық импульсінің уақытша шашырау орнын толтыру үшін, торлар резонанс ұзындығына ие болады, толқын белгіленген түрде олардың ұзындығын бойлай үздіксіз немесе сатылы өзгереді. Мұндай торлар шағылысу өткізу (100 нм жоғары) немесе зор шашыраудың (1000 пс/нм артық) кең ауқымына ие. Мұндай типтегі торлар жазбасы, торлар ұзындығымен негізгі үлгінің бағытталған сыну көрсеткіші немесе тиімді сыну көрсеткіші модуляциясы кезеңінің өзгеруі кезінде іске қосылады.

Сондай-ақ зерттеулерде бірнеше арнайы ТБТ құрылымын белгілейді, олардың ең маңыздыларына келесілер жатады [14, с. 27]:

- Құрылымдағы фазалық ығысуы бар торлар (phase-shifted Bragg grating). Фазалық ығысуды енгізу, жолақ ішінде жіңішке өткізу облысы бейнесінің пайда болуына әкеледі, әдетте оның жалпақтығы бірнеше ондаған мегагерцті құрайды. Торлардағы фазалық ығысу, барлық құрылымды жазу сатысында да, сондай-ақ оны алдын ала жазылған торларға бағыттау арқылы да қалыптасуы мүмкін. Фазалық ығысуды арттыру кезінде (әдетте бұл бірдей λ_{BG} бар, кеңістіктік таратылған екі торлар жазбасы арқылы іске асады) шағылысу жолағындағы өткізу облыстарының саны артады және көлемді оптикасы бар мұндай құрылым, әдетте Фабри-Перо интерферометрі (немесе сүзгіш) деп аталады.

- ТБТ негізіндегі суперқұрылым (superstructured/sampled Bragg grating). Егер ТБТ параметрлері ұзындығы бойынша кезеңмен қайта-қайта өзгертін болса (әдетте 0.1-10 мм), онда оның спектрінде белгілі бір спектрлік аралықты толтыратын, бірнеше жіңішке жолақ пайда болады. Әдетте мұндай суперқұрылымды мерзімді жеке орналасқан ТБТ тізбекті жазбасы арқылы дайындайды.

- Бірнеше ТБТ суперпозициясы (superimposed Bragg grating). Өзектің сол бір жерінде талшықты жарық өткізгіштің жоғары фото сезімталдығы кезінде, бірінің үстіне бірі тізбекті қойылған бірнеше әртүрлі кезеңдегі торлар жазылуы мүмкін. Әр келесі торларды қою, алдыңғысының шағылысу коэффициентінің

азаюына әкеледі, алайда, 50%- 60% шағылысу коэффициенттері бар жеті ТБТ суперпозиция жазбасы көрсетілді.

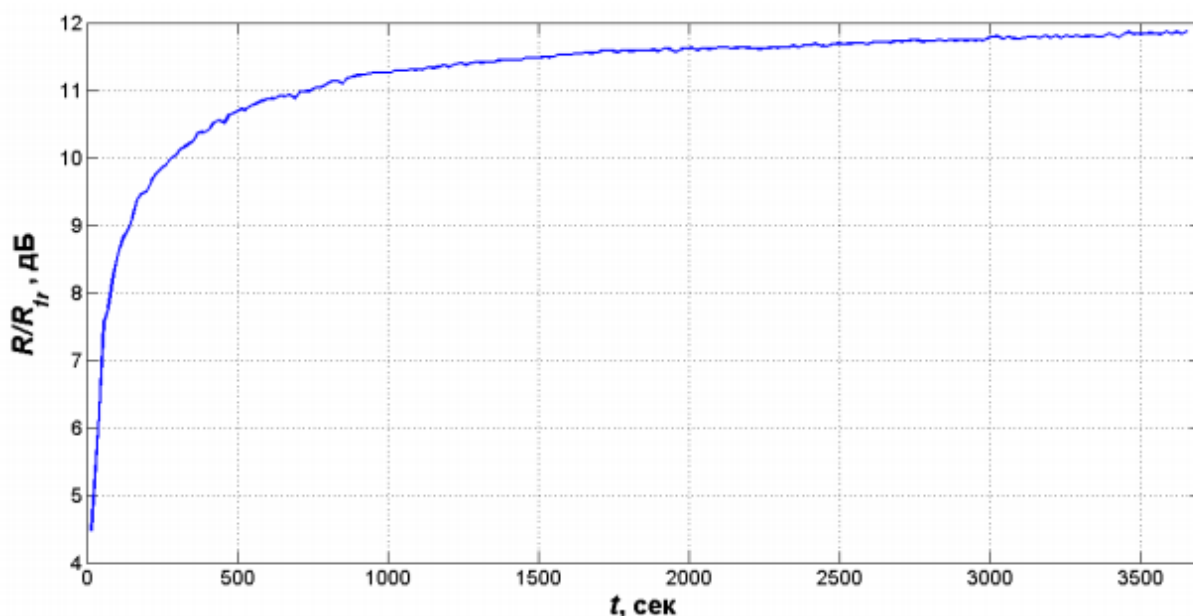
- Көлбеу штрихтары бар Брэгг торлары (tilted/blazed Bragg grating). ОТ осіне қатысты ТБТ штрихі жазықтығының көлбеуі, талшықты жарық өткізгіштің негізгі үлгісінің қабыршақ үлгілерімен немесе сәуле шығарғыштық үлгілермен байланысын арттыруға мүмкіндік береді. Мұндай торлар негізінде күшейту спектрлерін түрлендіруге және кең жолақты оптикалық сәулелену көзін люминесценттеу үшін қолданылуы мүмкін, әртүрлі жалпақтықтағы талшықты шағылыспаған сүзгіні іске асыруға болады.

2.6 Көп импульсті экспозициясы кезінде I типті Брэгг талшықты торлардың өсу динамикасы. Жоғары ретті Брэгг резонанстық сыну көрсеткіші

ТБТ көп импульсті жазылуы кезінде шағылысу коэффициентінің, жартылай биіктік спектрі ені мен тордың Брэгг резонансының толқын ұзындығының өзгеру динамикасын бақылайық. 2.23-2.25 суреттерінде интерферометриялық тәсілмен жазылған 2.11-суретінде келтірілген торлардың осындай динамикасы көрсетілген.

I типті ТБТ шағылысу коэффициентінің децибелмен экспозиция ұзақтылығынан френелді шағылысу коэффициентіне (тіректі деңгей ретінде алынған) қатынасына тәуелділігі 2.18-суретте көрсетілген.

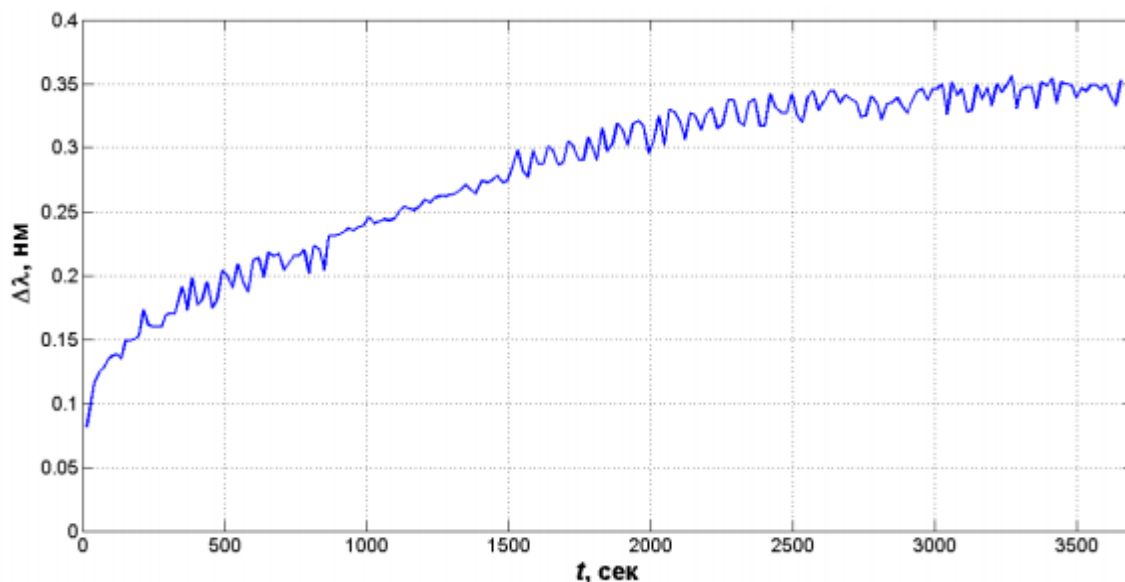
Суреттен тордың шағылысуының негізгі өсімі ТБТ жазылымының бірінші минутында байқалатындығы көрініп тұр, ол ақырындап қанығу күйіне келеді.



Сурет 2.18 - I типті ТБТ шағылысу коэффициентінің децибелмен экспозиция ұзақтылығынан френелді шағылысу коэффициентіне (тіректі деңгей ретінде алынған) қатынасына тәуелділігі

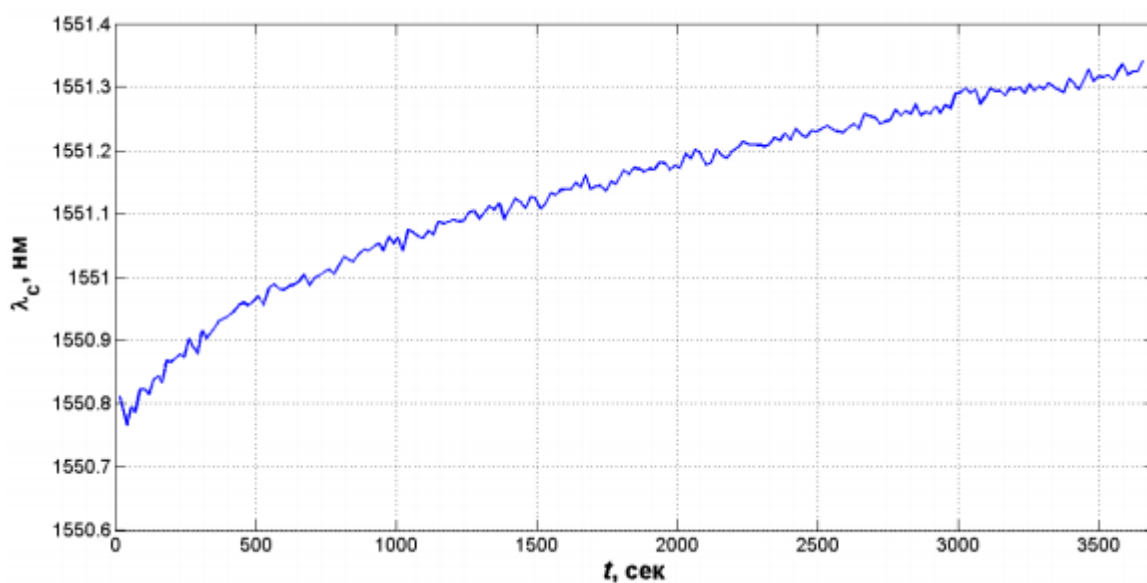
Экспозиция ұзақтылығынан жартылай биіктіктегі I типті ТБТ шағылысу спектрі енінің тәуелділігі көрсетілген (сурет 2.19).

Суретте көрсетілгендей, экспозиция кірісіндегі тордың шағылысу спектрінің жартылай биіктіктегі ені ақырындап ұлғаяды және соңында қанығу күйіне жетеді.



Сурет 2.19- Экспозиция ұзақтылығынан жартылай биіктіктегі I типті ТБТ шағылысу спектрі енінің тәуелділігі

Экспозиция ұзақтығына I типті ТБТ Брэгг толқын ұзындығының тәуелділігі көрсетілген (сурет 2.20).

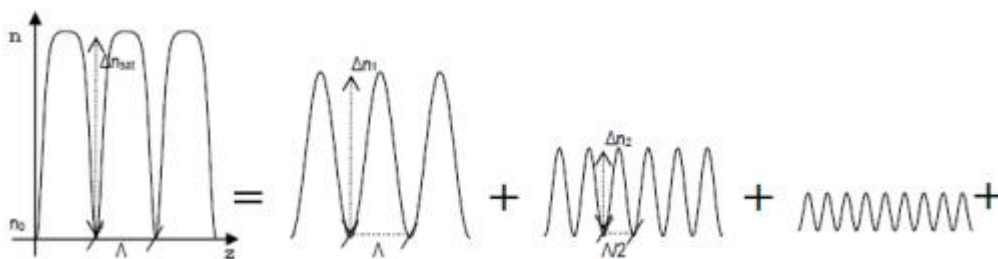


Сурет 2.20-Экспозиция ұзақтығына I типті ТБТ Брэгг толқын ұзындығының тәуелділігі

2.25-суретінде көрініп тұрғандай, тордың көп импульсті жазылуы кезінде оның толқынының резонанстық ұзындығы ұзын толқынды аймаққа ығысады, бұл УК жарық өткізгішінің сәулеленуі кезінде орташа сыну көрсеткішінің ұлғаюына негізделген. Осы ығысу интерференционды бейненің контрастына байланысты және әдетте, жазылу кезінде 1 нм-ден аспайды [14, с. 37].

Бусурин В.И., Носов Ю.Р. зерттеулерінде экспозицияның ұзартылған уақыты кезінде, сонымен қатар, германи-силикатты шынының бұзылу шегіне жақын энергияның тығыздығымен дара лазерлік импульсімен индукцияланған II типті ТБТ да сыну көрсеткіш тураланған модуляциясы қанығу күйіне келеді, соның салдарынан сыну көрсеткіші периодты қозуының профилі тік бұрышты пішінге ауысады [55].

Тікбұрышты пішінді сыну көрсеткішінің осындай модуляциясы гармоникалық құраушыны түзеді. Тікбұрышты пішінді сыну көрсеткіші модуляциясын периодты құраушыларының Фурье тізбектелуіне бөлуге болады. (2.21 сурет) осындай бөлу сыну көрсеткіш торының барлық периодты құраушыларының әсерін бағалауға мүмкіндік береді.



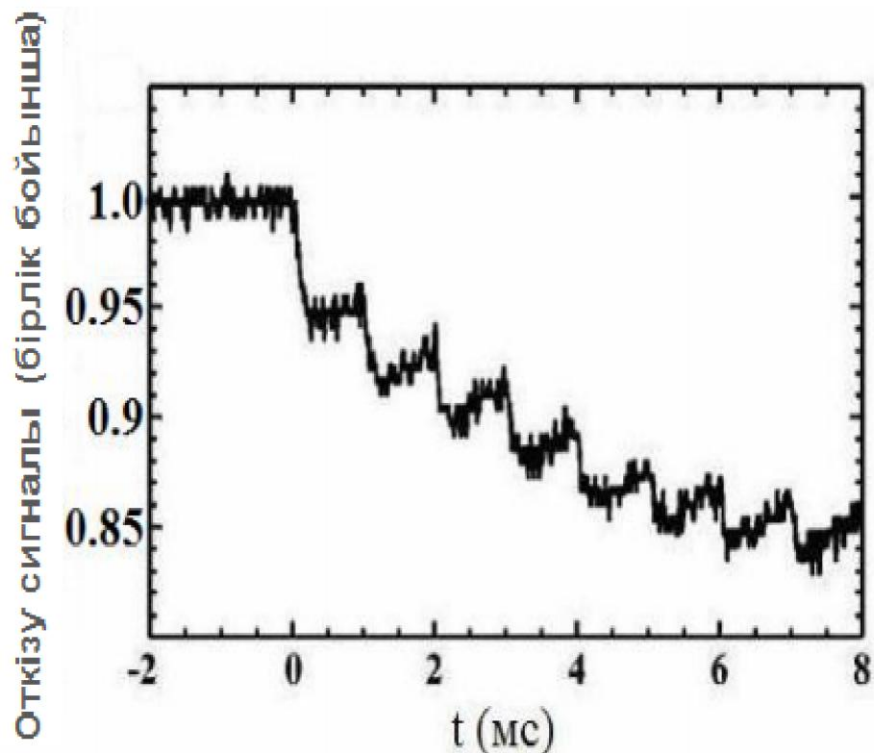
Сурет 2.21 -Тікбұрышты пішінді сыну көрсеткіш модуляциясы мен Фурье тізбектелуі

2.7 Талшықты Брэгг торларды фемтосекундты лазерлі импульспен жазу

Бірінші бөлімде айтылғандай, фемтосекундты ұзындықтағы импульс жағдайында көп фотонды сіңіру ықтималдылығы наносекундты ұзындықтағы импульстермен салыстырғанда біршама жоғары.

Стандартты оптикалық талшықтардың кемшіліктерінің аздығына қарамастан оптикалық талшықтардың материалдарының бұзылуына фемтосекундты импульстардың жоғары интенсивтілігі әсер етеді. Атап айтқанда көп фотонды сіңіру ОТ ның фоторефрактивтілігін арттырмай брэгг дифракция құрылымын жазуға мүмкіндік береді.

Федоринин В.Н., Сидоров В.И. зерттеулерінде бұдан басқа, пайда болған кемшіліктер 10-30 нс ішінде рекомбинациялайды. Сондықтан біріншілік кемшілік концентрациясы төмен кезінде наносекундты лазерлік импульстармен көп санды тұрақты кемшіліктерді құру мүмкін емес. Лазерлік импульс кезінде кемшіліктерді құрастыру мен кезекті рекомбинациясын (сурет 2.22) көруге болады [56].

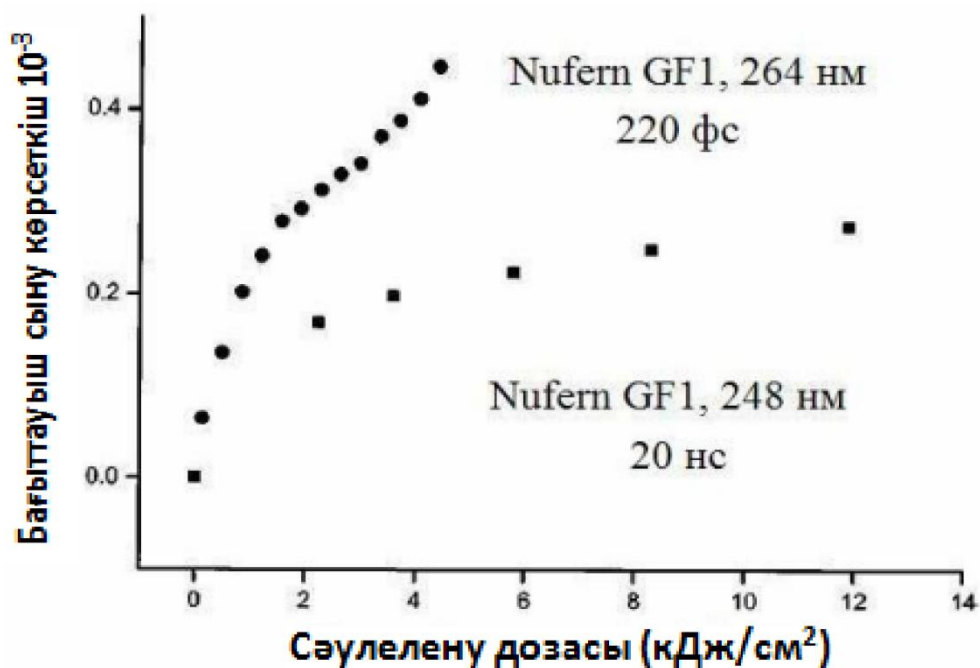


Сурет 2.22 - Лазерлік импульс және оның рекомбинациясы кезіндегі ақаулардың пайда болуы

Жоғарыдағы сурет 1 кГц жиіліктегі импульстік сәулелену уақытында сигналдың өтуін көрсетеді. Берілген суреттегі әрбір саты лазерлік импульсқа сәйкес келеді. Сатының жоғарылауы келесі импульске дейінгі рекомбинациялық кемшілікке сәйкес келеді. Осылайша лазерлік импульс кезінде берілген кемшіліктердің кезекті рекомбинациялануы мен кемшіліктердің пайда болуы арасында сайыс жүреді. Суретте сатының биіктігі төмендеген кезде әрбір импульспен рекомбинацияның өсетіні көрінеді. Сәулеленудің жалғасуы кезінде өткізу сигналы қанығуға көшеді. Импульсте қуаттың өсуі немесе оның ұзындығының ауысуы толығымен рекомбинацияланады.

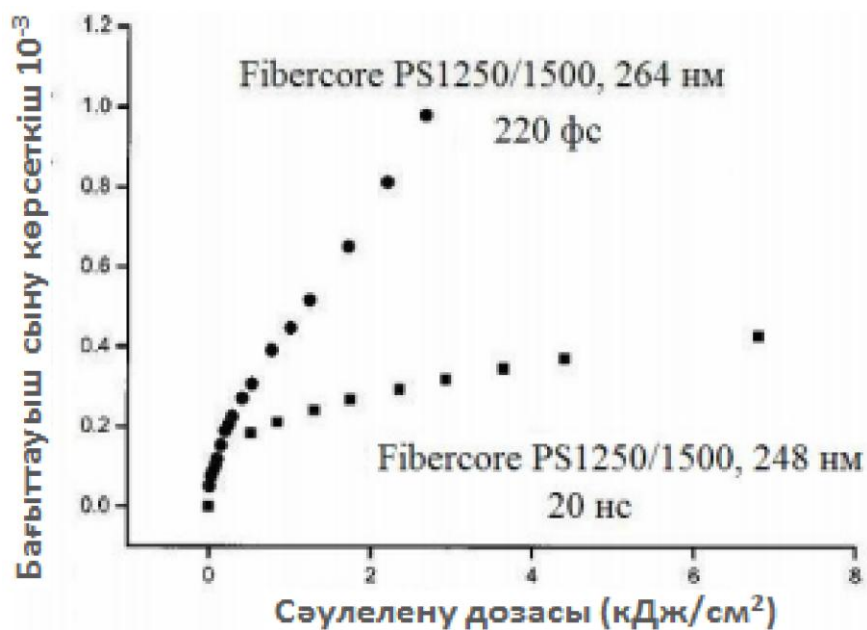
Оптикалық талшықтар материалдарын бұзу механизмін қозғалту барысында сәулелендіру дозасы болу керек.

Nufern GF1 талшығы үшін тураланған сыну көрсеткішінің сәулелену дозасынан тәуелділігі 2.23-суретте көрсетілген. Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалиев В.Е. зерттеулерінде Nufern GF1 наносекундты және фемтосекундты импульстермен жазу жағдайында фотосезімталдықты ұлғайту үшін қосымша германиймен қоспаланған [60].



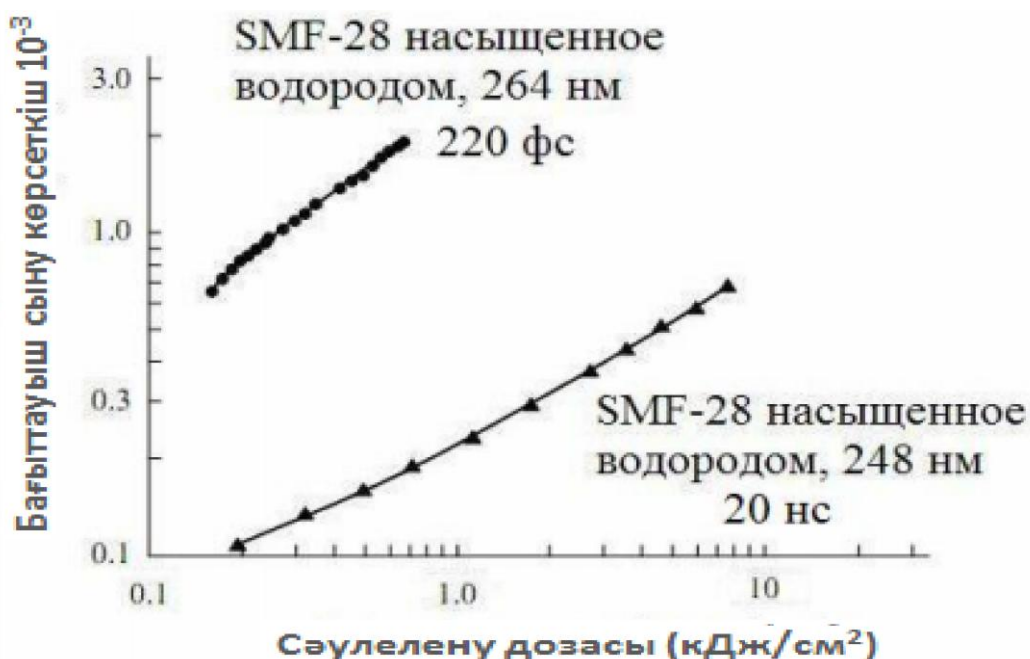
Сурет 2.23 - Nufern GF1 талшығы үшін сәулелену дозасынан тураланған көрсеткіштің тәуелділігі

Тураланған сыну көрсеткішінің Fibercor PS1250/1500 талшығы үшін сәулелену дозасынан тәуелділігі 2.24-суретте көрсетілген. Slattery S.A., Nikogosyan D.N., Brambilla G зерттеулерінде Fibercor PS1250/1500 наносекундты және фемтосекундты импульстермен жазу жағдайында фотосезімталдықты ұлғайту үшін қосымша германиймен және бормен қоспаланған [67].



Сурет 2.24- Fibercor PS1250/1500 талшығы үшін сәулелену дозасынан тураланған көрсеткіштің тәуелділігі

Тураланған сыну көрсеткішінің Corning SMF-28 талшығы үшін сәулелену дозасынан тәуелділігі 2.25-суретте көрсетілген. Kelleher P., Nikogosyan D.N. Corning еңбектерінде SMF-28 наносекундты және фемтосекундты импульстермен жазу жағдайында фотосезімталдықты ұлғайту үшін сутекпен өңделген [69].



Сурет 2.25- Corning SMF-28 талшығы үшін сәулелену дозасынан келтірілген сыну көрсеткішінің тәуелділігі

2.1-кестеде тордың күші бойынша ұқсас әртүрлі талшықтардың мәліметтері келтірілген. Кестеден барлық жағдайлар үшін үлкен қарқындылық кезінде ұқсас нәтижелерге жету үшін сәулеленудің аз мөлшерін (6-80 есе) қосу қажеттігін көруге болады.

Кесте 2.1 - Фемтосекундты және наносекундты импульстер үшін күші бойынша ұқсас ТБТ-ді индукциялауға қажетті сәулеленудің қосынды дозаларын салыстыру

Талшық	Сәулелену толқынының ұзындығы (нм)	Сәулелену қарқындылығы (ГВт/см ²)	Өткізу спектріндегі шығындардың шыңы (дБ)	Сәулеленудің қосынды дозасы (кДж/см ²)	E ₂₄₈ /E ₂₆₄ қатынасы
1	2	3	4	5	6

Fibercor PS1250/1500	248	0,025	9,95	4,4	5,7
	264	205	10,65	0,775	
Nufern GF1	248	0,025	6,92	11,9	7,6
	264	180	7,02	1,573	

2.1 – кестенің жалғасы

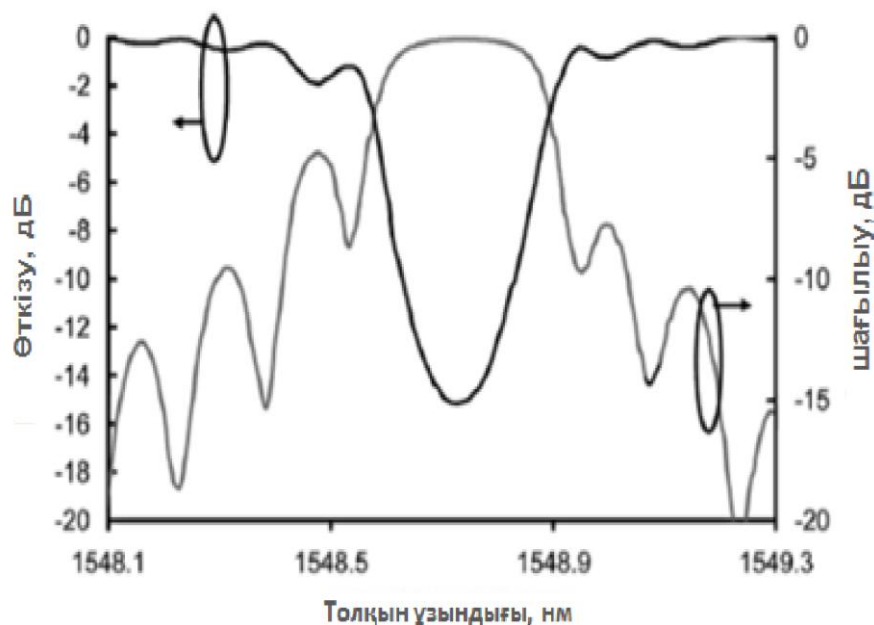
1	2	3	4	5	6
Сутегімен қарқындалатын н Nufern GF1	248	0,025	10,17	0,7	18,4
	264	231	10,19	0,038	
Сутегімен қарқындалатын н Corming SMF- 28	248	0,025	10,31	14,7	85,5
	264	167	10,34	0,172	
			Тураланбаған ан ПП		
Сутегімен қарқындалатын н Corming SMF- 28	248	0,02	$6,5 \times 10^{-4}$	7,0	43,8

Осылайша, фемтосекундтық лазерлердің қолданылуы сәулеленудің жоғары қарқындылығына байланысты импульсте көп фотонды жұтылу мүмкіндігі жоғарылайды. Сонымен қатар, наносекундты импульстерге қарағанда талшықты жарық өткізгіштерін оларды бұзбай және сәулемен теспей сәулелендіру мүмкіндігі бар. Наносекундты импульстің ұзақтылығымен салыстырғанда сыну көрсеткішінің ұқсас өзгеруі сәулеленудің аз мөлшерінде жүзеге асуы мүмкін. Одан басқа, инфрақызыл сәулеленуді қолданған кезде жазбаны жарық өткізгішінің полимерлі қабаты арқылы жүргізуге болады. Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. еңбектерінде Брэгг дифракциялық құрылымын УК талшығына жазу технологиясының кемшіліктерінің бірі – тордың жазылуы алдында талшықтың қорғаныстық полимерлі қабатын алу қажеттілігі шешілген. Бұл процестің орындалуы қажет, себебі талшықтың қабаты ретінде қолданылатын стандартты полимерлері жарықтың УК арналған. Айтылған тәсіл [60] еңбекте қолданылған, онда қорғаныс қабаты арқылы торды жазу үшін қолданылатын импульстің энергиясы шамамен 1 мкДж құрайды. Бұл торды талшыққа жазу үшін қажетті энергиядан екі есе жоғары, өйткені полимерлі қабаттың энергия шығынын қарымталау қажет.

Тордың талшыққа сатылы жазылуында 1 кГц импульстік жиілігі кезінде 150 фс ұзындықты импульсін өндіретін 800 нм толқын ұзындығында жұмыс істейтін лазер қолданылған. Фокусталудың геометриясы 2.32-суретте

келтірілген. Сәуле $NA = 0,55$ сандық апертурасымен 100 еселі микроскоптық объективімен талшықтың өзекшесіне фокусталған.

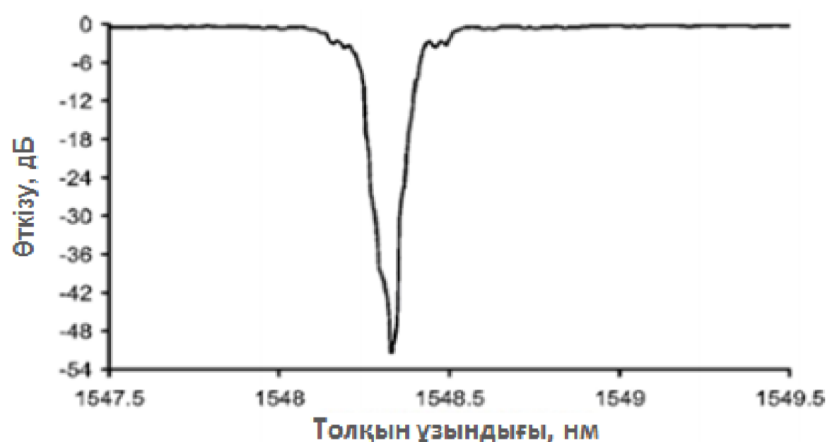
2.26-суретте стандартты бір модальды талшықтың қабаты арқылы жазылған ұзындығы 4 мм Брэгг торының өткізу мен шағылысу спектрлері көрсетілген.



Сурет 2.26 - Стандартты бір модальды талшықтың қабаты арқылы жазылған ұзындығы 4 мм Брэгг торының өткізу мен шағылысу спектрлері

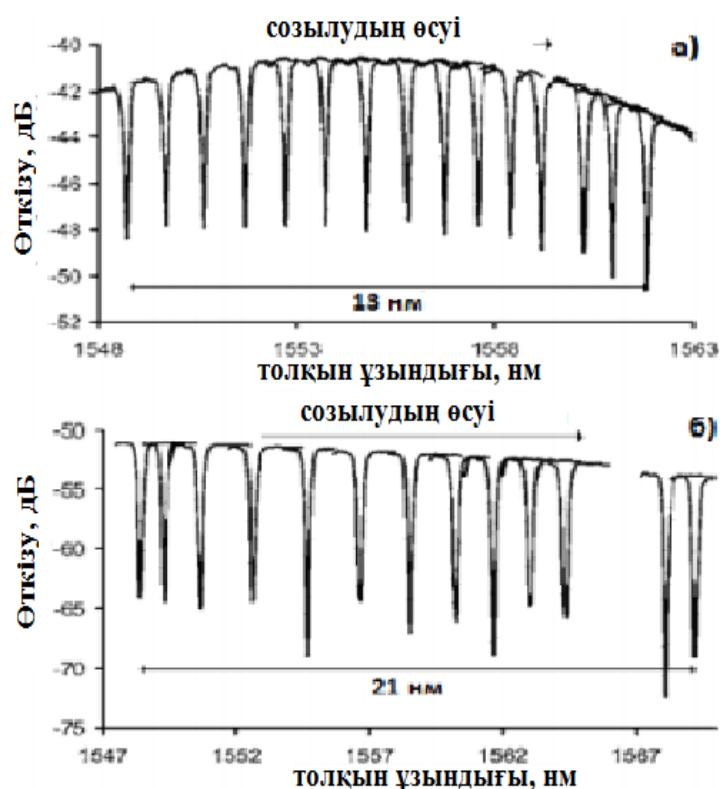
Тордың ұзындығын арттыру арқылы оның шағылысу коэффициентін де арттыруға болады. Егер жазу жылдамдығы 1550 нм екінші реттік резонанстық шағылысу шамамен 1,07 мм/с екендігін ескерсек, онда 4-тен 26 мм дейін торлары үшін жазылу уақыты 4-26 аралығында өзгереді.

Толқынның резонанстық ұзындығына 50 дБ жіберуінің шығынын бейнелейтін қабат арқылы стандартты талшыққа жазылған 26 мм ұзындықты тордың өткізу спектрі 2.27-суретте көрсетілген.



Сурет 2.27 - Қабат арқылы стандартты талшыққа жазылған 26 мм ұзындықты тордың өткізу спектрі

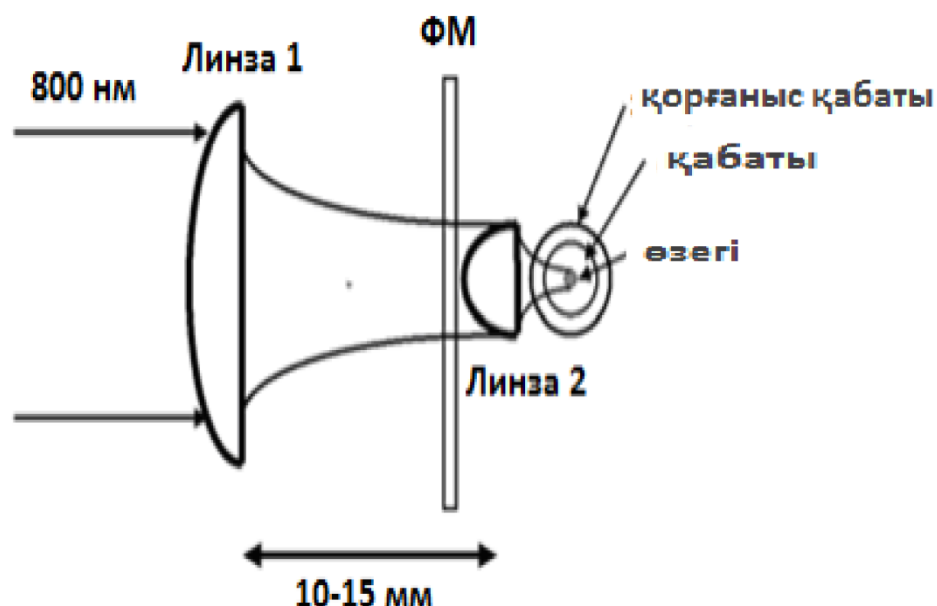
Жоғарыда айтылғандай, қабат арқылы жазылған торлар үлкен механикалық беріктілікті көрсетіп тұр. Берілген сипаттаманы анықтау үшін екі ұқсас торлар салыстырылды: біреуі қапталмаған талшықта жазылған, екіншісі – қапталған талшықта жазылған. Торлардың спектрін қадағалау кезінде торлар олардың ақаулануына дейін созылды. Қапталмаған талшықта (а) және қапталған талшықта (б) тор үшін өспелі созылумен индукцияланған толқын ұзындығының ығысуы 2.28-суретте көрсетілген.



Сурет 2.28 - Қапталмаған талшықта (а) және қапталған талшықта (б) тор үшін өспелі созылумен индукцияланған толқын ұзындығының ығысуы

2.28-суреттен көрініп тұрғандай ақаулануға дейінгі толқынның ығысуы қапталмаған талшық үшін 9-13 нм, қапталған талшық үшін 21-22 нм аралығында. Бұл қапталған талшықпен жазылған тордың қапталмаған талшықпен жазылған торға қарағанда берік екендігін және істен шыққанға дейін үлкен созылуға төзімділігін көрсетеді.

Smelser C.W., Bilodeau F., Malo B., Grobnc D., [61] жұмысында авторлар өзінің фотосезімталдығын ұлғайтудың ешқандай процестеріне ұшырамаған ТБТ-дың стандартты ОВ SMF-28 жазылу мүмкіндігін және жазу сұлбасының қолданылуын көрсеткен (сурет 2.29).

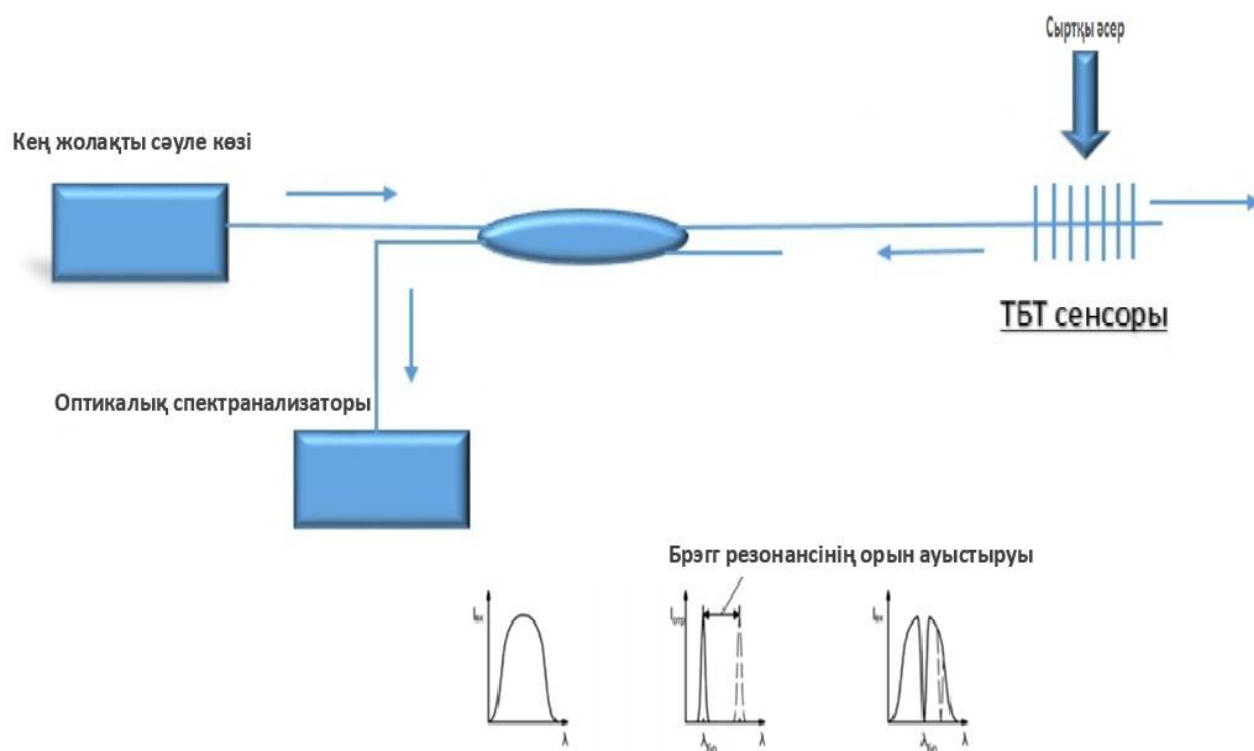


Сурет 2.29- ФМ тәсілімен қорғаныс қабаты арқылы ТБТ жазылу сұлбасы

Берілген жағдайда ОТ-ден полимерлі қорғаныстық қабатын алусыз ТБТ-ны қадамдық жазу кезіндегідей осы тәсілдің барлық артықшылықтары сақталады. Одан басқа бұл жерде ОТ-ның фокусталған сәулеленудің бойымен прецизионды механикалық жүргізу қажеттілігі алынады.

Becker M., Bergmann J., Bruckner S., Mihailov S.J., Grobncic D., [62-63] жұмыстарында Брэгг торларын ОТ-ға индукциялау бойынша жоғарыда көрсетілген барлық артықшылықтардың ең маңыздысы: бұл лазерлік импульстің ұзақтылық фемтосекундтық диапазонында ішкі фотосезімталдық әрекет етудің салдарынан фоторефрактивтіліктің ұлғаю процесінсіз ТБТ-дің ОТ-ға жазылу мүмкіндігі [64]. Дегенмен, берілген жұмыстардың айтарлықтай кемшілігіне жеке импульстардың эксимерлі лазердің УК импульсімен салыстырғанда энергиясының аз болуының салдарынан, ұзақтығы фемтосекунд жеке лазерлік импульсімен күшті торларды жаза алмауы жатады.

Брэгг торлары негізінде сенсорлық жүйені тұрғызудың көптеген тәсілдері бар. Қарапайым жағдайда сенсорлық жүйесі өзімен анализатор блогы мен жарық сигнал көзі бар оптикалық тармақталу арқылы жалғанған нүктелі сенсорды білдіреді (сурет 2.30). Сигнал көзден сезімтал элементімен шағылыстырылады. Шағылысу толқынның ұзындығы анализатор блогымен бекітіледі.



Сурет 2.30 - Брэгг тордағы қарапайым талшықты-оптикалық сенсордың сұлбасы

Әдетте, анализатор (Bragg grating interrogator) өзімен жіңішке жолақты спектрометрді білдіреді. Спектрометрлердің әртүрлі типтері бар: дисперстік элементтің орнына дифракциялық тор қолданылатын стандартты дифракциялық түрден бастап, Фабри-Перо интерферометрінің негізіндегі анализаторға дейінгі түрлері.

Талшықты-оптикалық сенсорлардың негізгі артықшылығының бірі олардың массивке (мультиплекстену) жеңіл бірігу мүмкіндігі болып табылады. Брэгг торларының талшықты сенсорында ең жиі мультиплекстенудің келесі екі түрі қолданылады – толқынның ұзындығы бойынша мультиплекстеу (Wavelength Division Multiplexing - WDM) мен уақыт бойынша мультиплекстеу (Time Division Multiplexing – TDM).

Уақыт бойынша мультиплекстеу TDM жүйесі бойынша сигналдың өту жылдамдығын сараптауға негізделген. Әрбір сенсор талшықты жарық өткізгішінің телімдеріне бөлінген, оның өтуі үшін сигналға алдын ала белгілі, анықталған уақыт қажет. Жүйеге қысқа импульс жібереді. Шығыс сигналы уақыт бойынша дифференциалданған импульстардың қатарын көрсетеді, олардың әрқайсысы жеке сенсордың күйі туралы ақпаратты тасымалдайды. Digonne M.J.F., Vakoca B.J., Hodgson C.W., Kino G.S. зерттеулерінде көрсетілгендей, таза күйінде мультиплекстеудің бұндай жүйесі Брэгг талшықты сенсорлардың бірігуі үшін сирек қолданылады, бірақ күрделі жүйенің құрамдық бөлігі ретінде жиі кездеседі. Осындай мультиплекстің толық сипаттамасы [65] еңбекте толық келтірілген.

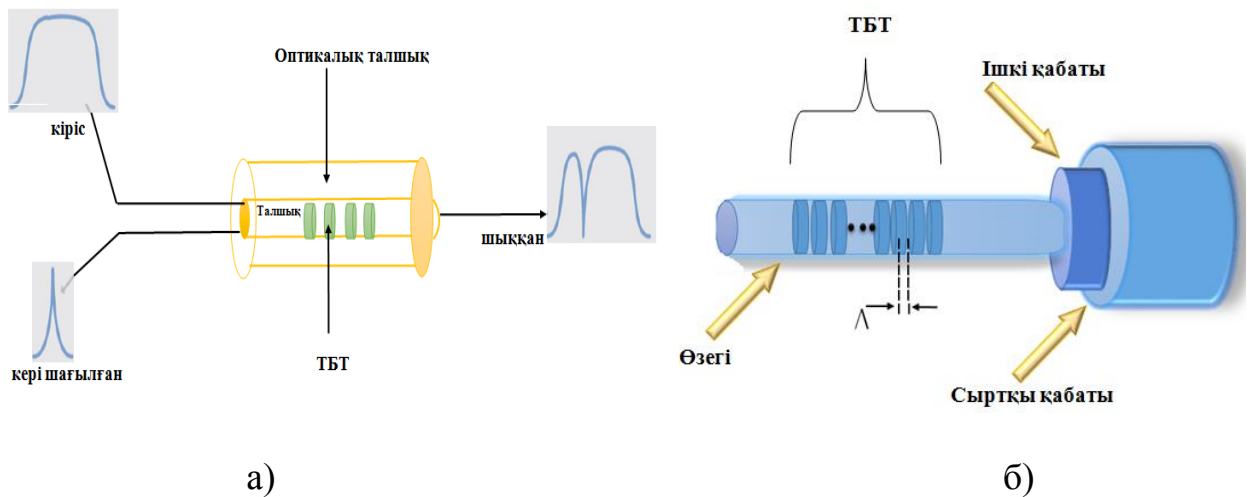
Мультиплекстеудің WDM принципі әрбір сенсорлық элементтің өзінің жеке периодымен жазылатындығына негізделеді, бұл сараптама кезінде спектр бойынша оларды ажыратуға және сәйкесінше әр сенсордың жеке көрсеткіштерін бекітуге мүмкіндік береді. Массивтегі сенсордың көлемі, негізінен, көздің спектрлі ені мен анализатордың динамикалық диапазонымен шектеледі.

2.8 Брэгг торы негізіндегі температура сенсоры, оларды жүзеге асыру, бағалау, спектральдық сипаттамалары және оның ығысуы

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

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

Бірден бір көптеп қолданылатын оптикалық сенсорлар талшықты Брэгг торлары болып табылады, ол жарық сәулесінің толқын ұзындығын шағылыстырады. Ол сондай-ақ температура өзгерісіне байланысты ығысады немесе деформацияланады. Брэгг торы негізіндегі температура сенсорлары голографикалық интерференцияларды пайдаланумен құрылған, себебі сезімтал талшықтың қысқа толқынын жарық сәулесінің интенсивтілігімен таралуына сәйкестендіру қажет. Талшықтың сыну көрсеткіші жарық интенсивтілігімен тұрақты өзгереді, бұл процесс талшықты Брэгг торы деп аталады және 2.31-суретте келтірілген.



Сурет 2.31 – Брэгг торы негізіндегі температура сенсорының операциясы және оның кеңейтілген көрінісі

Кеңейтілген спектрлі жарық сәулесі талшықты Брэгг торына жіберілген кезде, сыну көрсеткіші айнымалысының әр сегменттен берілетін шағылысуы жарық сәулесінің белгілі бір толқын ұзындығына ғана әсер етеді. Бұл Брэгг толқын ұзындығы алдағы тендеуде қарастырылады. Брэгг толқын ұзындығы (λ) функциясы болып табылатындықтан, торлар арасындағы интервал тор периоды болып табылады. Талшықты Брэгг торлары түрлі толқын ұзындықтарымен жасалады. Деформацияның және температураның өзгерісі сынудың n эффективтік көрсеткішіне әсер етеді. Бұл шағылысқан толқын ұзындығының ығысуына әкеледі. Деформация және температура әсерінен талшықты Брэгг торын шамамен мына тендеулермен сипаттауға болады:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + \alpha_\delta\Delta T \quad (2.1)$$

λ_B – Брэгг толқын ұзындығының ығысуы, k – беріктік коэффициенті және ол 1-р мәніне тең болады, мұндағы $p=0.22$, $k=0.78$, ε – кернеу, α_δ – сыну көрсеткішінің өзгерісі, ΔT – температура өзгерісі.

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

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

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right] \quad (2.2)$$

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

$$\alpha = \frac{dL}{dT} \text{ and } \beta = \frac{dn}{dT} \quad (2.3)$$

мұндағы

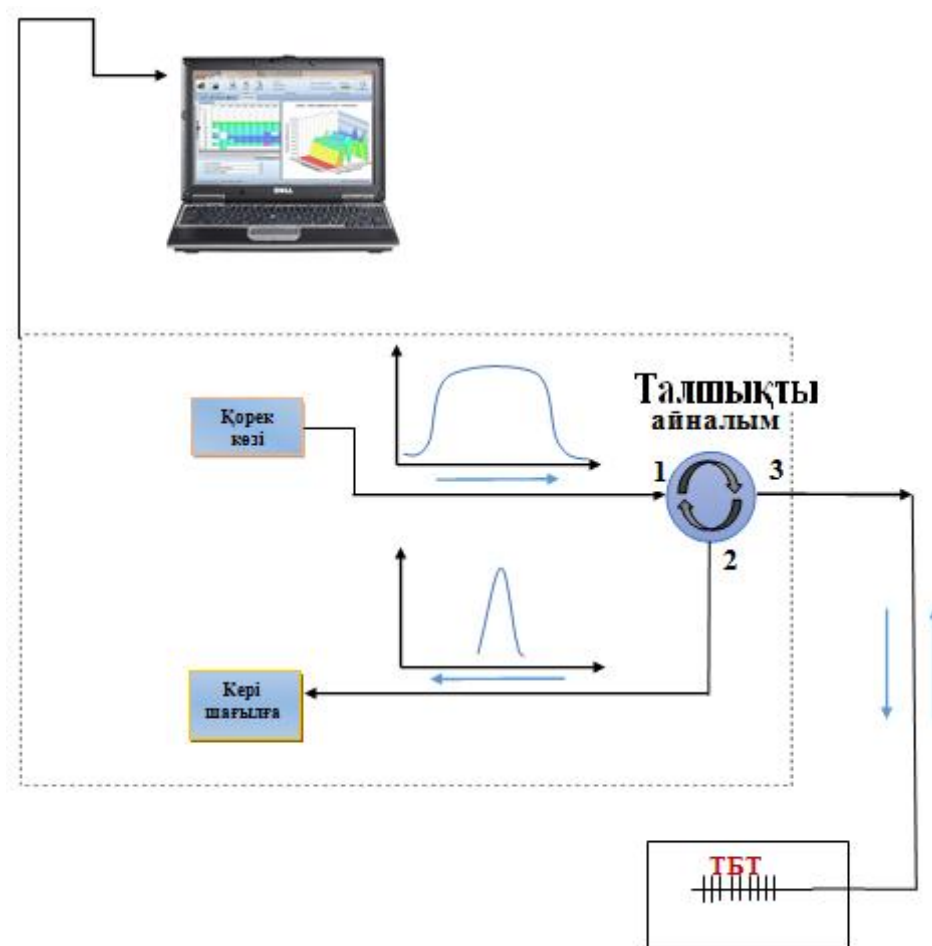
$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{2\pi}{\lambda} L(n\alpha + \beta) \quad (2.4)$$

Мұнда α – жылулық кеңеюі, β – жылулық-оптикалық коэффициент. Жоғарыдағы теңдеуге сәйкес, сыну көрсеткішінің өзгерісі төмендегі теңдеумен берілген:

$$dn = \frac{\lambda}{2\pi L} d\varphi - n\alpha dT \quad (2.5)$$

2.9 Талшықты Брэгг торына негізделген сенсордың сипаттамасы

ТБТ сенсорын сипаттау үшін, бір модальды оптикалық талшықты лазерлік диод, толқынның орташа ұзындығы (1530 нм- 1548 нм), шығыс қуаты шамамен 1,59 мВт, шығыс ток шамамен 29,4 мА, оптикалық талшықты циркулятордың кіріс терминалына қосылған. Осы кезде таратқыш терминал талшықты Брэгг торына қосылған, ол микропроцессормен басқарылатын су ваннасы бойлерінде пайда болады, температура диапазоны: (0-100) ° С, циркулятордың үшінші терминалы арқылы шағылған сигнал монохроматорға/спектрограф (Zolix DlnGaAs1700 InGaAs Detector) жалғанған, моделі Omni-λ сериялары, фокустың арақашықтығы 500 (мм). Эксперименттік жұмыстың толық блок-сұлбасы 2.32-суретте келтірілген.



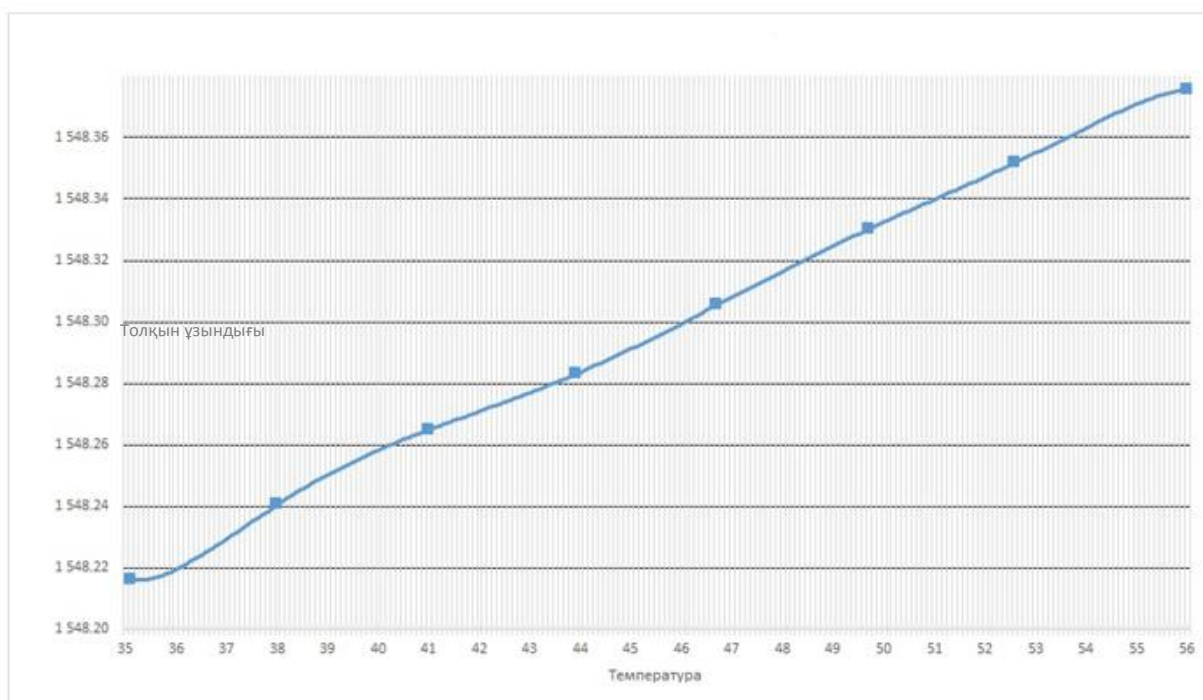
Сурет 2.32– ТБТ температуралық сенсорының блок-сұлбасы

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

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

Температураның өсуімен ТБТ резонанстық толқын ұзындығының ығысуы 0,0091 нм С⁻¹ арқылы өлшенді. Екінші теңдеуден күтілген сезімталдылық 1548 нм-лік Брэгг торы үшін шамамен 13,7 мкм [°]С -ге тең.

Брэгг торының толқын ұзындығының ығысуының температураға тәуелділігінің эксперименттік нәтижелері 2.33-суретте келтірілген.



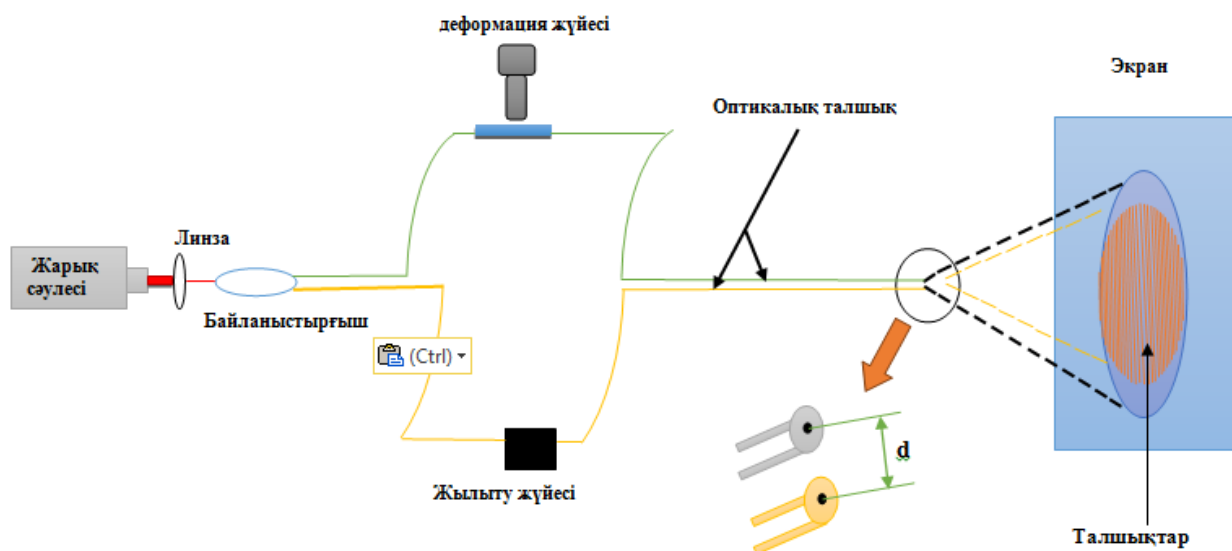
Сурет 2.33 – Брэгг торынан шағылысудың түрлі температурадағы шыңдары

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

Кесте 2.2 – Температура өзгерісімен Брэгг толқын ұзындықтарының мәндері

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

Жоғары температураны қолдану үшін ТБТ-ның түрлі толқын ұзындықтарын қолдану қажет. Температураның өзгерісі детектор көмегімен өлшенеді, спектрдің бір анализаторымен бір толқын ұзындығы көзі қолданылады. Бұл эксперименттің блок-сұлбасы 2.34-суретте келтірілген.



Сурет 2.34 – Талшықты Брэгг торы негізіндегі сенсордың эксперименттік блок-сұлбасы

Сынақтан өткізу үшін қолданылған сенсорда алдымен қоршаған ортаның 35-тен 56-қа⁰С температурасымен 5⁰С қадам арқылы өзгерісі алынды. Сыну көрсеткішіне қатысты фаза айырмасы теңдеуге сәйкес және 2.3-кестеде келтірілген.

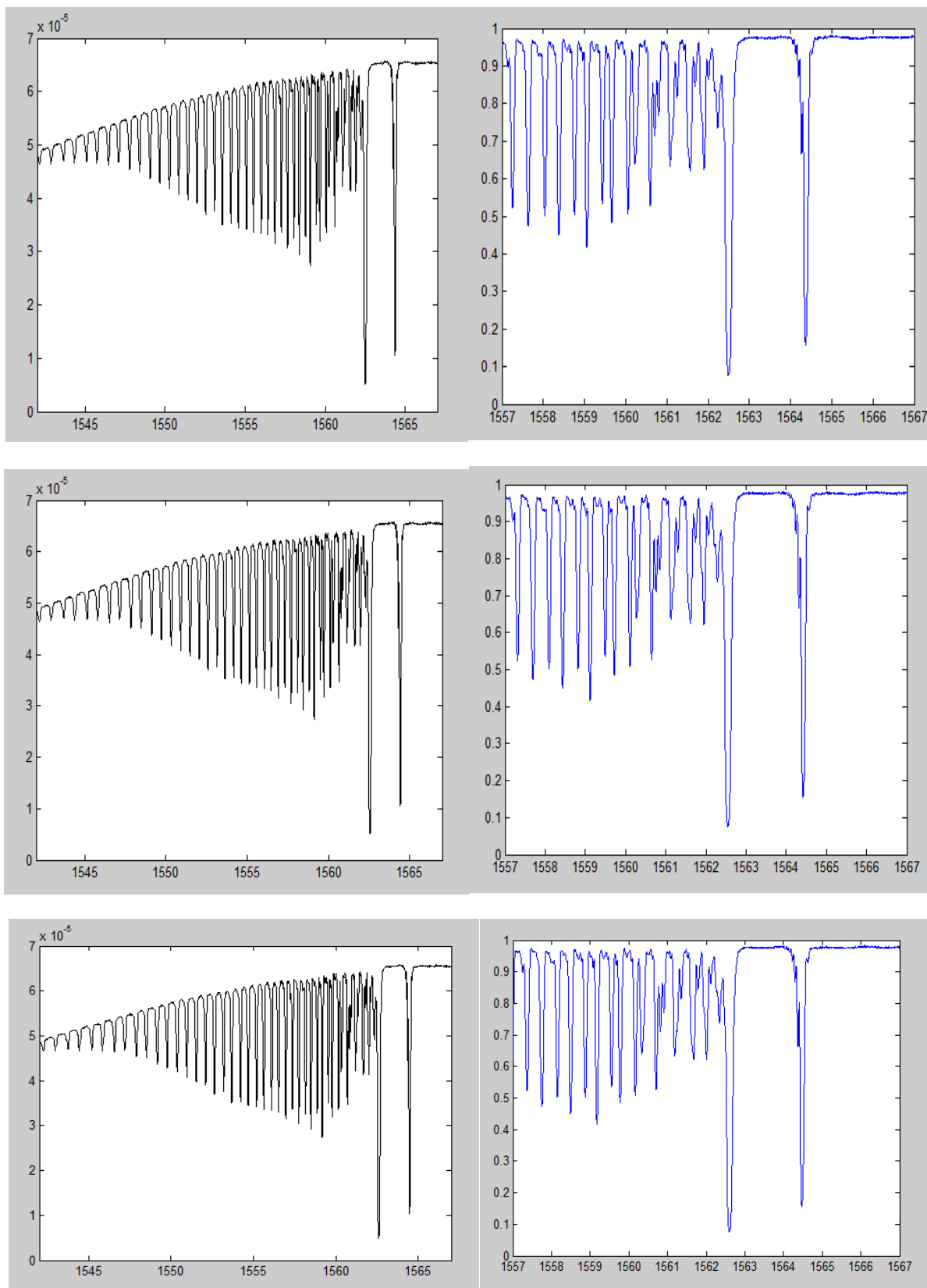
Кесте 2.3 - Температураның сыну көрсеткішінің өзгерісіне байланысты фаза айырмасына әсері

T ⁰ С	$\Delta \phi * 2\pi$	d n	T ⁰ С	$\Delta \phi * 2\pi$	d n
35	9.50	1.6211	47	43.75	7.6434
38	1/.5	3.0/1/1	50	48.75	8.5226
41	24.75	4.3026	53	53.50	9.4017
43	31.50	5.4895	55	57.50	10.061
44	38.25	6.6763	56	61.25	10.721

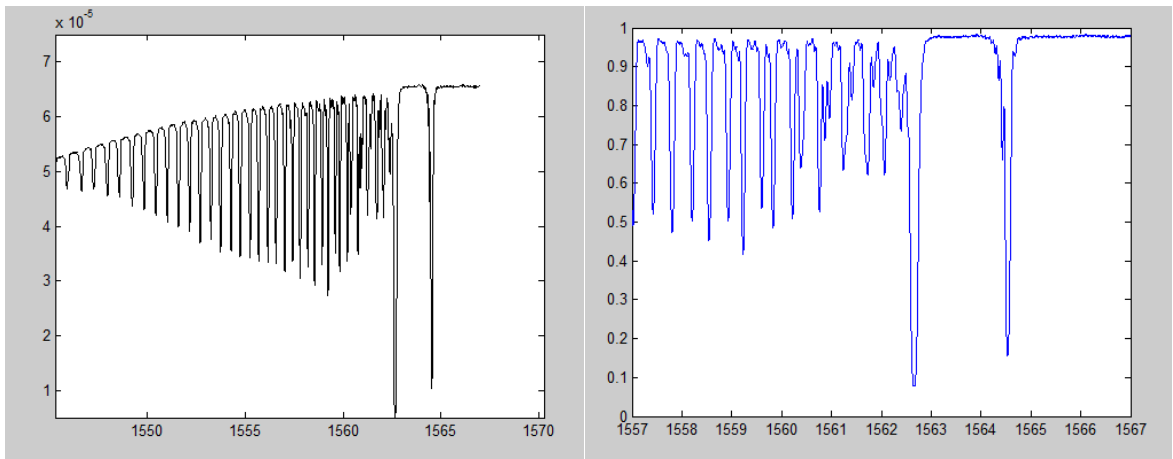
Температура мәнінің фаза айырмасына қатынасы сызықты байланыста болуы тиіс және сыну көрсеткішіне байланысты өзгереді. Суретте көрсетілгендей калибрлік қисық осындай сенсор үшін сезімталдық қисығы ретінде қолданылуы мүмкін.

Бұл графиктер Брэгг торларының қисықтарының спектрлік трансмиссиялық сипаттамаларынан тұрады. Торлардың бұл қисықтары талшық өсінің ұзындығына дейінгі 2 градуспен иілген. Қара графиктерде «х» өсінде толқын ұзындықтары тор арқылы нанометрлік өлшемде өтеді, ал «у» өсінде шығыс сигнал ваттпен көрсетіледі. Көк графиктерде «у» өсінде қалыпқа келтірілген шығыс сигнал, ал «х» өсінде кіріс толқындардың ұзындығы көрсетілген. Бұл графиктерде температураны ұлғайтатын спектрлер келтірілген, ал оларда торлар орналасқан. Бұл зерттеліп отырған бөлімде қара

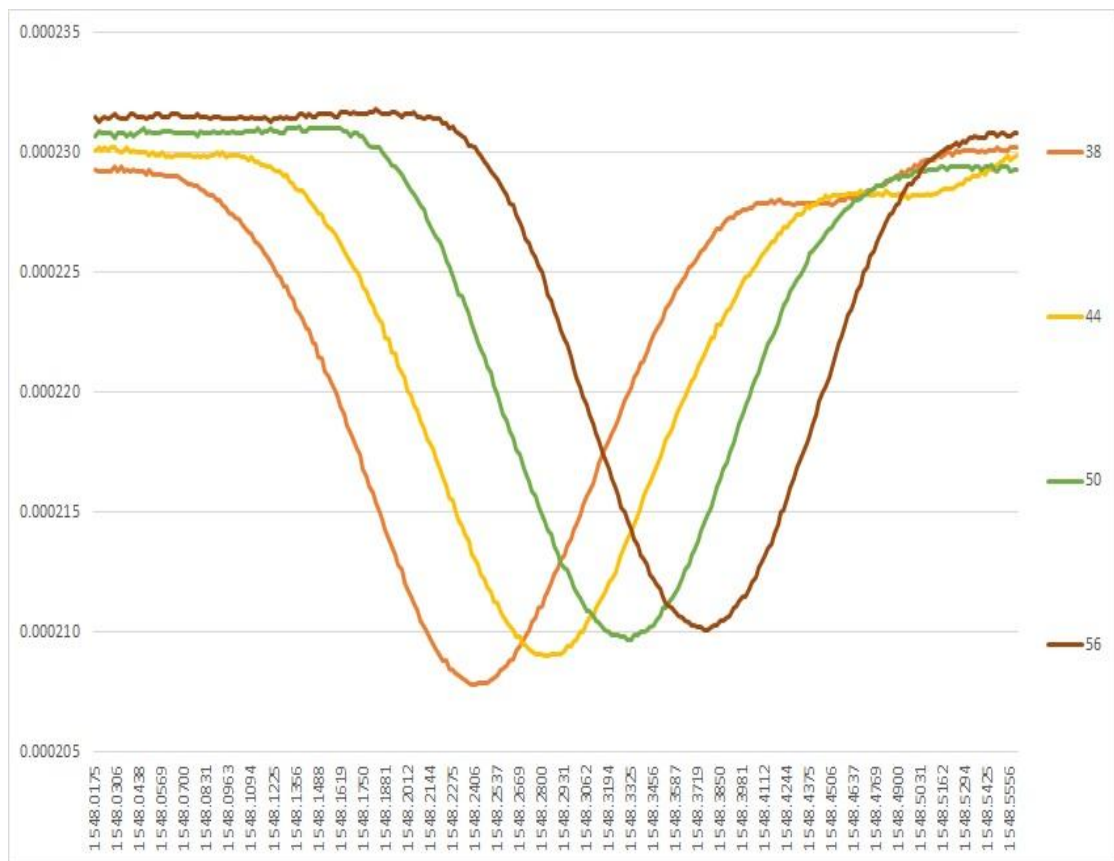
графикте көрсетіліп отырған қарапайым оптикалық талшық болса, ал көк графикте Брэгг торы жазылған кездегі көрінісі.



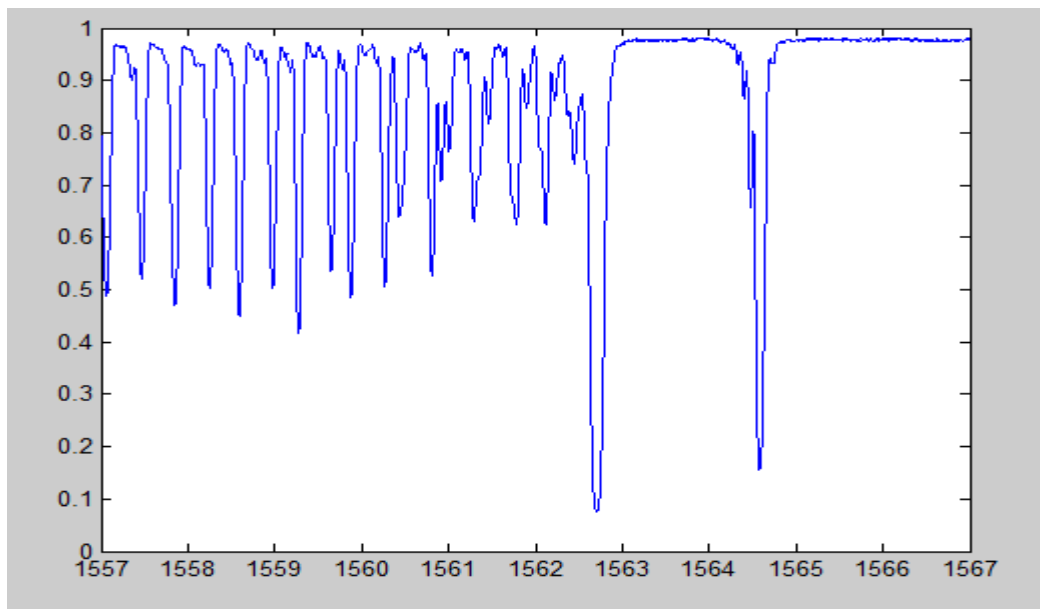
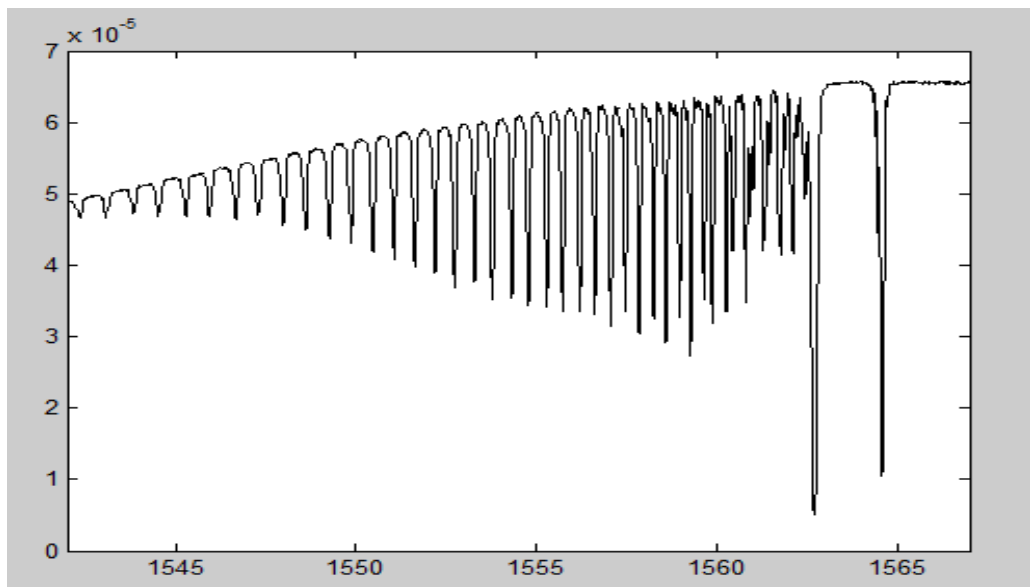
Сурет 2.35 - Оптикалық талшықты Брэгг торларының спектралды трансмиссиялық сипаттамалары, бет 1



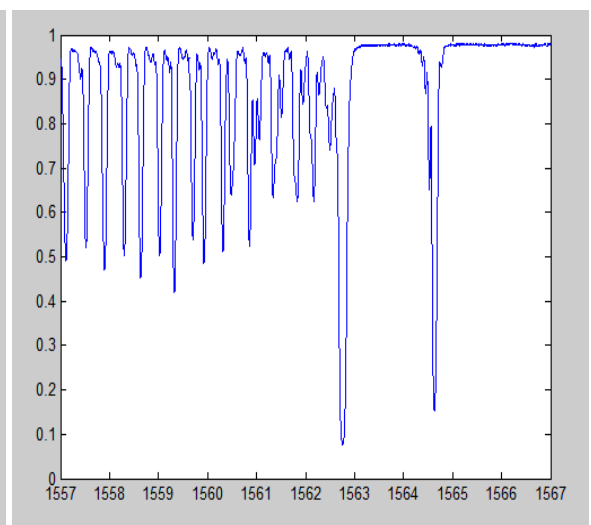
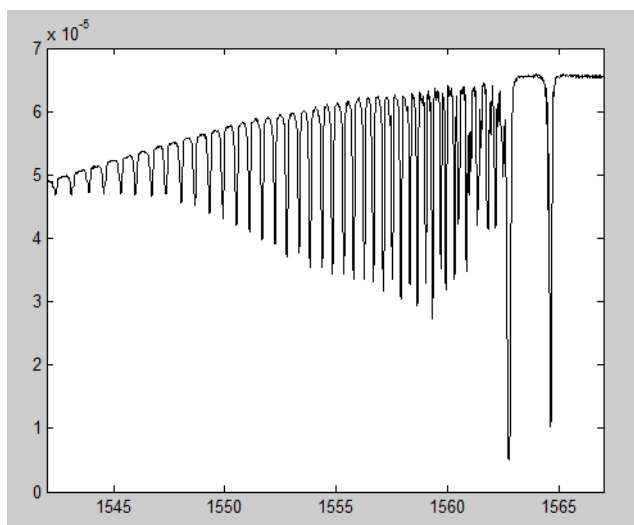
Сурет 2.35 - Оптикалық талшықты Брэгг торларының спектралды трансмиссиялық сипаттамалары, бет 2

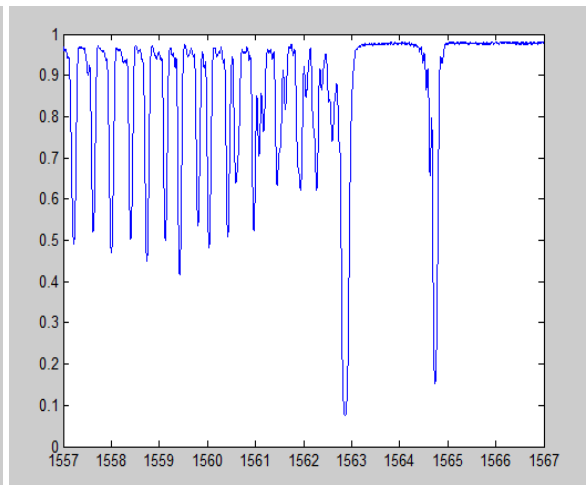
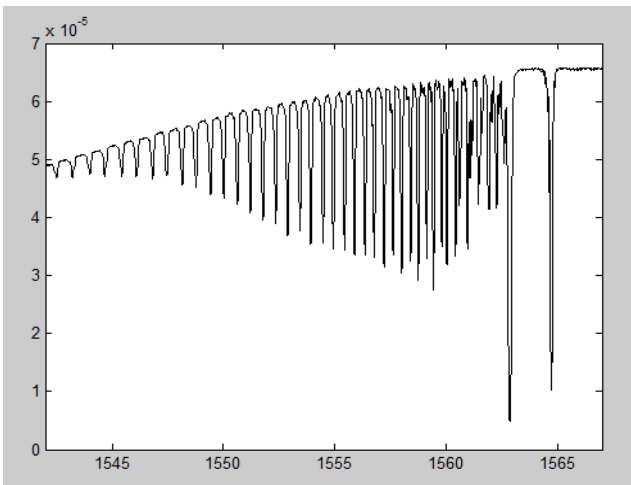
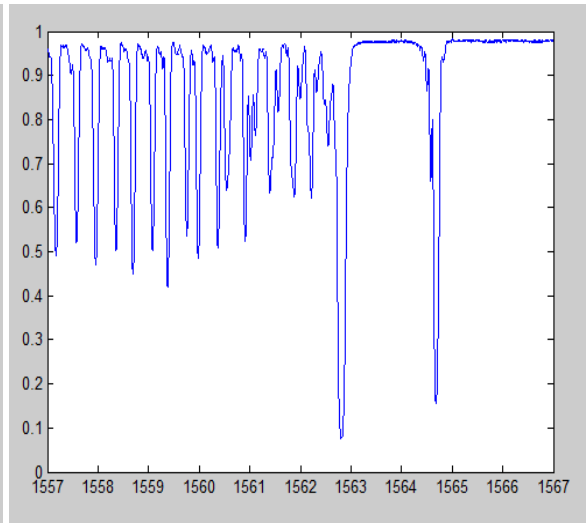
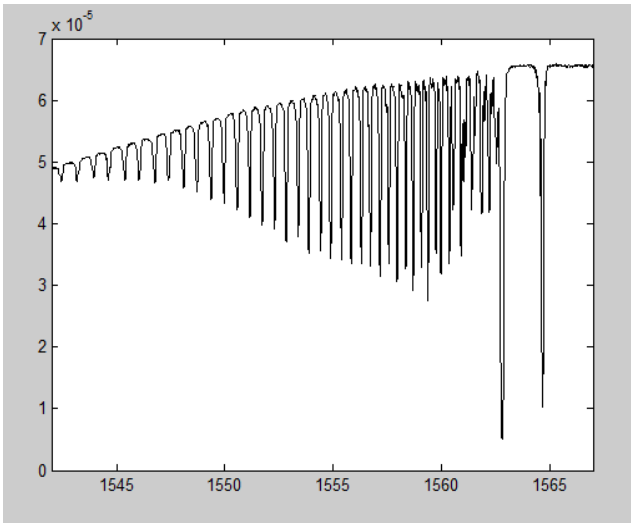


Сурет 2.36 - 38⁰С, 44⁰с, 50⁰, 56⁰ градус аралығындағы график

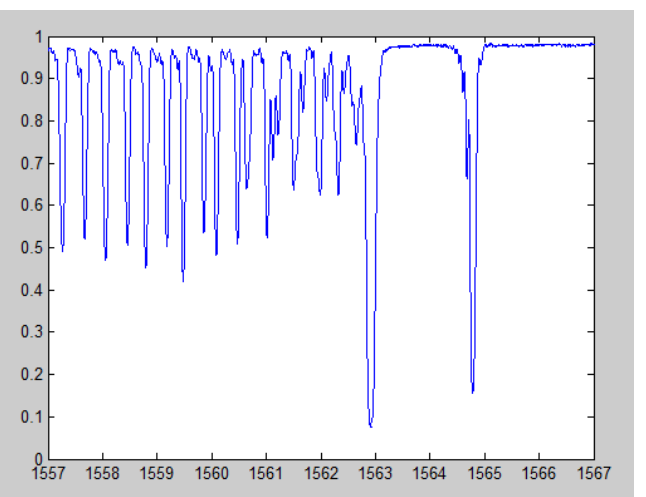
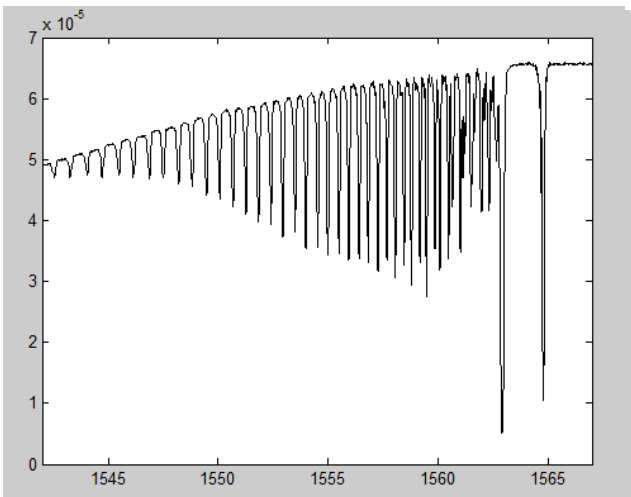


Сурет 2.37 – Өзгеріс графигі

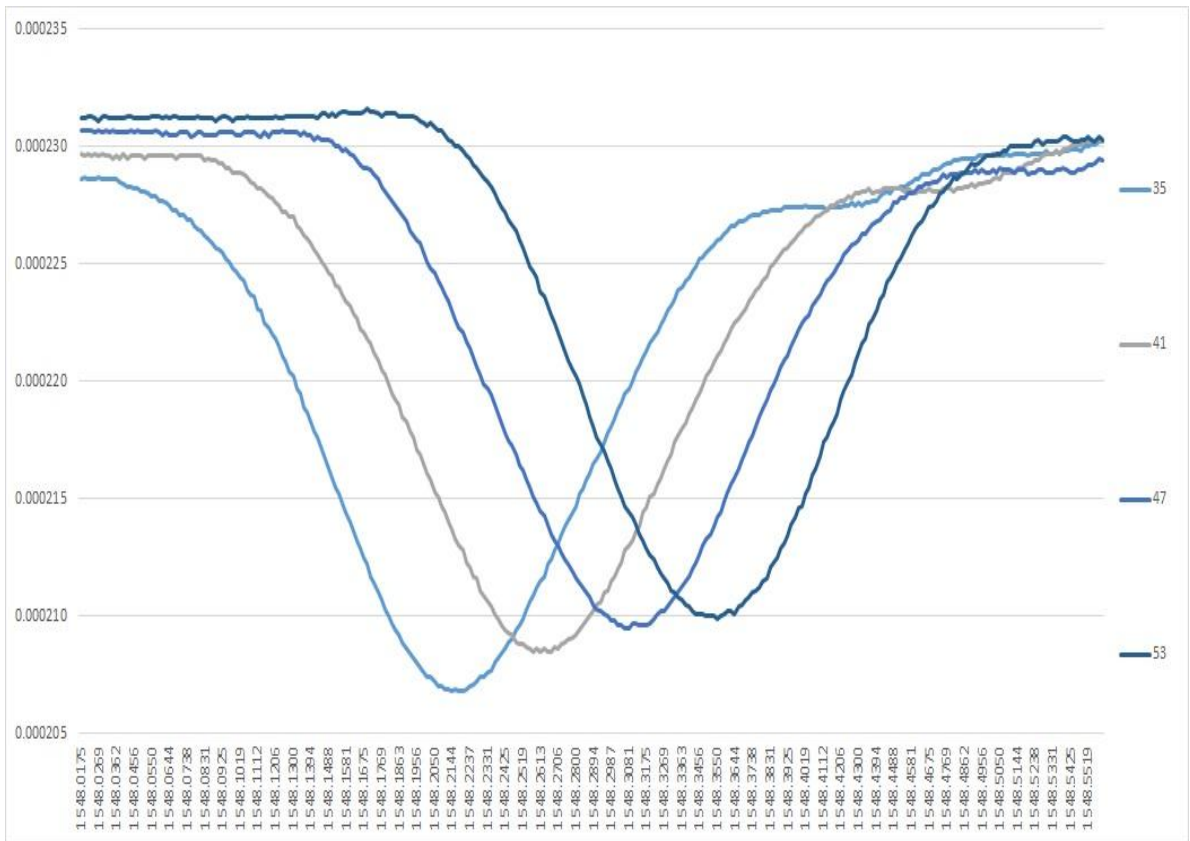




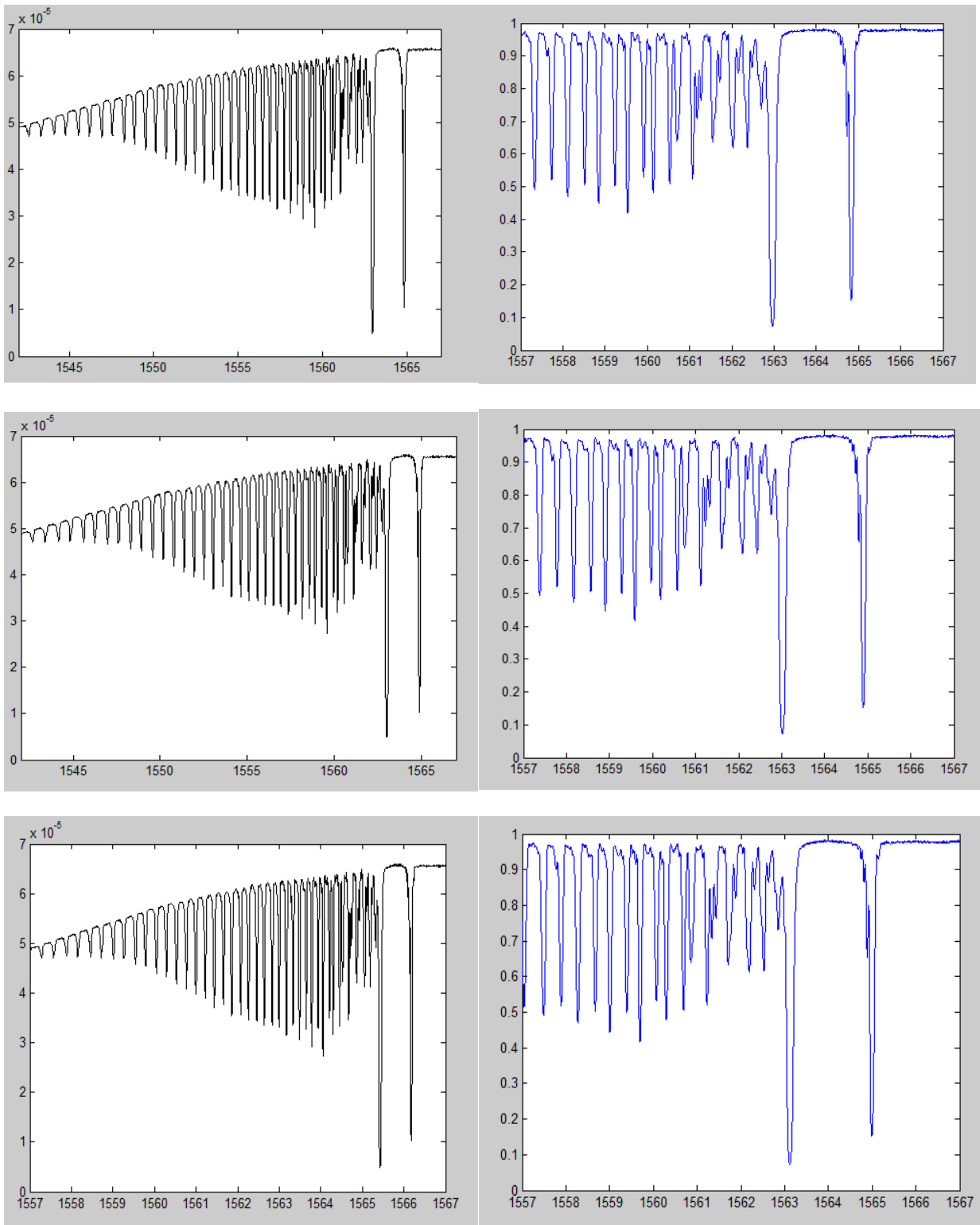
Сурет 2.38 – Әртүрлі аралықтағы өзгеріс графиктері, бет 1



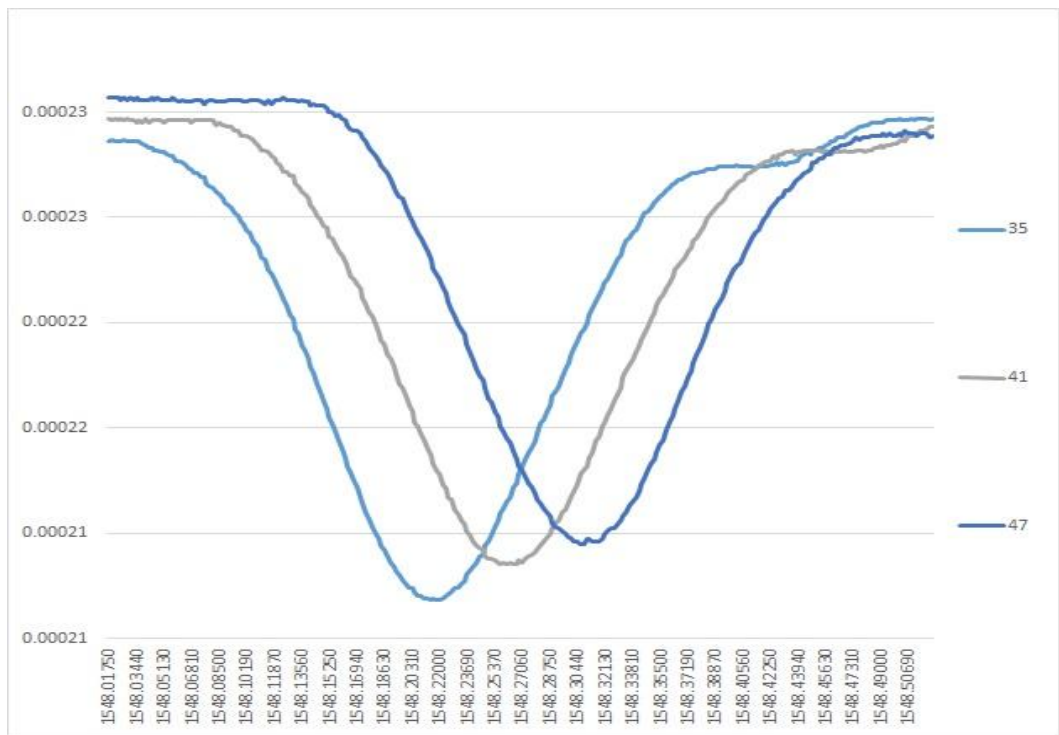
Сурет 2.38 - Әртүрлі аралықтағы өзгеріс графиктері, бет 2



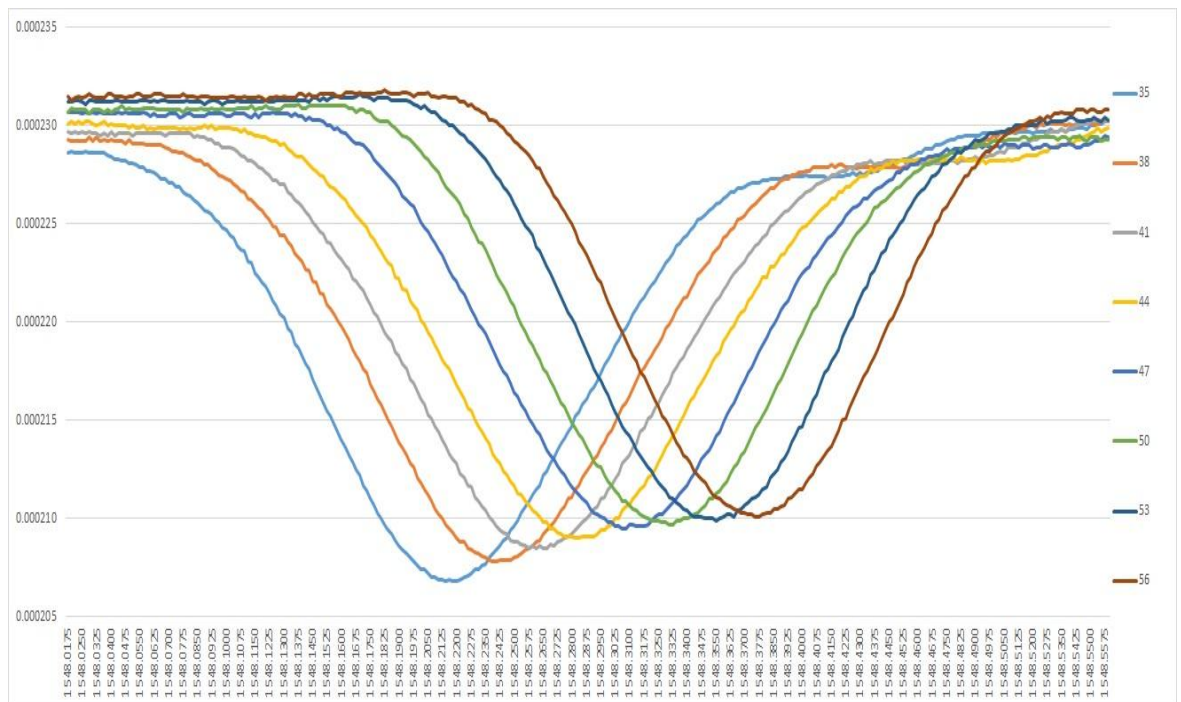
Сурет 2.39 - 35⁰С, 41⁰с, 47⁰, 53⁰ градус аралығындағы график



Сурет 2.40 - Әртүрлі аралықтағы өзгеріс графиктері



Сурет 2.41 - 35⁰С, 41⁰с, 47⁰ градус аралығындағы график



Сурет 2.42 - 35⁰С, 38⁰с, 41⁰, 44⁰, 47⁰, 50⁰, 53⁰, 56⁰ градус аралығындағы оптикалық талшықты Брэгг торынан өткен сәулелердің спектрлік сипаттамаларының температуралық тәуелділік графигі

Температура сенсоры ретінде талшықты Брэгг торы қарастырылды және олар дәстүрлі әдістерге қарағанда көп артықшылықтарымен ерекшеленеді. ТБТ шағылысу немесе өткізу спектрін алу үшін сипатталады. ТБТ температуралық сенсор ретінде қолданылуы үшін (35-65)⁰С диапазон аралығында

пайдаланылды. Қолданылып отырған талшықты Брэгг торы осы жұмыста температураның өзгерген деңгейлеріне сезімтал болып келеді, алынған температура көрсеткіштерімен Брэгг толқын ұзындықтарының ығысуы сызықты байланыста болады. Брэгг толқын ұзындығының температураға сезімталдығы оптикалық талшықтың сыну көрсеткіші өзгерісі есебінен болады.

Екінші бөлім бойынша тұжырым

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

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

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

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

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

Брэгг торы негізіндегі температура сенсоры, оларды экспериментальды жүзеге асыру, бағалау және олардың спектральдық сипаттамаларын зерттеу

кеңінен қарастырылған. Кеңейтілген спектрлі жарық сәулесін талшықты Брэгг торына жіберген кезде сыну көрсеткіші айнымалысының әр сегменттен берілетін шағылысуы жарық сәулесінің белгілі бір толқын ұзындығында ғана әсер етеді.

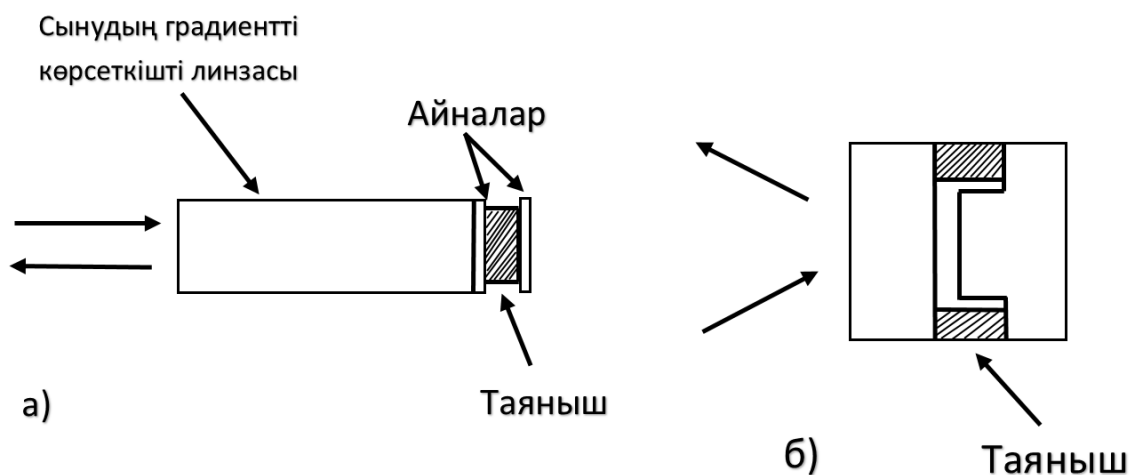
Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қолданылып отырған талшықты Брэгг торы температураның өзгерісіне сезімтал. Алынған температура көрсеткіштерімен Брэгг толқын ұзындықтарының ығысуы сызықты байланыста болады. Брэгг толқын ұзындығының температураға сезімталдығы оптикалық талшықтың сыну көрсеткіші есебінен жүзеге асады.

Берілген бөлім бойынша негізгі тұжырымдар Scopus ақпараттық базасына енген (Scopus) «Proceedings of SPIE - The International Society For Optical Engineering», «Optical Fibers And Their Applications» (Poland) халықаралық ғылыми журналдарында [77] және ҚР БҒМ білім және ғылым саласындағы бақылау Комитетімен ұсынған «ҚазҰТЗУ хабаршысы» [82] басылымында басылып шығарылған және Сәтбаев оқулары «Білім және техникалық ғылымның бәсекеге қабілеттілігі» атты халықаралық конференциясында баяндалды [83].

3 ҚҰРАСТЫРЫЛҒАН ТАЛШЫҚТЫ БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНЫҢ СПЕКТРЛІК СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ТӘУЕЛДІЛІК ЗАҢДЫЛЫҒЫН АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТХАНАНЫ ҰЙЫМДАСТЫРУ

3.1 Талшықты Брэггті шағылыстыруындағы интерферометриялық сенсор

ТБТ массивінің негізіндегі фазалық интерферометриялық сенсордың сезімтал элементі ОТ болады, ол өзіндік құнының төмендеуіне әкеледі. Екі тордың арасындағы ОТ кескіні өзімен Фабри-Перо интерферометрін білдіреді. Деформация мен акустикалық тербелістердің әсерінен екі көршілес Брэгг тордың сигналдар фазасының айырмасы өзгереді. Интерферометриялық сенсорлар сыртқы факторлардың әсерінен талшықтың кескін ұзындығының өзгеруінде жоғары сезімталдыққа ие. Фабри-Перо интерферометрі негізінде сенсорларды дайындау әдістері – өңделген кварцтан бастап, талшықтың ұшына айнаның жұқа қабатын тұндыруға дейін күрделі құрастырудан тұрады, температураның екі сенсоры төменде көрсетілген. Интерферометрдің сипаттамасын өзгерту үшін таяныш пайдаланылады. 3.1 а суретте кергі жарық өткізгіште болады және температура өзгергенде, өзінің қалыңдығын өзгерту арқылы сыну көрсеткішін өзгертетін оптикалық қашықтыққа әсер етеді. 3.1б суретте тек қашықтыққа әсер ететін кергі схемасы көрсетілген.

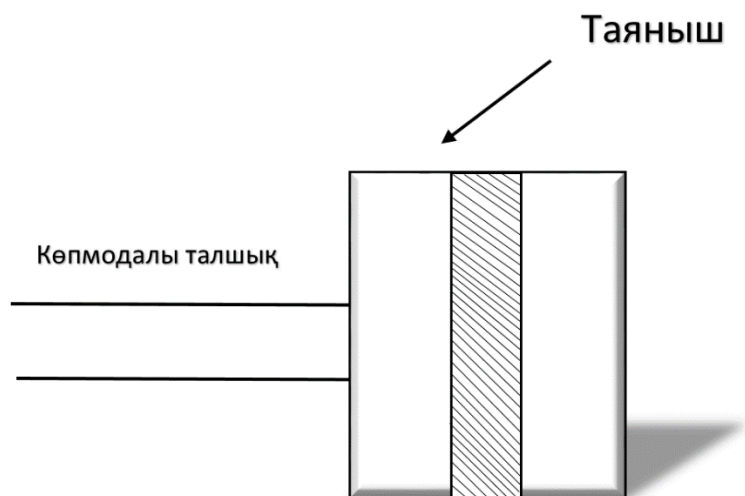


Сурет 3.1 - Интерферометр базасын өзгертуге арналған кеңейтуді пайдаланатын температура сенсоры

Фабри-Перо интерферометрі негізіндегі температура сенсоры келтірілген. Сенсорлар интегралды схема технологиясын пайдалану арқылы жасалған. Әдетте сенсордың аумақты өлшемі $0,5*0,5*0,2$ мм-ді құрайды.

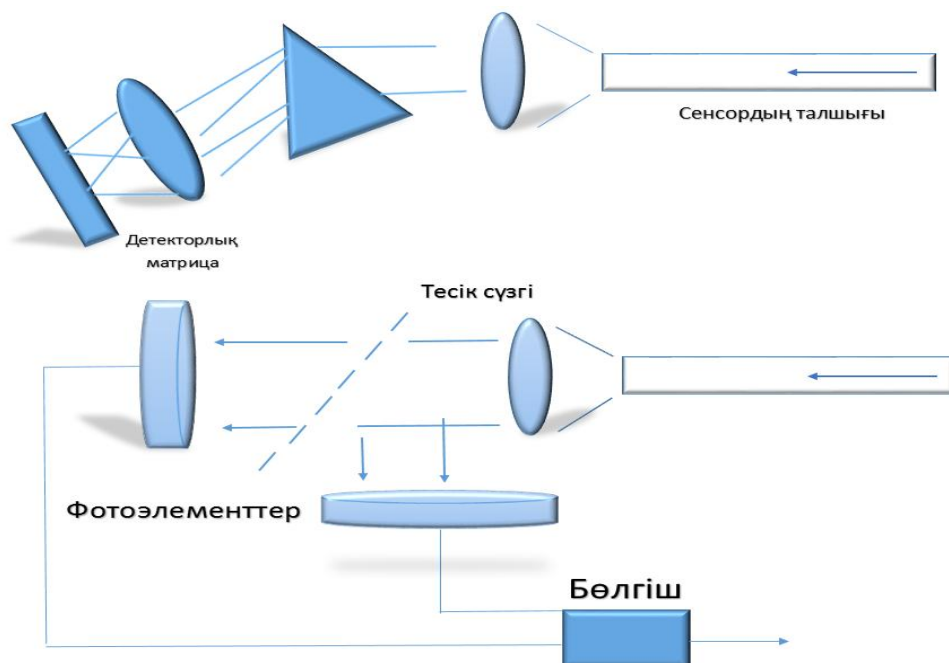
Интерферометрлік сенсорларда сигналдардың деңгейін есептегіш ретінде бір фотодиод қолданылады; бірақ сенсордың тиімділігі шектеулі болады.

Мысалы, төзімділігі жоғары Фабри-Перо интерферометрлі аспаптарда дәл есептеу жүйесі шуды азайтып, интерферометрдің ығысу циклдерінде режимнің сызықтылығын қамтамасыз ететін жүздеген фотодиод пен дисперстік оптикалардан жасалады (сурет 3.2).



Сурет 3.2 - Температураны өлшеуге арналған Фабри-Перо сенсоры

Фотодиодтар жиынынан тұратын есептегіш мысалы 3.4-суретте көрсетілген. Сенсордан келетін жарық оптикалық спектрді есептеуді қамтамасыз ететін фотодиодтар матрицасына түседі. Бұл 3.4б-суретте а нұсқасының қарапайым түрі, мұнда тек екі қабылдағыш бар, әрқайсысына оптикалық спектрдің жартысы түседі.



а) детектор матрицасы; б) дихроилік сүзгі мен фотодиодтар жұбы

Сурет 3.4 - Сенсордың есептегіш құрылғысы

Сенсордың оптикалық қасиеттері мен көздерін таңдағанда бұл құрылғы сызықты режимде есептеу жүргізеді.

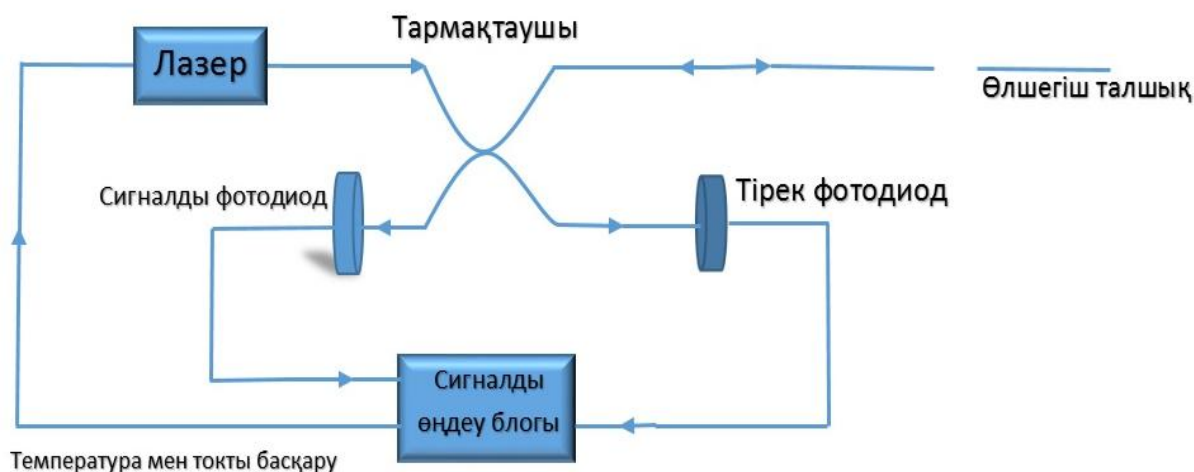
Бір модальды Фабри-Перо сенсорларында лазерлік көздер пайдаланылады, интерферометр талшықтың өзінде орналасады. Лазерлік көздер көп модальды интерферометрлік сенсорларда мүмкін болмайтын конструктивті орындауларда әртүрлі және өте ыңғайлы. 3.5-суретте бір модальды талшықта орналасатын интерферометр – температура сенсорының нұсқасы көрсетілген. Ол оптикалық талшықта жұқа шаң қабаты түріндегі айналарда орналасады немесе френель шағылысуын пайдаланылады. Rivas L.M., Carballar A., Janer C. жұмысында ішкі талшықты интерферометрде температураны өлшеу үшін Хоккер сипаттаған эффектілерді пайдаланады [66].



Сурет 3.5- Температураның талшықты сенсорының бір модальды интерферометрі

Ішкі талшықты Фабри-Перо интерферометрінің Мах-Цендердің интерферометрінен кейбір ерекшеліктері бар. Фабри-Перо интерферометріне температураға тәуелді интерферометрдің сәйкес ұзындығы қажет. Резонатор ұзындығы лазердің когерентті сәулелену ұзындығынан артық болады. Төзімділігі жоғары Фабри-Перо интерферометрлерінің сенсорларында олардың бейсызықтығы үшін арнайы есептеу әдістерін пайдаланады.

Майкельсон интерферометрі негізінде температураның жоғары тоқты өлшеу жүйелерінде бір немесе бірнеше фотоқабылдағыш құрылғыларда интерференциялық сызықтардың ығысуының әртүрлі схемалары қолданылады. Мұндай жүйелерге (сурет 3.6) қозғалтқыштар қойылуы мүмкін. Бұл өлшеу құрылғысында қызыл түсті толқын сызығындағы лазер сәулеленуі екі фотоқабылдағыш құрылғыға түседі.



Сурет 3.6- Фабри-Перо принципімен жұмыс істейтін талшықты-оптикалық өлшеу құрылғысы

3.2 Маха-Цендер және Майкельсон интерферометрі негізіндегі сенсорлар

Мұндай өлшеу құрылғыларында интерферометр негізінде аз ұзындықтағы когерентті лазерлік көздер беріледі. Lonzaga J.B., Avanesyan S.M., Карасик В.Е., Лазарев В.А. еңбектерінде кейбір жағдайларда мұндай пайдалы өлшегіштерді механикалық кернеу мен температура сияқты бір-бірімен байланысты екі параметрді бір уақытта өлшеуге мүмкіндік беретін поляризациялы арнайы талшықты жүйеге қосады [67, 68].

Интерферометр негізіндегі көп модальды талшықты-оптикалық өлшегіштердің ОТС-мен салыстырғанда сезімталдығы аз болады. Әдетте өнеркәсіп жағдайында жоғары сезімталдық талап етілмейді. Мысалы, «MetriCor» (МетриКор) шығаратын температураның көп модальды сенсоры $0,1^{\circ}\text{C}$ –ге дейін ғана болады. Он сантиметр ұзындықтағы температураның бір модальды интерферометрлік сенсоры температурасының Хокер (Hoker) мәні талшық сезімталдығы $100 \text{ рад } ^{\circ}\text{C}^{-1}\text{м}^{-1}$ -ге тең деп есептесек, онда интерферометрдің сезімталдығы 10^{-4} рад-ты құрайды.

Мах-Цендер мен Майкельсон интерферометрлері негізіндегі сенсорлар электромагниттік бөгеттер әсер етпейтін оптикалық сигнал қасиетінің арқасында сезімтал, әрі өте дәл сенсор болып табылады.

Интерферометрде жүргізілген оптикалық сигнал әртүрлі арақашықтықта өтетін екі сигналға бөлінеді. Содан кейін бұл сигналдар қосылады, бұл кезде сигналдардың салыстырмалы фазалық ығысуы мынаған тең болады:

$$\varphi = n_1(kz - n_2kz_2) \quad (3.1)$$

Егер екі жарық сигналы бір ортада таралатын болса, онда

$$\varphi = n_1k(z_1 - z_2) = nk\delta \quad (3.2)$$

(1.26) формуланы қайта жазсақ:

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

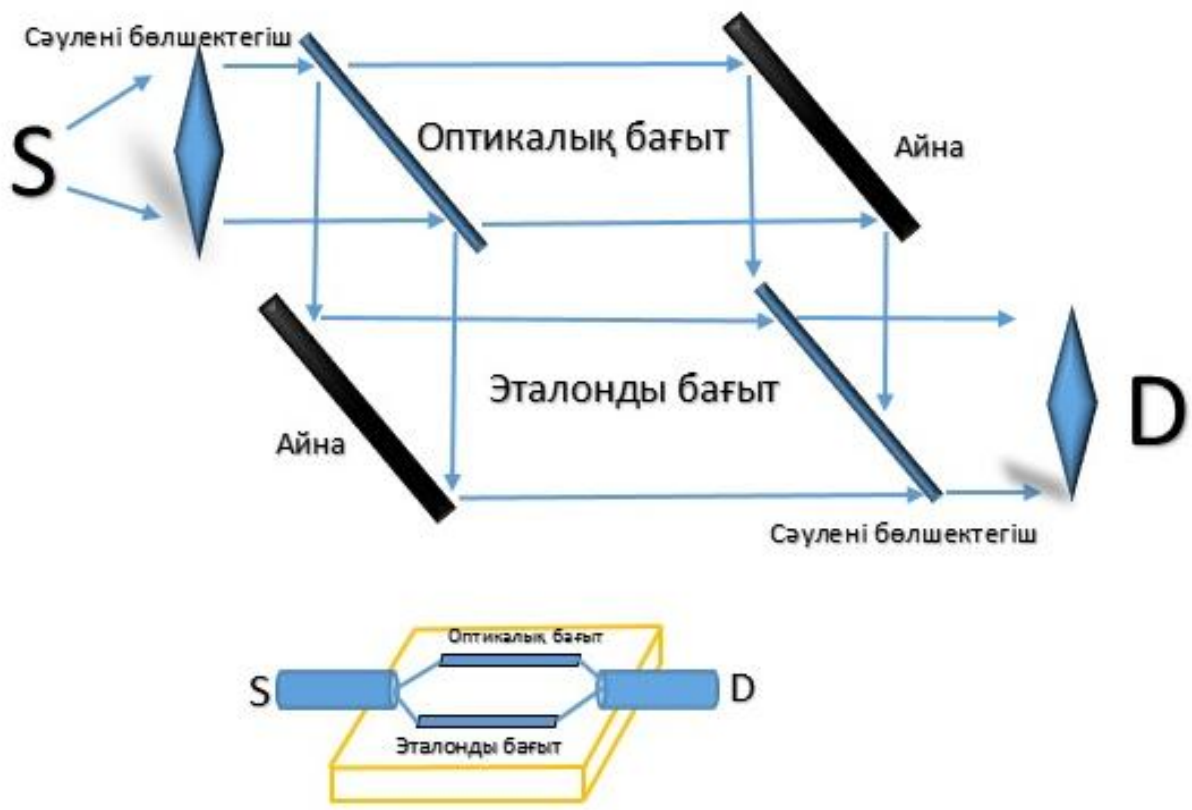
Мұндағы ndz ұзындықтың физикалық өзгерісіне сәйкес, ал zdn -сыну көрсеткішінің өзгерісіне сәйкес келеді. dz/z шамасы - талшықтың деформациясы.

(1.28) теңдеуден температураның оптикалық сигналға әсер ету теңдеуін шығаруға болады:

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

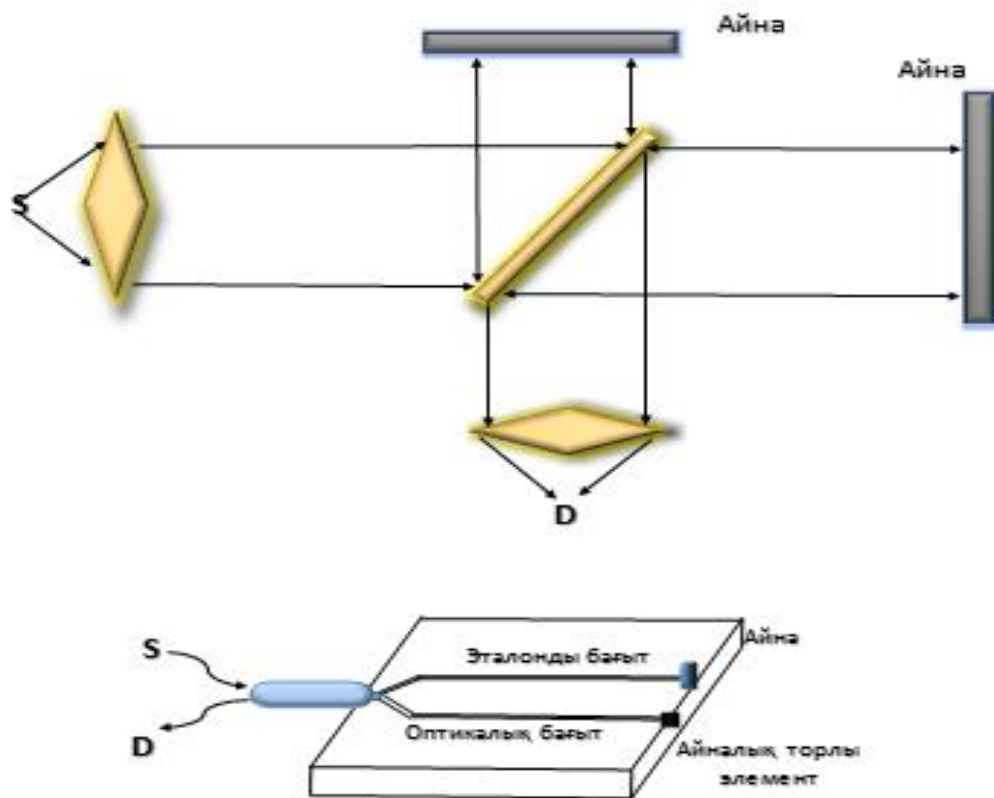
Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. жұмыстарында типтік кварцты талшық $dz/(zdT)=5\times 10^{-7} K^{-1}$ $dn/dT=10^{-5}K^{-1}$ фазаның оптикалық ығысуында $d\varphi\sim 100\text{рад}^{-1}K^{-1}$ сыну көрсеткішіне ие болады [69]. Удд Э. диаметрі 1 мм $dz/(zdT)\sim 6,5\times 10^{-7}K^{-1}$ нейлон қабатты кварцты талшықта фазаның оптикалық ығысуы оптикалық талшықта температураның өзгерісінен болады [70].

Фазалық ығысулар интерферометрдің бір-бірімен салыстырғанда жолының ұзындығының өзгеруімен байланысты температура флуктуациясынан болған сыну көрсеткіштерінің өзгерісі дәл болады. Өлшенетін параметр сәуленің оптикалық жүру жолының ұзындығының өзгерісін туындататындай болуы керек. Бұл фазалық ығысулар кез-келген типтегі интерферометр көмегімен интерференциялық әдіспен өлшенеді. Сезімтал элемент оптикалық толқын өткізгіш ретінде кейбір төсемдерде орналасады. Оптикалық-талшықты сенсорлардың көбі 3.7-суретте көрсетілген Мах-Цендер интерферометрін пайдаланады. Майкельсон интерферометрінің принциптік оптикалық схемасы 3.8-суретте көрсетілген.



Сурет 3.7 - Мах-Цендер интерферометрі (принциптік схема және интегралды-оптикалық схема)

Интерферометрлік типтегі сенсорларды құрастырушылардың мәселесі температуралық дрейф арқылы болатын оптикалық жолдардың айырмасы тұрақты және баяу өзгертін шамаларды өлшеу қиындығы болып табылады. Мұндай дрейфтің уақытша масштабы – 0,1-ден асады. Осыған сәйкес интерферометрлік сенсорлар 10 Гц-тен көп жиілікте өлшеу жүргізуде қолайлы. Екінші мәселе интерференцияның бірдей интенсивтілігінің фазалық ығысу 2π периодпен қайталанатын толқын ұзындығынан артық ұзындықтарды өлшеу. Гавричев В.Д., Дмитриев А.Л. зерттеулерінде ОТС конструкциясын бастапқы орнату мен қосымша сигналдарды өңдеу күрделі (сурет 3.8) [71].



Сурет 3.8 - Майкельсон интерферометрі (дәстүрлі және талшықты-оптикалық форма)

Қарапайым жағдайда (бір ФИС жағдайында) ФИС негізіндегі тарату талшықты-оптикалық өлшеу кешенінің әсер ету принципі 3.6-суретте көрсетілген және негізделген. Сенсордың әрбір БТ1 мен БТ2 Брэгг торы екі Брэгг толқынының бірдей ұзындығында оған импульстік лазерден келіп түсетін импульсті шағылыстырады. Бұл кезде торлар арасында орнатылған талшықта шағылысқан импульстердің арасындағы уақыт мөлшері сенсордың сезімтал элементіндегі жарықтың таралуының екі еселенген уақытына тең.

Шағылысқан импульстар қарымталаушы интерферометрге (ҚИ) келіп түседі, ол өз кезегінде әрқайсысын екі еселейді. ҚИ 2 иығымен импульстердің таралуына енгізілетін ұсталымы 1 иығына қатысты 2 иықтың шығысы мен импульсте БТ1 торынан шағылысу, 1 иық шығысы мен фаза бойынша $\varphi_0 = \pi/2$ ығысуда БТ2 торынан шағылысқан уақыт ішіндегі импульсті жабуды қамтамасыз етеді.

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

Интерференциялық импульстердің арасындағы $\varphi_0 = \pi/2$ фазасының қосымша ығысуы фоторедактордың максималды тік телімінде жұмыс жасауын қамтамасыз етеді, ал интерферлеуші импульстің қарқындылығының теңдестігі

фотокабылдағыштың шығысындағы сигналдың максималды амплитудасын алуға мүмкіндік береді.

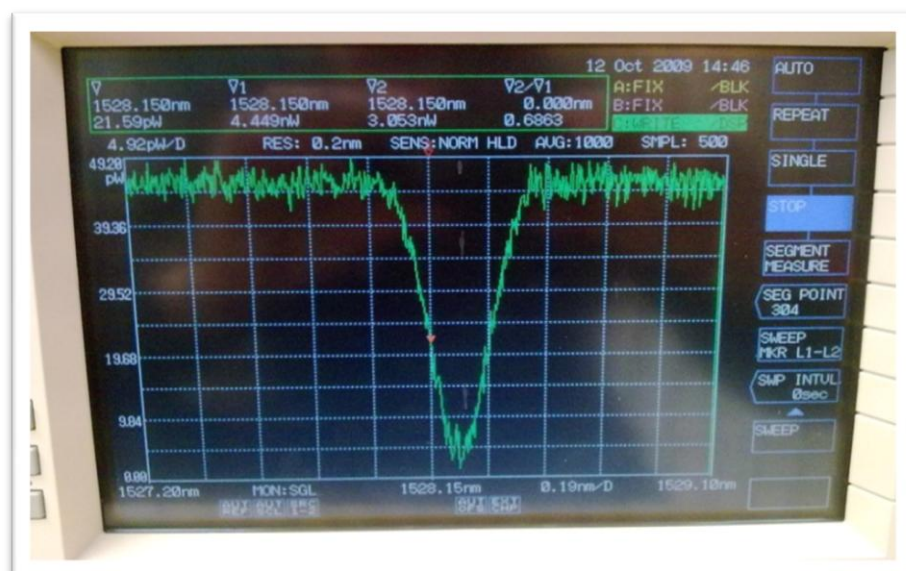
Бір талшықта массивті сенсорды құру үшін уақыттық (егер ТБТ шағылысудың бірдей толқын ұзындығына ие болса) және спектрлі тығыздалу (шағылысудың әр түрлі толқын ұзындығында жұмыс жасайтын ТБТ тұратын жеке сенсор) қолданылады.

ФИС пішіндеу үшін Брэгг талшықты торларын қолдану бір кабельде сенсордың үлкен көлемін, толқын ұзындығын мен уақыттық жүйе бойынша жеке гидрофондардың әртүрлі сигналдарын біріктіруге мүмкіндік береді.

Талшықты Брэггтік тордың толқынды резонанстық ұзындығы сыну көрсеткіші жүрекшесінің эффектілік түстілігіне және сыну көрсеткіші модуляциясының уақытына байланысты. Өз кезегінде бұл екі параметр сыртқы тербелістің және температураның деформациясына тәуелді. Fang X., He X.Y., Liao C.R., Yang M., орталық ұзындықтың толқынды көрінісі деформацияның әрекетіне байланысты және температурадағы ығысуды [72] зерттеуде көрсетілгендей жазуға болады.

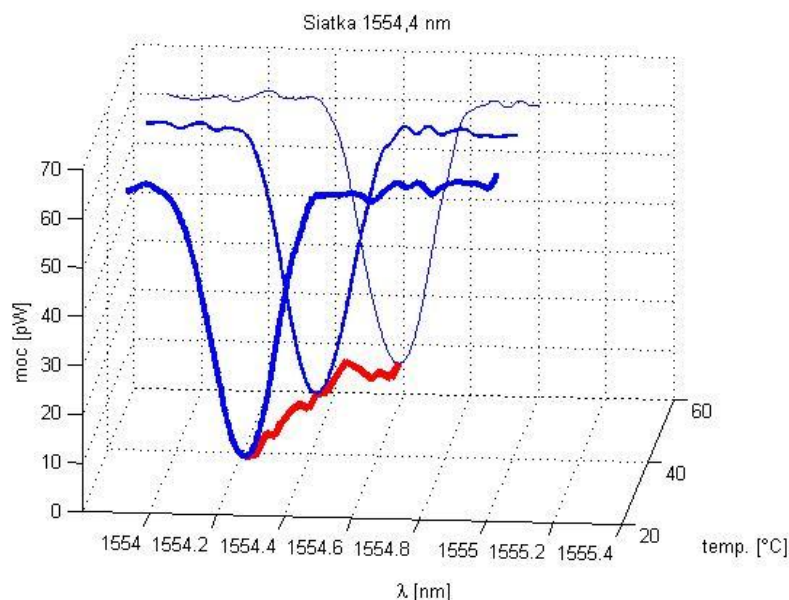
3.3 Талшықты Брэгг Торы сенсорының спектрлік сипаттамаларының температуралық тәуелділік заңдылығын анықтау

Алдыңғы тарауларда қарастырылғандай, талшықты Брэгг торының температуралық сезімталдығы Брэгг торы периодына – Λ және n_{eff} - эффективті сыну көрсеткіштері арқылы анықталады [73]. Аталған екі параметр сыртқы температуралық және қысымдық әсерлерге тәуелді. Осы тәуелділіктің негізінде талшықты Брэгг торына негізделген сенсорды зерттеу жұмыстары ұйымдастырылады. Бұл тарау зертханалық өлшеулер мен зерттеулерге арналған, зертханалық өлшеулердің мазмұнынан және алынған нәтижелерді талдаудан тұрады. Зерттеу құрылғысы талшықты Брэгг торынан өткен және кері шағылған жарықтың толқын ұзындығының температураға тәуелділігін өлшеуге арналған. Зерттеу құрылғысынан алынған толқын ұзындығымен температуралық байланыс заңдылығы анықталғаннан соң, алынған нәтижелер арқылы талшықты Брэгг торының негізгі параметрлерінің температуралық тәуелділік заңдылықтарын математикалық модельдеу арқылы кері есептеу әдісімен анықтау жұмыстары келесі тарауда жүзеге асады. Талшықты Брэгг торына негізделген сенсордың негізгі параметрлерінің температуралық тәуелдігін анықтау процесі көптеген қосымша талдау жұмыстарын ұйымдастыруды талап етеді. Себебі талшықты Брэгг торы сенсоры тек жалпылама түрде ғана екі параметрге тәуелді болады. Тәжірибелік құрылғылар арқылы өлшеулерде толқын жолы арқылы жүріп тордан өткен және кері шағылған жарықтың спектрлік сипаттамалары ғана тіркеуге алынады. Температураның бір мәнінде алынған спектрлік сипаттамалардың бірнеше мың нүктесін тіркеп, төмендегі суретте көрсетілген графикалық заңдылық алынады.



Сурет 3.9 - Белгілі бір температура үшін тордан өткен жарықтың спектрлік сипаттамасы

3.9-суреттегідей спектрлік сипаттаманы компьютерлік өңдеу арқылы осы функцияның экстремум нүктесін бір температура үшін толқын ұзындығының бір мәні ретінде тіркеп алуға болады. Аталған процесті температураның барлық нүктелері үшін қайталау арқылы толқын ұзындығы мен температура арасындағы түзу сызықты заңдылықты анықтауға болады (сурет 3.10).



Сурет 3.10 - Тордан өткен жарықтың спектрлік сипаттамасындағы максимум нүктелерінің температураға тәуелділік графигі

Келесі тарауда қарастырылатын Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру жұмысында 3.10-суреттегі графиктен алынған мәліметтер бойынша сенсордың негізгі параметрлерінің температураға байланысын анықтау

жұмыстары ұйымдастырылады. Pioter Kisala, Wojcic W., Smailov N., Зертханалық жұмыстардағы мәліметтер мен модельден алынған мәліметтер арасындағы байланыс арқылы құрастырылған модельдің сенсор туралы қаншалықты шынайы параметрлер беретіндігін анықтауға болады [74].

Тәжірибелік жұмыста оптикалық талшық бойына алдын-ала белгілі бір параметрлері белгіленген Брэгг торы жазылған сенсордың температуралық тәуелділік заңдылығын анықтау үшін өлшеу жүргіземіз. Өлшеулер жүргізуге қажетті құралдар: Брэгг торы сенсоры, жарық көзі, термометр, Брэгг торынан шағылысқан және тордан өткен сәулелердің спектрлік сипатамаларын тіркейтін анализатор-осциллографтар, камера-зонд, қыздырушы элементтер – ыстық ауа үрлегіш немесе автоматты түрде реттелетін электр қыздырғышы. Төмендегідей техникалық параметрлері берілген кіріс сигналы ретінде қарапайым жарық көздері мен қуат көздері қолданылды:

Толқын ұзындықтары 400 нм – 1800 нм және 1530.8 нм - 1567.6 нм;

Қуат деңгейі:

- 45дБм кем емес (50/125 μ m ММФ ұзындығы 2 м талшық үшін, толқын ұзындықтары 830нм және 1310нм, өткізу қабілеттілігі 10 нм);

- 60 дБм кем емес (10/125 μ m SMF ұзындығы 2 м талшық үшін, толқын ұзындықтары 1550 нм, өткізу жолағы 10 нм);

- 60d дБм кем емес (50/125 μ m ММФ ұзындығы 2 м талшық үшін, толқын ұзындықтары 400 нм және 1100 нм);

- 70 дБм кем емес (10/125 μ m SMF ұзындығы 2 м талшық үшін, толқын ұзындықтары 700 нм және 1700 нм);

Қуатты реттеу деңгейі – $\pm 0,05$ dB

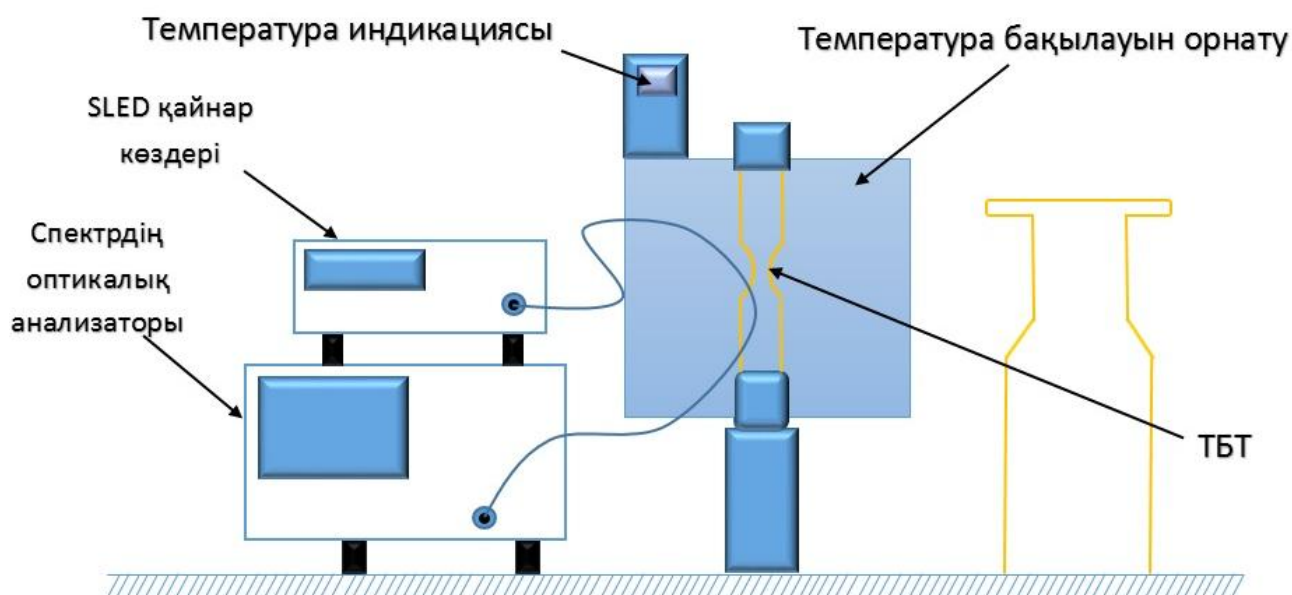
Шамдар: галогенді шамдар

Қоршаған орта жағдайлары:

Жұмыс температурасы бір камерада +18 және +140 °С, екінші камерада +5 до +40 ° С.

Салыстырмалы ылғалдылық 70% аспайды.

Анализаторлар жарық жолдың екі шетіне де жалғанды. Орта бойда Брэгг торы орналасқан камераның бірнеше түрлері пайдаланылды, солардың біреуінде 2.5-2.7 –суреттерінде көрсетілген зонд қолданылды. Бұл зонд сыртқы қабаты және ішкі Брэгг торы мен термометр орналасқан орта металл шариктерімен толтырылғандықтан, 200-300⁰С үлкен температуралық диапазондарда өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беретіндігімен ерекшеленеді. Зондтағы температура автоматты түрде реттелетін электрлік қыздырғыш арқылы қамтамасыз етіледі. Температуралық диапазоны едәуір үлкен диапазонды қажет етпеген жағдайда камераны қарапайым қатты қағаз немесе пластмассалық қораптармен ұйымдастырып, температураны ыстық ауа үрлегіштермен қамтамасыз етуге болады. Барлық жағдайларда температураның өзгеру шамалары автономды температуралық сенсорлармен өлшеніп, тіркеліп отырады (3.11 суреттер).



Сурет 3.11 – Зерттеу құрылғысының жалпы сұлбасы

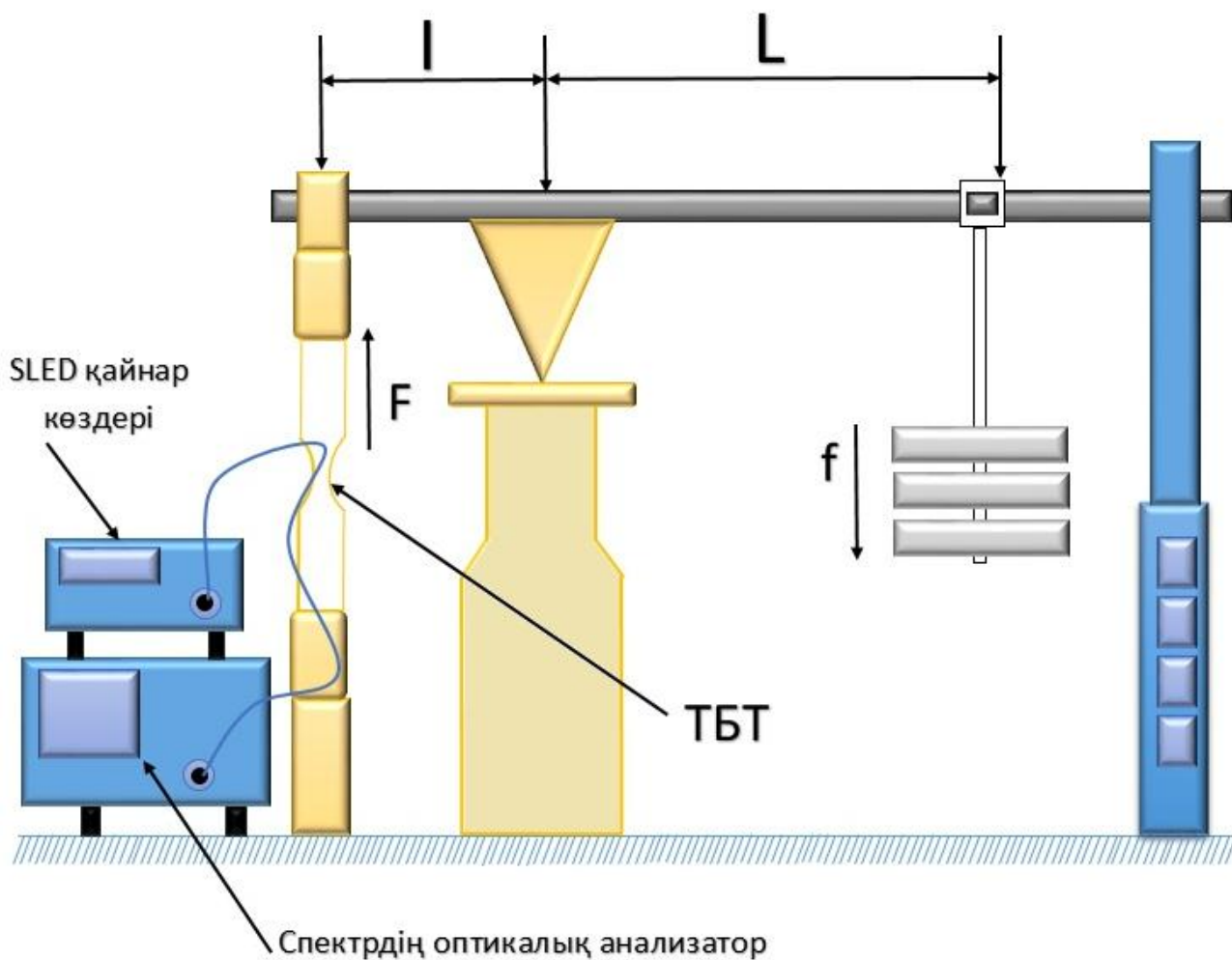
Алайда температуралық өзгерістерді автономды түрде басқа сенсормен өлшеу жүргізгендіктен, зерттеу жұмыстарының шынайылығы осы температуралық сенсордың қаншалықты дұрыс температуралық мәліметтерді беруіне тікелей тәуелді. Сондықтан, бұл термометрдің температуралық калибрлеуі алдын-ала тексеріледі. Сонымен қатар, егер температуралық диапазон үлкен болмаса, өлшеу процестері Брэгг торы орналасқан камераның қаншалықты герметикалық толық жабық болуына тәуелді болып, жылу энергиясының сыртқа қашуы сияқты қателіктердің өлшеу жұмыстарына кедергі болмауын қамтамасыз етеді. Зондты пайдаланып, төменгі температуралық диапазондардағы өлшеулерді сұйық азоттың көмегімен қамтамасыз ету арқылы жүргізуге болады. Зондты пайдалану температураны 0°C -ден -150°C -ге дейін төмендету және -150°C -ден 0°C -ге дейін жоғарылату барысында өлшеулерді жекелей жүргізуге мүмкіндік береді.

Анализаторда Брэгг торынан өткен немесе кері шағылған жарықтың спектрлік сипаттамалары температураның бір мәні үшін алынады. Сондықтан, осы спектрлік шамаларды алу кезінде температураның сол нүктеде тұрақты болуы шарт. Әр нүкте үшін температураның мәнін 0.5°C -ге артып отыру арқылы бір сенсор үшін кемінде жиырма немесе отыз нүктедегі спектрлік сипаттамаларды алу қажет. Тордың жалпы ұзындығы – L , тордың периоды – Λ , эффективті сыну көрсеткіші – n_{eff} , сәйкесінше тордағы периодтардың саны – $x = \frac{L}{\Lambda}$, тордың аподизациялық коэффициенті – α , сыну көрсеткіші модуляциясының орташа мәні – $\overline{\delta n_{eff}}$, сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы – n , және басқа да сыртқы әсерлердің ерекшелігінен туындайтын шамалардың барлығын ескере отырып, олардың алғашқы мәндерін белгілеп, сенсор құрастырылады. Зертханалық жағдайларда оның негізгі қасиеттері зерттеліп, пайдаланушының талаптарына сәйкес келмесе, онда математикалық модель арқылы жоғарыда аталған параметрлердің мәндерін белгілі бір

диапазондар арасында өзгерту арқылы жаңа сенсордың моделі құрастырылады. Математикалық модель ұсынған жаңа параметрлер арқылы сенсордың жаңа түрі жазылып шығады. Осы процес екі-үш қадамнан соң пайдаланушының талаптарына сәйкес келетін сенсор құрастырса, онда таңдап алынған математикалық модель дұрыс деп еспетеуге болады (3.12, 3.13 суреттер).

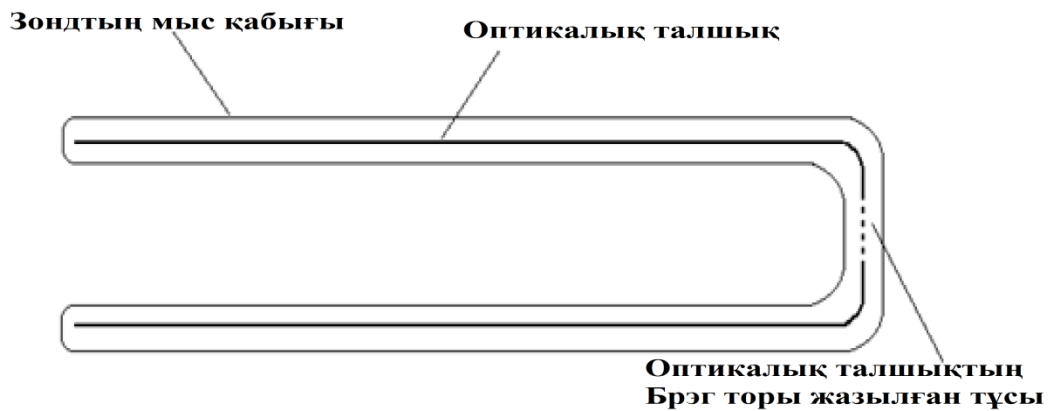


Сурет 3.12 - Брэгг торы сенсорының параметрлерін өлшеу станді



Сурет 3.13 – Толық Брэгг торы сенсорының параметрлерін өлшеу станді

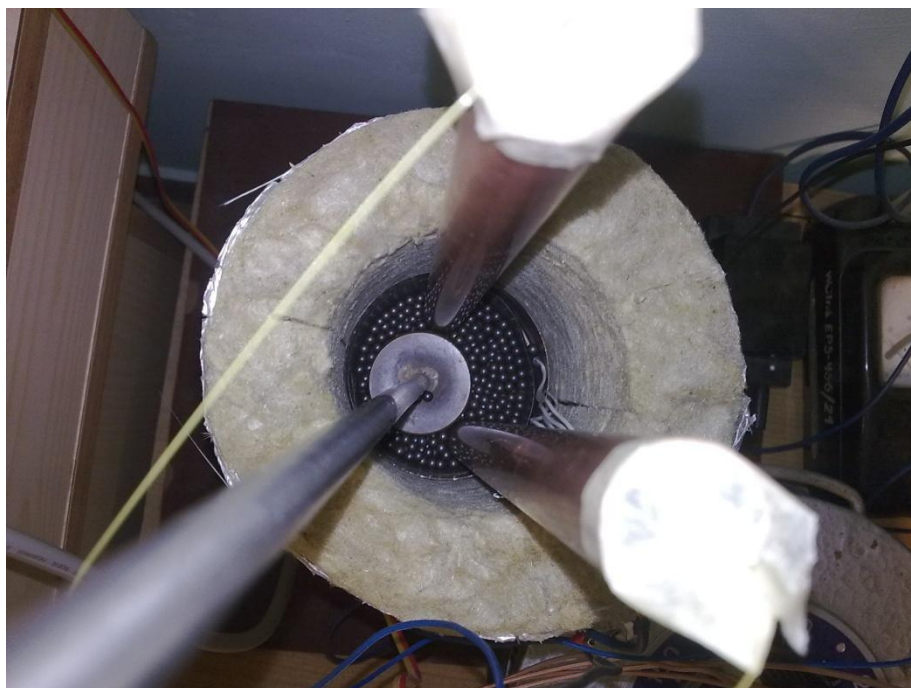
Зерттеу жұмысына арналған зонд түрінде жасалған камераның жылу тасымалдық қасиеті жақсы болуы үшін оны металдан жасап, Брэгг торы орналасқан тұсында тордан тұратын талшық еркін орналастырылып, ешқандай қысым сияқты сыртқы әсердің болмауы қамтамасыз етілді. Сонымен қатар, талшықты зонд трубасының ортасында орналасуын қамтамасыз ету үшін трубаның іші метал шариктермен толтырылып, нәтижесінде Брэгг торы зонд қабырғасына тимей еркін орналастырылды (сурет 3.14).



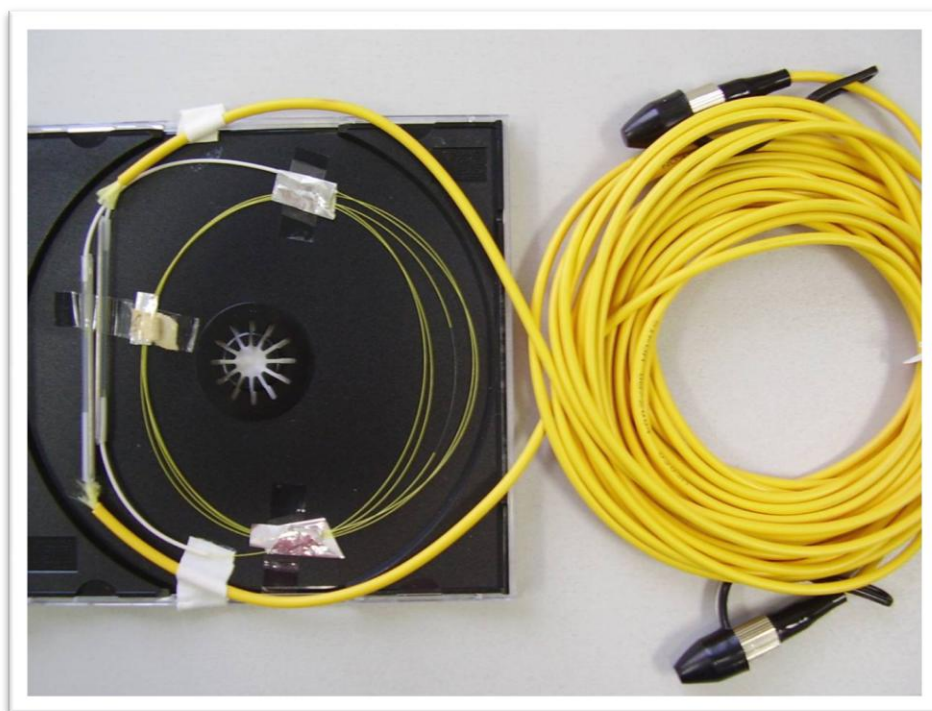
Сурет 3.14 - Брэгг торы орналасқан зондтың көлденең қимасы



Сурет 3.15- Брэгг торы орналасқан зондтың салыстырмалы бейнесі



Сурет 3.16 - Өлшеулер жүргізу кезіндегі Брэгг торы орналасқан зонд



Сурет 3.17- Брэгг торының еркін камерасыз тұрғандағы талшықтармен байланысы

Тәжірибелік жұмыста Брэгг торына негізделген сенсорлардың бірнеше түрлерінің спектрлік сипаттамалары алынды. Спектрлік сипаттамаларды алу үшін сәуле көзі ретінде бірнеше ақ жарықты галогенді шамдар қолданылды, себебі әрбір галогенді шамның сәуле шығару диапазоны әртүрлі. Әрбір сәуле

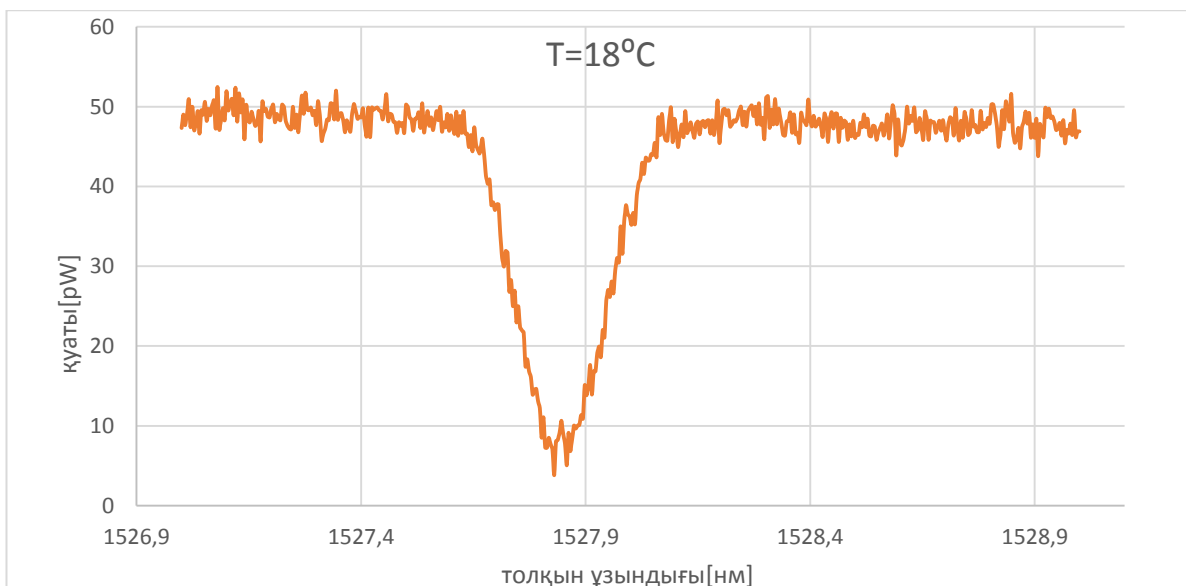
көзі мен өткізу терезесі деп аталатын диапазондарға сәйкес келетін (850 нм, 1310 нм, 1550 нм) диапазондарда температуралық тәуелділік сипаттамалары алынды. Бірнеше ондаған өлшеулердің ішіндегі ең үздік шыққан өлшеулер нәтижелерінің мәндері сенсорды математикалық модельді құрастыру үшін қолдануға бағытталды. Тәжірибелік жұмыстың мұндай ауқымдылығын әрбір сенсор әртүрлі температуралық диапазондарға әртүрлі нәтижелер беруімен, сонымен қатар, таңдалып алынған талшықтың химиялық қасиеттеріне байланысты жарық диапазондарына тәуелді болуымен байланысты қолданушыға қажетті сенсордың қажетті температуралық диапазондарға дәл келетін толқын ұзындығының өзгеру диапазонын таңдап алу қиындығы шешілмеген. Әрбір сенсор үшін жеке зертханалық өлшеулер мен математикалық есептеулер қажет. Демек әмбебап математикалық модель құру мүмкін болмағандықтан, әрбір қолданушыға қажетті сенсор үшін математикалық модель құрастыру керек.

Wojcik W., Жунусов К.Х., Смайлов Н.К., Утепбергенов И.Т., Оразымбетова А.К. жүргізген тәжірибелік жұмыстардың нәтижесінде + 18⁰С-ден 135⁰С-ге дейін температуралық диапазонда әр қадамы 5⁰С болған өлшеулердің спектрлік сипаттамалары үздік шыққандықтан, осы нәтижені математикалық модель құрауға пайдаланылды. Алынған нәтижелердің негізінде 3.1-кестесі мен сол кестедегі мәліметтердің негізінде 3.9-суретте көрсетілген Брэгг торынан өткен немесе кері шағылған жарықтың толқын ұзындығының температуралық тәуелділік графигі құрастырылды. Зерттеудің негізгі мақсатының бірі:

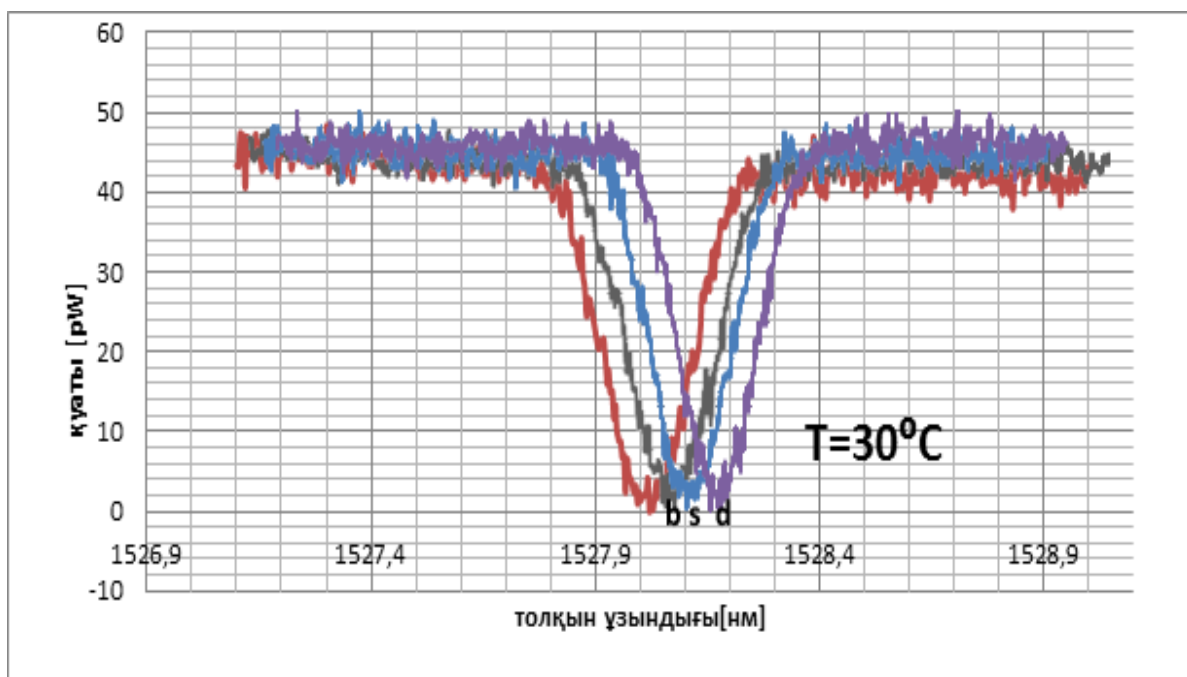
$$K_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} , \quad (3.5)$$

алынған түзудің қисықтық бұрышы коэффициенті 0,01075нм/1⁰С-ге тең. Зерттеудің беріктілігі: әрбір температуралық нүктедегі мәліметтің тұрақтылығы 14,2 сағ /К-ге тең [75-76].

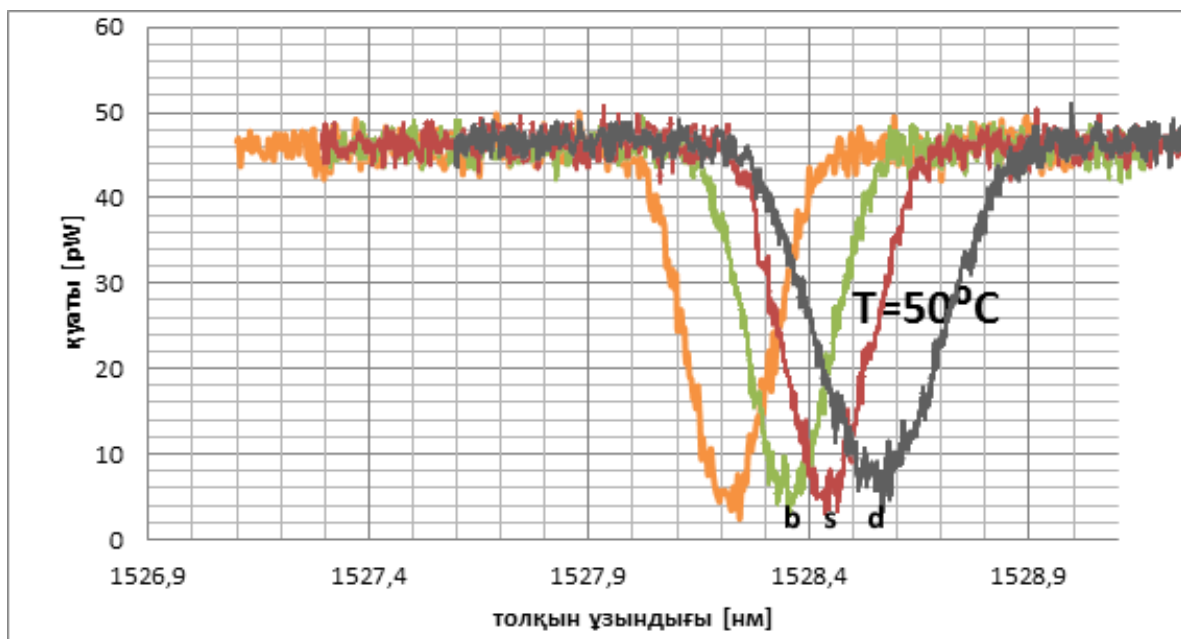
18 градус және 135-градус аралығында зерттеу жұмыстарының нәтижелері төмендегі суреттерде көрсетілген (сурет 3.18)



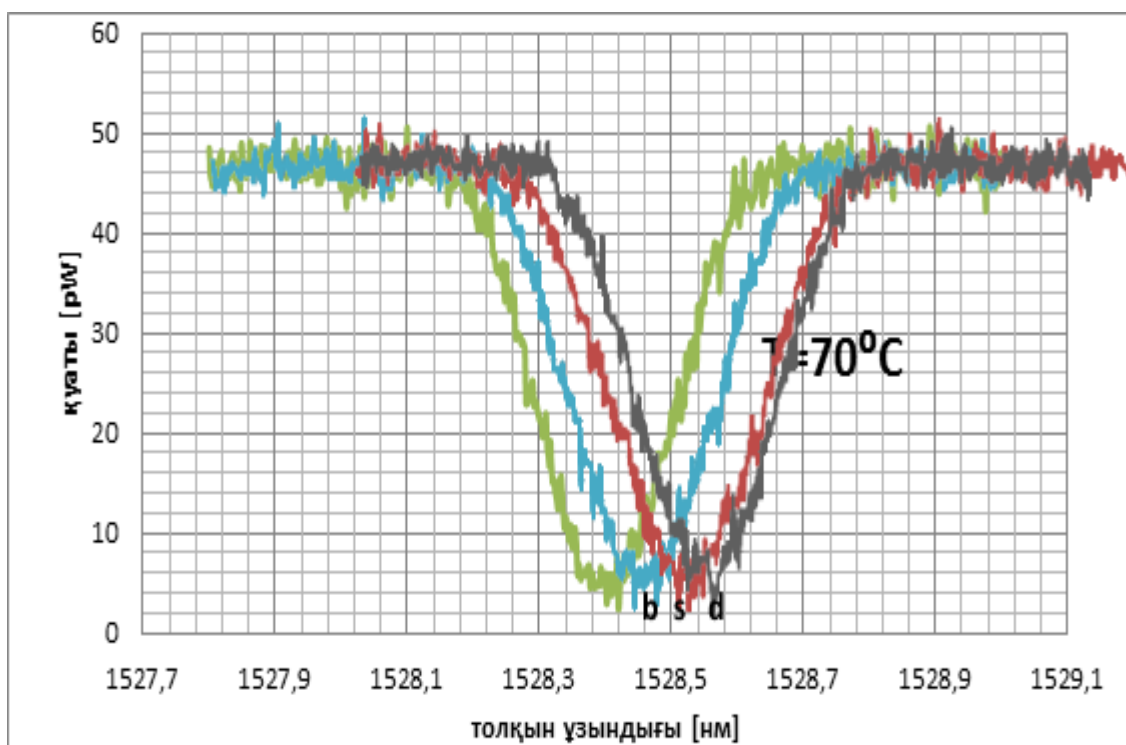
Сурет 3.18 – 18 градуста температураның өзгеруі



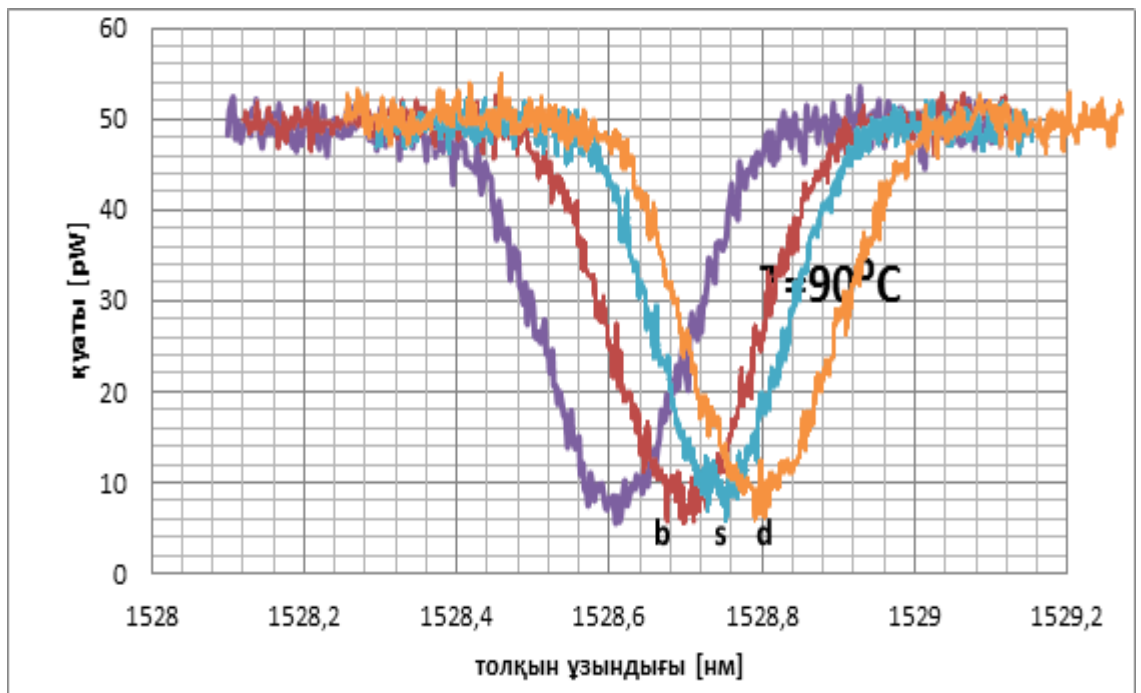
Сурет 3.19 – 30, 35,40,45 градустардағы температураның өзгеруі:
қызыл түспен белгіленген - 30° , b- 35° , s- 40° , d- 45°



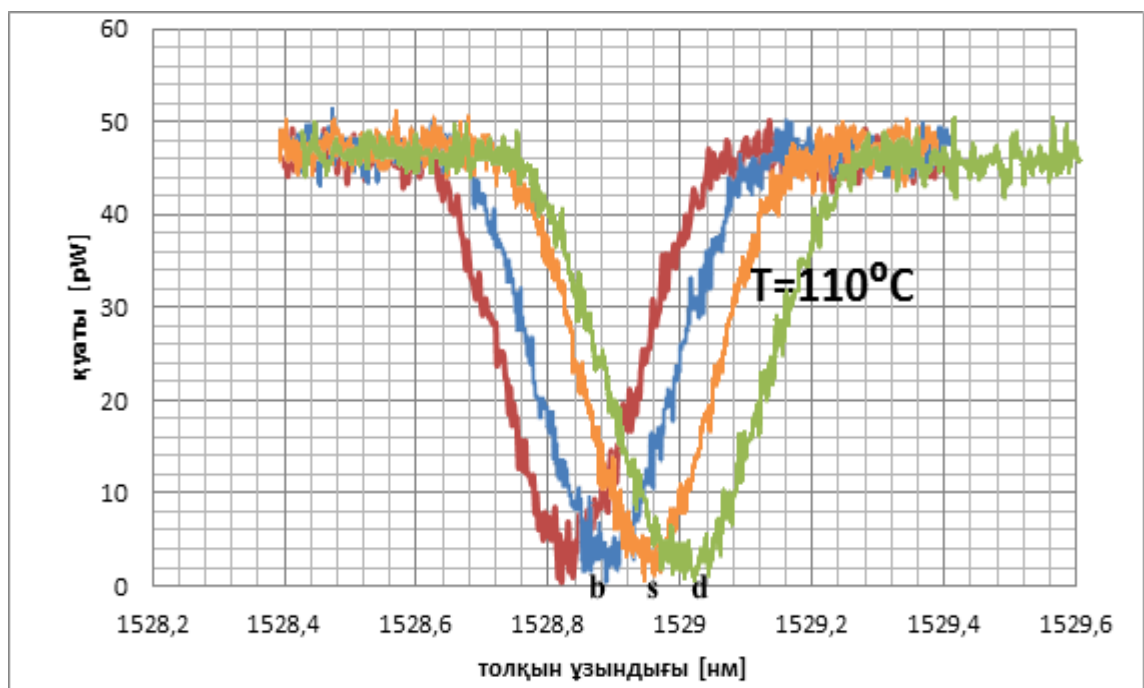
Сурет 3.20 – 50, 55, 60,65 градустардағы температураның өзгеруі:
сары түспен белгіленген - 50⁰, b-55⁰, s-60⁰, d-65⁰



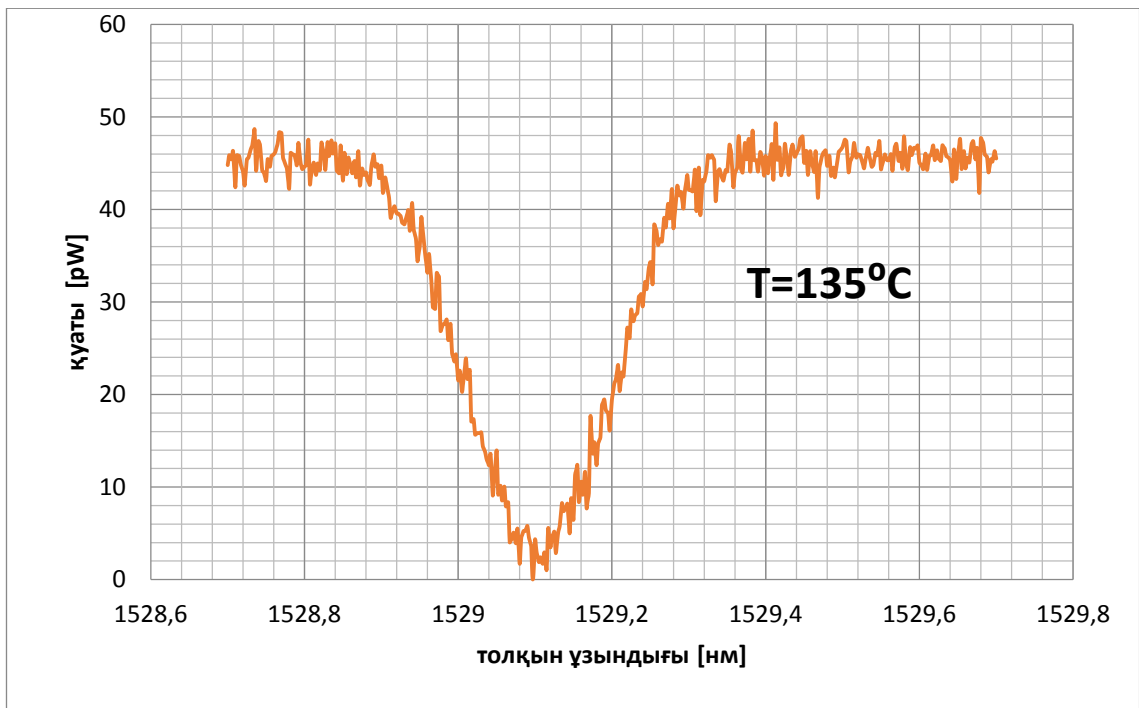
Сурет 3.21 - 70, 75,80,85 градустардағы температураның өзгеруі:
жасыл түспен белгіленген -70⁰, b-75⁰, s-80⁰, d-85⁰



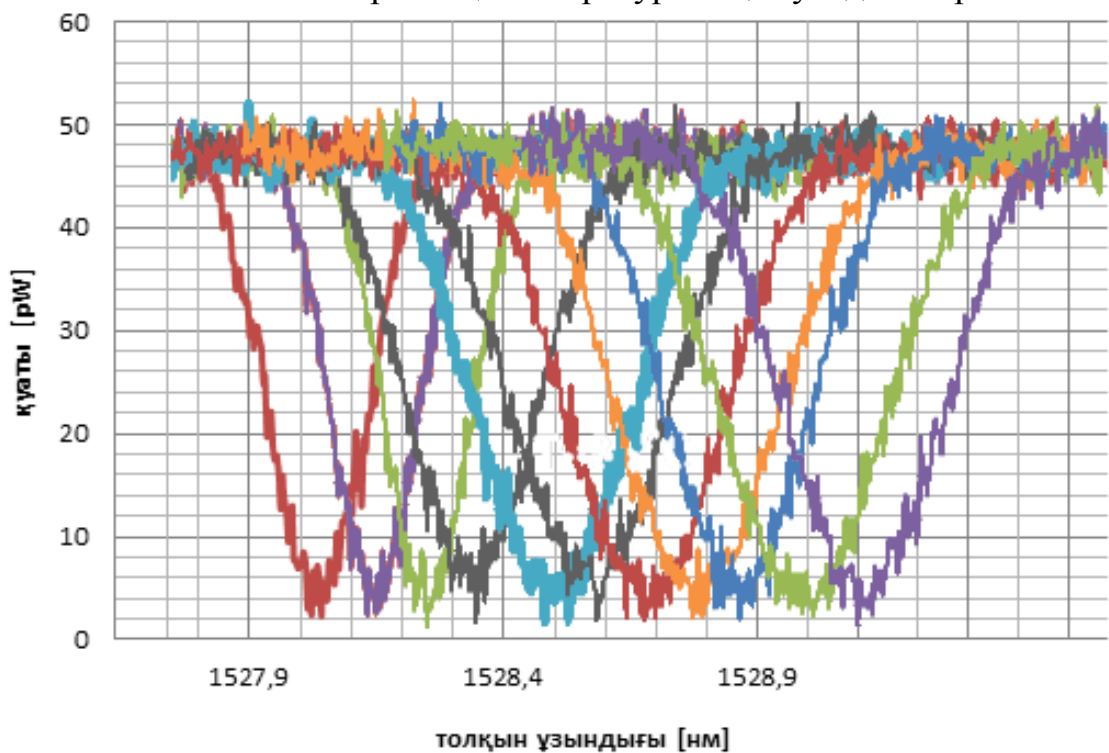
Сурет 3.22 - 90, 95, 100, 105 градустардағы температураның өзгеруі:
күлгін түспен белгіленген - 90⁰, b-95⁰, s-100⁰, d-105⁰



Сурет 3.23 - 110, 115, 120, 125 градустардағы температураның өзгеруі:
күлгін түспен белгіленген - 110⁰, b-115⁰, s-120⁰, d-125⁰



Сурет 3.24 – Брэгг торынан өткен сәулелердің спектрлік сипаттамаларының температуралық тәуелділіктері



Сурет 3.25 - 35⁰ бастап 135⁰ дейін әрбір 10⁰градус аралығында алынған спектрлік сипаттамалардың температуралық тәуелділігі

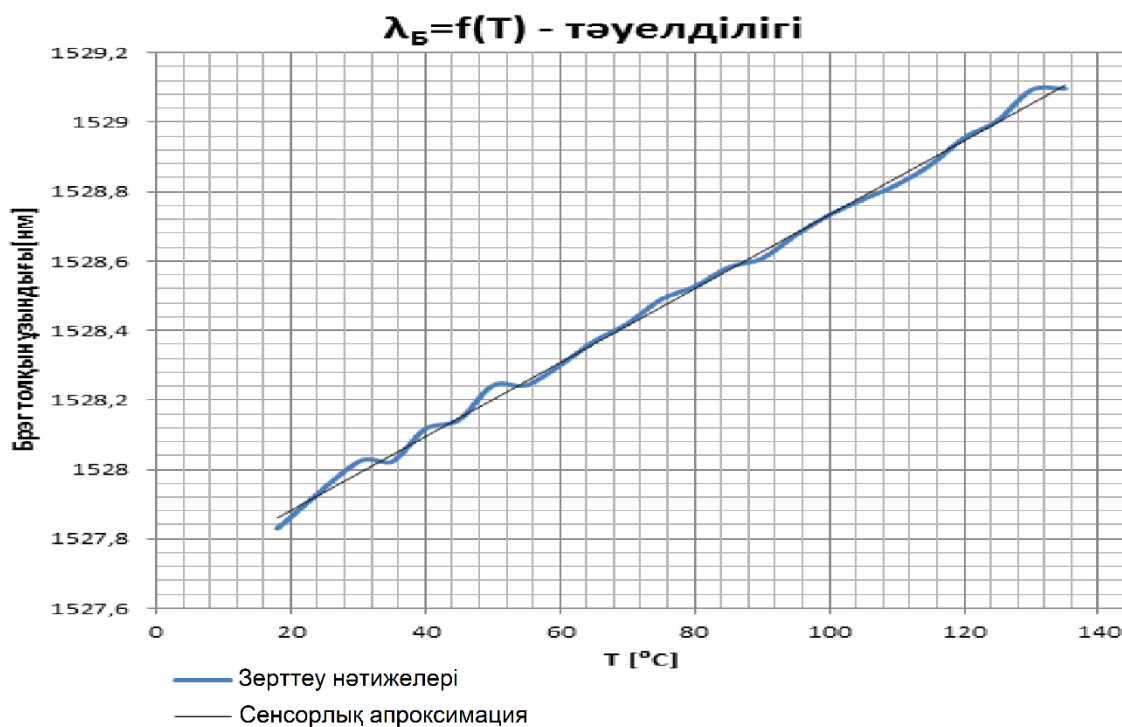
Кесте 3.1 - Толқын ұзындығы мен температура арасындағы байланыс

λ_B [нм]	T [°C]
------------------	--------

1	2
1527,830	18
1528,022	30
1528,022	35
1528,117	40
1528,143	45
1528,242	50
1528,243	55
1528,300	60
1528,369	65
1528,420	70
1528,490	75
1528,527	80
1528,582	85
1528,608	90
1528,675	95

3.1 – кестенің жалғасы

1	2
1528,733	100
1528,778	105
1528,820	110
1528,877	115
1528,955	120
1529,005	125
1529,093	130
1529,097	135



Сурет 3.26 - Кестенің негізінде жасалған график

3.26-суреттегі графиктің негізінде тандап алынған температуралық диапазон үшін Брэгг торын сенсор ретінде толық пайдалануға болатындығын атауға болады. Алынған нәтижелерді пайдалана отырып, осы сенсордың негізгі параметрлері - тордың жалпы ұзындығы – L , тордың периоды – Λ , эффективті сыну көрсеткіші – n_{eff} , сәйкесінше тордағы периодтардың саны – $x = \frac{L}{\Lambda}$, тордың аподизациялық коэффициенті – α , сыну көрсеткіші модуляциясының орташа мәні – $\overline{\delta n_{eff}}$, сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы – n және басқа да сыртқы әсерлердің ерекшелігінен туындайтын шамалардың температураға тәуелділігін анықтайтын математикалық модель құрастырылады. Mykhailo M.K., Yosyp Y.R., Vitalii Y.I. жұмыстарында осы аталған параметрлердің ішінде екеуі негізгі параметр деп саналып, қалғандарының температуралық әсері елеусіз немесе өте аз деп есептеліп, келесі тарауда $\Lambda = f(T)$ және $n_{eff} = f(T)$ тәуелділік функциясы анықталады [77].

Үшінші бөлім бойынша тұжырымдамалар

Үшінші бөлімде Брэгг торының температуралық сезімталдығы Брэгг торы периодына – Λ және n_{eff} - эффективті сыну көрсеткіштері арқылы анықталған. Осы екі параметр де сыртқы температуралық және қысымдық әсерлерге тәуелді. Осы тәуелділіктің негізінде талшықты Брэгг торына негізделген сенсорды зерттеу жұмыстары ұйымдастырылды.

Алынған нәтижелерді пайдалана отырып, осы сенсордың негізгі параметрлері - тордың жалпы ұзындығы – L , тордың периоды – Λ , эффективті сыну көрсеткіші – n_{eff} , сәйкесінше тордағы периодтардың саны – $x = \frac{L}{\Lambda}$, тордың аподизациялық коэффициенті – α , сыну көрсеткіші модуляциясының

орташа мәні – $\overline{\delta n_{eff}}$, сыну көрсеткіші модуляциясының амплитудасы – n және басқа да сыртқы әсерлердің ерекшелігінен туындайтын шамалардың температураға тәуелділігін анықтайтын математикалық модель құрастырылды. Зерттеулер нәтижесінде аталған параметрлердің екеуі негізгі параметр деп саналып, қалғандарының температуралық әсері елеусіз немесе өте аз деп есептеліп, $\Lambda = f(T)$ және $n_{eff} = f(T)$ тәуелділік функциясы анықталды.

Сонымен қатар, берілген бөлім бойынша негізгі тұжырымдамалар Scopus базасына енген «Jet Intl jurnal of electronics and telecommunications» халықаралық ғылыми журналында [74], «Magyar Tudomanyos Journal (Budapest, Hungary). The journal is registered and published in Hungary» халықаралық ғылыми журналында [81] және Сәтбаев оқулары «Білім және ғылым тәжірибие» атты II халықаралық конференциясында, «XXI ғасырдағы Ғылымның дамуы» атты Харьков қаласы конференциясында, «Есептеу технологиясы» Эль-Фараби атындағы ҚазҰУ Хабаршысы. Математика, механика және информатика сериясында баяндалып жарияланды [75-80].

4 ТӘЖІРИБЕЛІК ЖҰМЫСТАРДАН АЛЫНҒАН НӘТИЖЕЛЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН БРЭГГ ТОРЫ СЕНСОРЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРАСТЫРУ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК ТАЛДАУ ЖАСАУ

4.1 Математикалық модельдің негізінде тәжірбелік нәтижелерді компьютерлік бағдарламада тексеру

Брэгг торына негізделген сенсордың негізгі мақсаты – кіріс электромагниттік толқыннан шашыраған және тордан өткен импульстың максимум мәндері сыртқы температуралық әсерге байланысты өзінің мәндерін түзу сызықты заңдылықпен өзгертуі тиіс:

$$\lambda_B = K_T * T + b \quad (4.1)$$

Утепбергенов И.Т., Оспанова Н.А., Смайлов Н.К. зертханалық өлшеулерден алынған 3.9-суретте көрсетілген графиктегі мәндерді қолданып, (3.1) теңдеудегі K_T және b мәндерін анықтау үшін ең төменгі орташа квадраттық қателік әдісін пайдалануға болады [78].

4.2 Тәжірибелік өлшеулердің нәтижесін бағалау

Егер кез-келген өлшеулердің нәтижесінде $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ әрбір функцияның мәніне $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ аргументтердің мәндері сәйкес келетін жиынтық алатын болсақ, зерттеу нәтижелеріндегі (4.1) мәндерімен барынша ұқсас келетін теңдеу түрін анықтау үшін зерттеу нәтижелерінде алынған түзуді эталон ретінде қабылдап, модельдің құраған мәндері арасындағы қателіктердің ең кіші орташа квадраттық қашықтығын δ_i деп белгілесек, онда

$$\delta_i = y_i - ax_i - b \quad (4.2)$$

Мәні кеміген сайын зерттеу нәтижесі мен модель арасындағы сәйкестік жоғарылайды. Осы сәйкестіктің мейлінше дәл болуын анықтау үшін

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (4.3)$$

орташа қателіктердің квадраттарының қосындысын алу қажет.

(5.1) теңдеуі мейлінше тік болуы үшін (5.3) квадраттар қосындысының ең кіші мәнін анықтау қажет. (5.2) және (5.3) теңдеулерден

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 = 0 \quad (4.4)$$

мәнінің минимум болу шарттары төмендегідей болады:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)x_i = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0 \quad (4.6)$$

(5.5) және (5.6) теңдеулерін түрлендірейік:

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + nb \quad (4.8)$$

4.3 Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру

(4.7) және (4.8) теңдеулері арқылы (4.1) теңдеудегі коэффициенттерді зерттеуден алынған графикпен салыстыра отырып, оңай анықтауға болады. Алынған $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ мәндерінің әрбіреуіне $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \dots, \Lambda_n$ мәндері мен

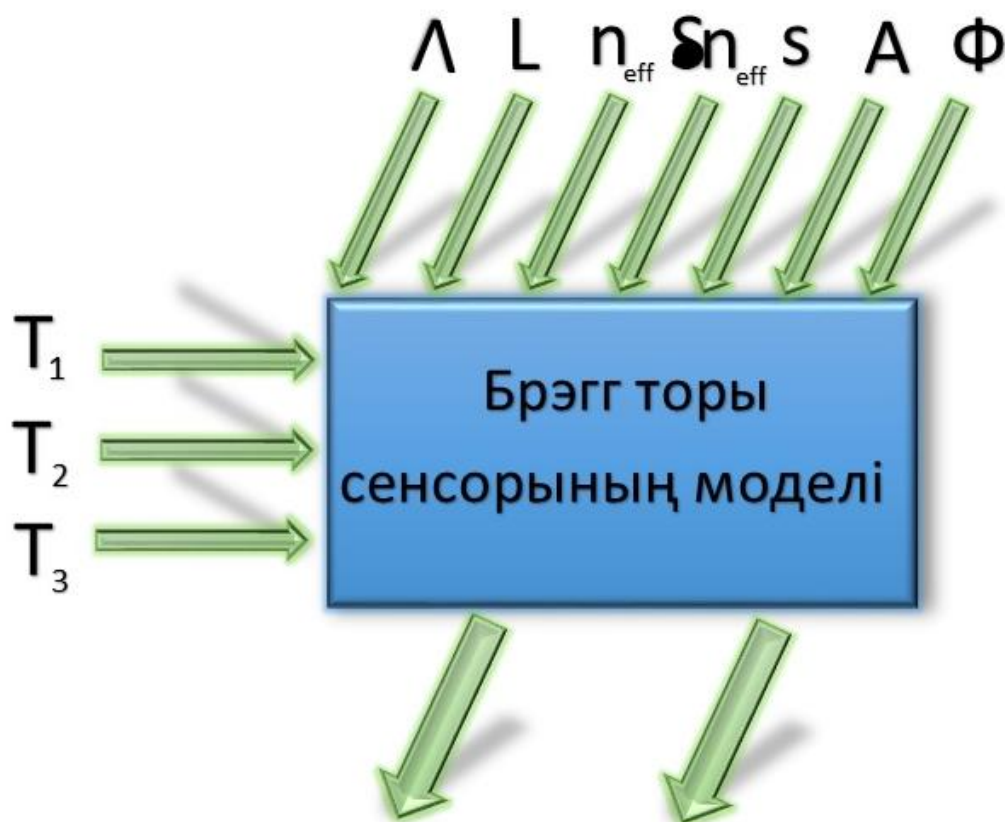
$n_{eff_1}, n_{eff_2}, n_{eff_3}, \dots, n_{eff_n}$ мәндері сәйкес келіп, $n_{eff} = f(T)$ және $\Lambda = f(T)$ заңдылықтарын табуға мүмкіндік аламыз. Себебі: шағылған және тордан өткен электромагниттік сәуленің толқын ұзындығы λ_B тордың эффективті сыну көрсеткіші мен тордың периодына тәуелді өзгереді:

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (4.9)$$

Аталған екі параметрлердің басқа қандай да бір параметрлерге тәуелді болатындығы жоғарыда аталған ғылыми жұмыстарда кеңінен талқыланған. Құрастырылатын Брэгг торы моделінің негізгі мақсаты Брэгг торы сенсорын құрастырушылар мен сенсорды қолданушылар арасындағы байланыс орнату болып табылады. Сондықтан, моделді құрастыру үшін сенсорды құрастырушылар арасындағы негізгі параметрлердің мәндерін анықтау керек:

- эффективті сыну көрсеткіші;
- тордың периоды;
- тордың ұзындығы;
- аподизациялық коэффициент;
- тағы да басқа кіріс параметрлері.

Сонымен қатар, модельді құрастыру кезінде қолданушыға қажетті температуралық диапазон мәндері керек (сурет 4.1)



Сурет 4.1- Брэгг торы сенсорының моделінде лямда мен температура байланысын түзу

Брэгг торы сенсорының негізгі математикалық концепциалды моделін құрастыру үшін ғылыми жұмыстарда (2) формуладағы толқын ұзындығына тәуелді екі параметрдің температураға қатысты өзгеріс заңдылығын тікелей анықтау мақсатында мынадай дифференциалды теңдеу ұсынылады:

$$\frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) + \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (4.10)$$

Жұмыстың негізгі мақсаты осы теңдеудің оң жағындағы екі мүшенің өзгеріс заңдылығын анықтау болып табылады:

$$n_{eff} = f(T) \quad (4.11)$$

$$\Lambda = f(T) \quad (4.12)$$

Функциялардың аналитикалық түрі осыған дейінгі ғылыми жұмыстарда қарастырылмағандықтан, олардың арасындағы байланысты төмендегідей заңдылықта болуы мүмкін деген болжамдар негізінде моделді құрастыру жұмыстары басталады:

$$n_{eff} = C_1 * T^\alpha \quad (4.13)$$

$$\Lambda = C_2 * T^\beta \quad (4.14)$$

Аталған заңдылықтарды анықтау үшін торға енген сәулелер мен кері шағылған сәулелердің өзара әсерлесу заңдылықтарын ескеру қажет.

Модельді құрастыру үшін алғышарттарды төмендегідей мәндермен қабылдаймыз:

$$\Lambda_{min} = 0.521 \text{ мкм}, \Lambda_i = 0.1 * 10^{-4} \text{ мкм}, \Lambda_{max} = 0.547 \text{ мкм}$$

$$n_{eff_{min}} = 1.375, n_{eff_i} = 0.0005, n_{eff_{max}} = 1.475$$

$$\lambda_0 = 1528 \text{ нм}, L = 1 \text{ см}, \overline{\delta n} = 0.0001$$

$$\lambda_{min} = 1500 \text{ нм}, \lambda_i = 0.01 * \text{нм}, \lambda_{max} = 1550.5 \text{ нм}$$

(5.13) және (5.14) теңдеуіндегі C_1 , C_2 , α және β мәндерін анықтау үшін

$$\ln(n_{eff}) = \ln(C_1) + \alpha * \ln(T) \quad (4.15)$$

$$\ln(\Lambda) = \ln(C_2) + \beta * \ln(T) \quad (4.16)$$

логарифмдік масштабқа өтіп, теңдеуді тағы да түзу түріне келтіреміз:

$$Y = A + B * X$$

Екінші рет қайталап және ең кіші квадраттар әдісін қолданып, А және В мәндерін анықтаймыз. Нәтижесінде ғылыми жұмыстың негізгі мақсаттары болып табылатын тәуелділіктерді анықтау мүмкіндігі туындайды.

Егер тордың бойымен жүрген электромагниттік толқынның әсерінен тордың бойындағы сыну көрсеткішінің модуляциясы төмендегідей өрнектермен анықталады деп есептесек,

$$\left\{ \nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y, z) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} E(x, y, z) = 0 \quad (4.17)$$

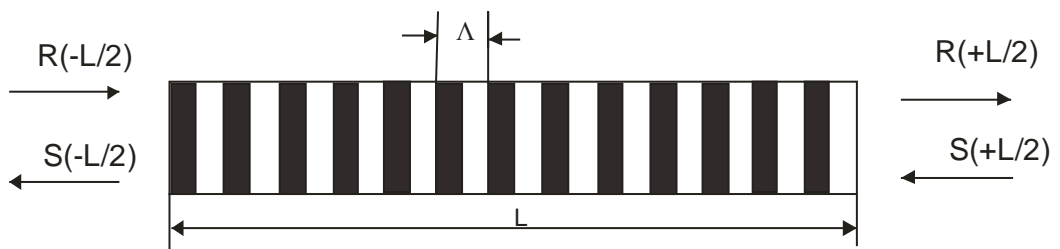
мұндағы ∇_t^2 - Лапласиан операторы болса, онда сыну көрсеткішінің тор бойындағы өзгерісі мынадай болады:

$$n^2 = \bar{n}^2(x, y) + \overline{\delta n}_{eff} \left\{ 1 + \exp \left(-\alpha \left(z + \frac{L}{2} \right)^2 \right) \right\} * \cos \left[\frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi(z) \right] \quad (4.18)$$

ал k - коэффициенті келесі түрде анықталады:

$$k = \frac{\frac{\bar{k}v}{2n_{eff}} \int_{A_\infty} (n^2 + \bar{n}^2) E_1 E_2 dA}{\int_{A_\infty} E_1^2 dA} \quad (4.19)$$

$$E(x, y, z) = R(z)E_1(x, y) \exp(-i\beta z) + S(z)E_2(x, y) \exp(i\beta z) \quad (4.20)$$



Сурет 4.2 –Торға кірген сәуле – R(-L/2), тордан шыққан сәуле – R(+L/2), тордан кейінгі шағылысудан қайтқан сәуле – S(+L/2) және тордың өзінен тікелей шағылған стокс сәулесінің – S(-L/2) өзара әсерлесуі

Waldemar Wojcik., Жунисов К.Х., Смайлов Н.К. зерттеулерінде 4.2 – суреттегі сұлбада көрсетілгендей торға енген сәуленің интенсивтілік мәні – R(-L/2), тордан шыққан сәуле – R(+L/2), тордан кейінгі шағылысудан қайтқан сәуле – S(+L/2) және тордың өзінен тікелей шағылған стокс сәулесі – S(-L/2)

өзара әсерлеседі. Осы әсерлесудің нәтижесінде негізгі енген сәуле – $R(z)$ және шағылысқан $S(z)$ сәулелерінің тордың бойы z өсі бойымен өзгеруінің дифференциалдық теңдеуін қарастырған ғылыми жұмыстарға [79] сүйене отырып, байланысқан модалар әдісін алуға болады:

$$\frac{dR(z)}{dz} = i\sigma(z)R(z) + ik(z)S(z) \quad (4.21)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} = -i\sigma(z)S(z) - ik(z)R(z), \quad (4.22)$$

мұндағы

$$R(z) = A(z)\exp[i(\delta z - \varphi/2)] \quad (4.23)$$

$$S(z) = B(z)\exp[-i(\delta z + \varphi/2)]. \quad (4.24)$$

$$\sigma = 2\pi n_{eff} \left\{ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right\} + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} - \frac{\phi}{2} \quad (4.25)$$

σ - жоғарыда қарастырылған сыну көрсеткішінің өзгеріс заңдылығындағы сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеру коэффициенті,

k - кері шағылу коэффициенті.

(4.13) теңдеуіндегі теріс таңба тордың негізгі сәуле бағытына қарама-қарсы бағытталған сәулелердің бағытын білдіреді. Сонымен қатар, $\frac{d\phi}{dt} = 0$ – торлардың өзгеру жиілігі нөлге тең болса (чирп болмаса), онда (4.25) теңдеуіндегі үшінші мүшені ескермеуге болады және (5.19) теңдеуінің нәтижесі рентінде қарастыралатын

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \nu \delta \overline{n_{eff}} \quad (4.26)$$

(4.25) және (4.26) коэффициенттері тұрақты болады. (4.12) және (4.13) дифференциалдық теңдеуін шешу үшін, яғни Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру үшін кіріс және шағылған сәулелердің толқын ұзындығы максимум мәндерін анықтау мақсатында бірнеше әдістер қолданылған. (4.3) теңдеуін шешу үшін [80] ғылыми жұмыстарында Рунге-Кутта әдістері қолданса, [81] ғылыми жұмысында матрицалық әдістерді қолданған.

Аталған әдістерді қолдану себебі: кіріс параметрлер мен аргументтердің арасындағы байланыс аналитикалық теңдеумен анықталмаған. Сондықтан, матрицалық әдісті және тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерді қолданып, Matlab бағдарламалық платформасында Брэгг торы сенсорының моделі құрастырылды:

$$A^-(z) = \frac{-ik \sinh[\gamma_B(z-L/2)]}{i\sigma \sinh(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh(\gamma_B L)}, \quad (4.26)$$

$$A^+(z) = \frac{\gamma_B \cosh[\gamma_B(z-L/2)] - i\sigma \sinh[\gamma_B(z-L/2)]}{i\sigma \sinh(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh(\gamma_B L)}, \quad (4.27)$$

мұндағы

$$\gamma_B = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \sigma^2}, & k^2 > \sigma^2 \text{ үшін,} \\ \sqrt{\sigma^2 - k^2}, & k^2 < \sigma^2 \text{ үшін.} \end{cases} \quad (4.28)$$

Тордың ішінде екі бағытта шағылыстыру коэффициенттері:

$$r(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\sigma^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (4.29)$$

$$t(\lambda) = \frac{\gamma_B^2}{\sigma^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (4.30)$$

Жоғарыдағы коэффициенттерді қолданып матрица элементтерін анықтауға болады. Ол үшін тәжірибелік жұмыстардан алынған нәтижелерді негізге ала отырып, сонымен қатар, матрицалық әдісті қолданып, тәжірибелік зерттеулердің нәтижелерінен Брэгг торы сенсорының кіріс параметрлерінің мәндерін пайдаланып, тордың бойынан өткен кіріс және шығыс сигналдардың амплитудалық мәндерін нақты құрылғылармен анықтауға болады. Алынған нәтижелердің температуралық байланысын төмендегідей матрицалық әдіс арқылы өрнектеуге болады:

$$\begin{bmatrix} R(-L) \\ S(-L) \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} R(+L) \\ S(+L) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Шектік жағдайларда температураның мәндерін өрнектейік:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ S(-L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(+L) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Бұл өрнек торға оң жақтан келген шағылысу сәулесін ескермей, торға енетін кіріс сигналдың мәніне нормалау кезінде температураның бірнеше мәндері сәйкес келетіндігін көрсетеді. Осындай есепті жеңілдету кезінде кіріс сигналдың мәніне сәйкес келетін алғашқы температураның мәніне кері пропорционал

$$R(+L) = \frac{1}{M_{11}} \quad (4.33)$$

ал қалған мәндерін алғашқы мәнді нормалау арқылы температуралық заңдылықты кері байланыстыру арқылы анықтаймыз:

$$S(-L) = \frac{M_{21}}{M_{11}} \quad (4.34)$$

Жалпы кіріс сигналдар мен шығыс сигналдардың температураның барлық мәндеріне сәйкес келу матрицасы төмендегідей түрге келеді:

$$\begin{bmatrix} R(-L) \\ S(-L) \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} R(+L) \\ S(+L) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

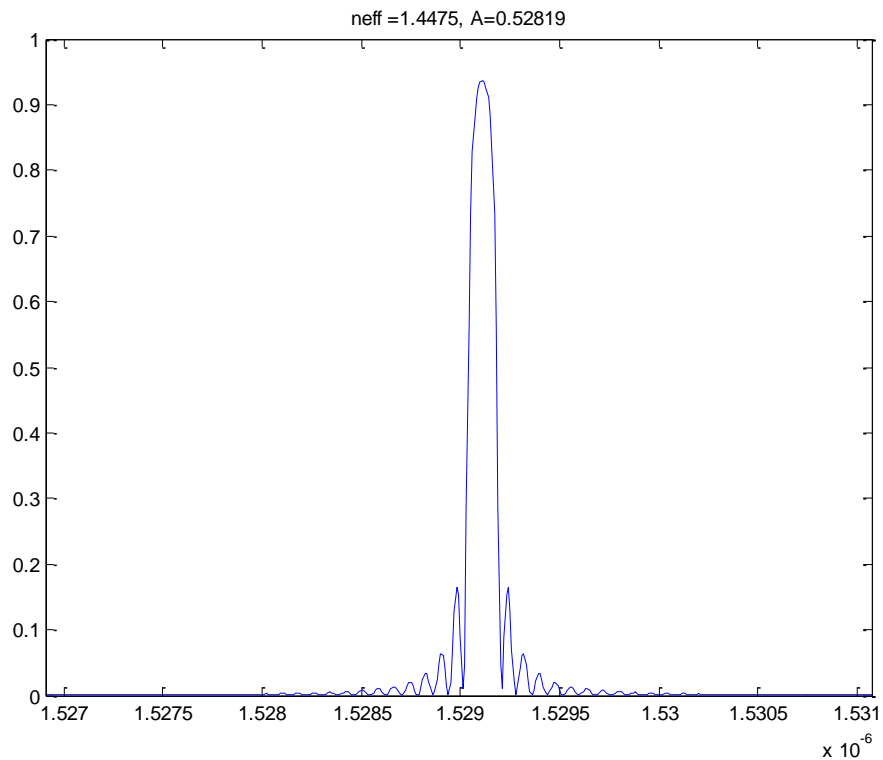
мұндағы температура:

$$[M] = \prod_{j=1}^N [M^j] \quad (4.36)$$

Сонымен (4.12) және (4.13) дифференциалдық теңдеуді шешу нәтижесінде төмендегі суретте көрсетілген кері шағылған сигналдың нақты толқын ұзындыққа сәйкес келетін энергиясының мәні анықталды. Бұл суреттегі толқын ұзындығы мәні сырттан әсер еткен температураның нақты бір мәніне сәйкес келеді. (4.28) мен (4.29) мәндерін қолдансақ, матрицаның нақты түрін мына өрнекпен анықтауға болады:

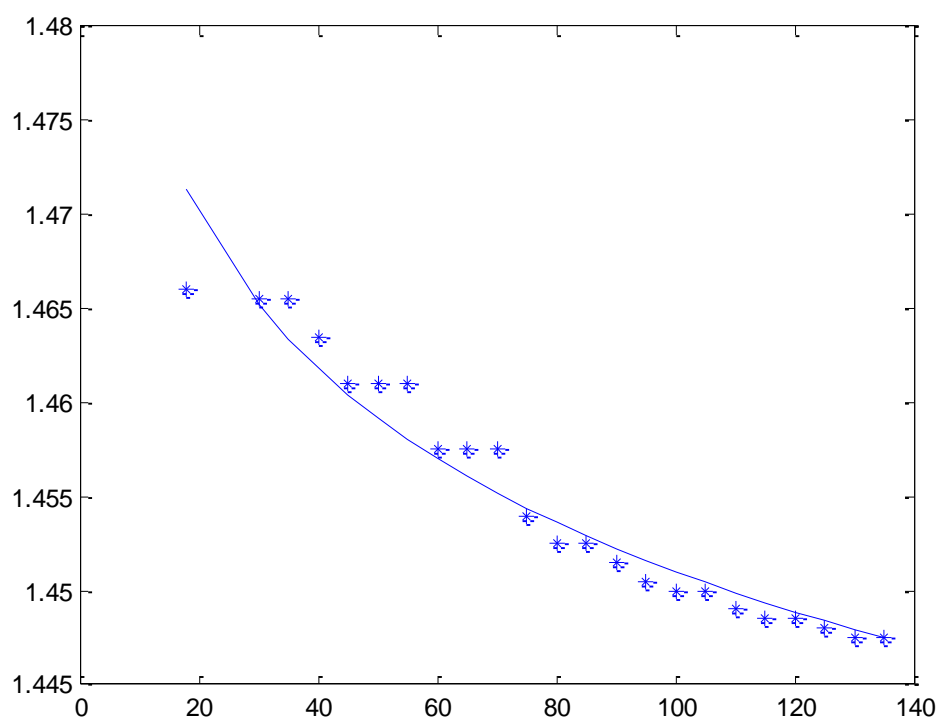
$$M_i = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\sigma}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\sigma}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

(4.26)-(4.30) және (4.37) теңдеулерінің нәтижесі 4.3-суретте көрсетілген толқын ұзындығының кері шағылған спектрлік сипаттамасын береді.



Сурет 4.3 - Брэгг торы моделі

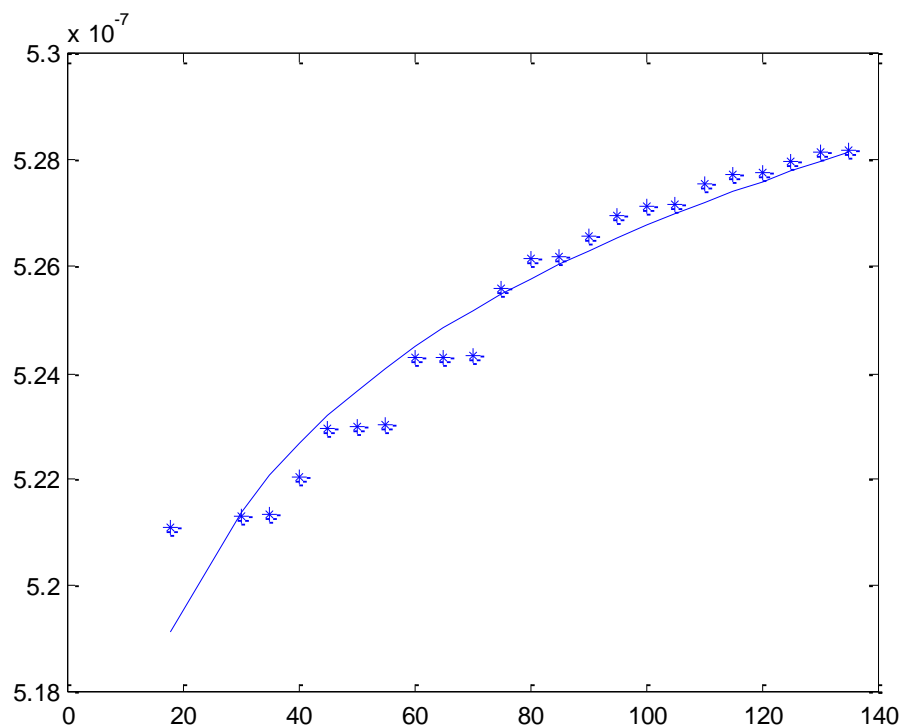
Кіріс параметрлердің кейбіреулерін тұрақты етіп, нақты температураға сәйкес келетін толқын ұзындығы мәнін анықтау нәтижесінде Брэгг торы моделі құрылды. Тұрақты параметрлер қатарына: n_{eff} – эффективті сыну көрсеткіші мәндерін, Λ – тордың периодты мәндерін, тәжірибедегі әрбір температурадағы өзгеріс мәндерін кері есептеулер арқылы алып, осы екі параметрдің температураға тәуелділік графигі алынды. (сурет 4.4)



Сурет 4.4 - Брэгг торы моделінен алынған эффективті сыну көрсеткіші мен температура арасындағы тәуелділік

Эффективті сыну көрсеткішінің температураға тәуелділік графигінен олардың арасындағы байланыс теріс дәрежелік заңдылықта кемитіндігі байқалады (сурет 4.5).

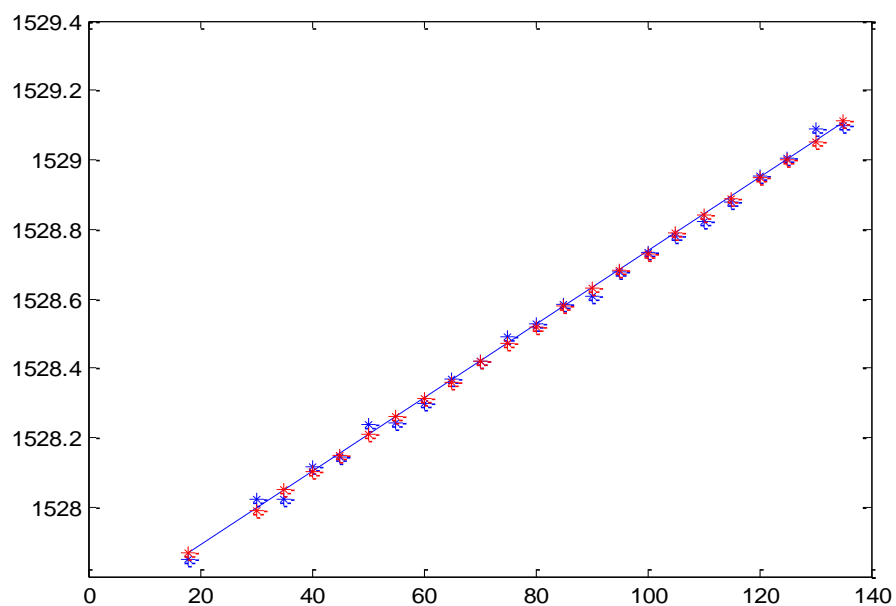
$$n_{eff} = a * T^{-\alpha} \quad (4.38)$$



Сурет 4.5 - Брэгг торы моделінен алынған Брэгг торы периоды мен температура арасындағы тәуелділік

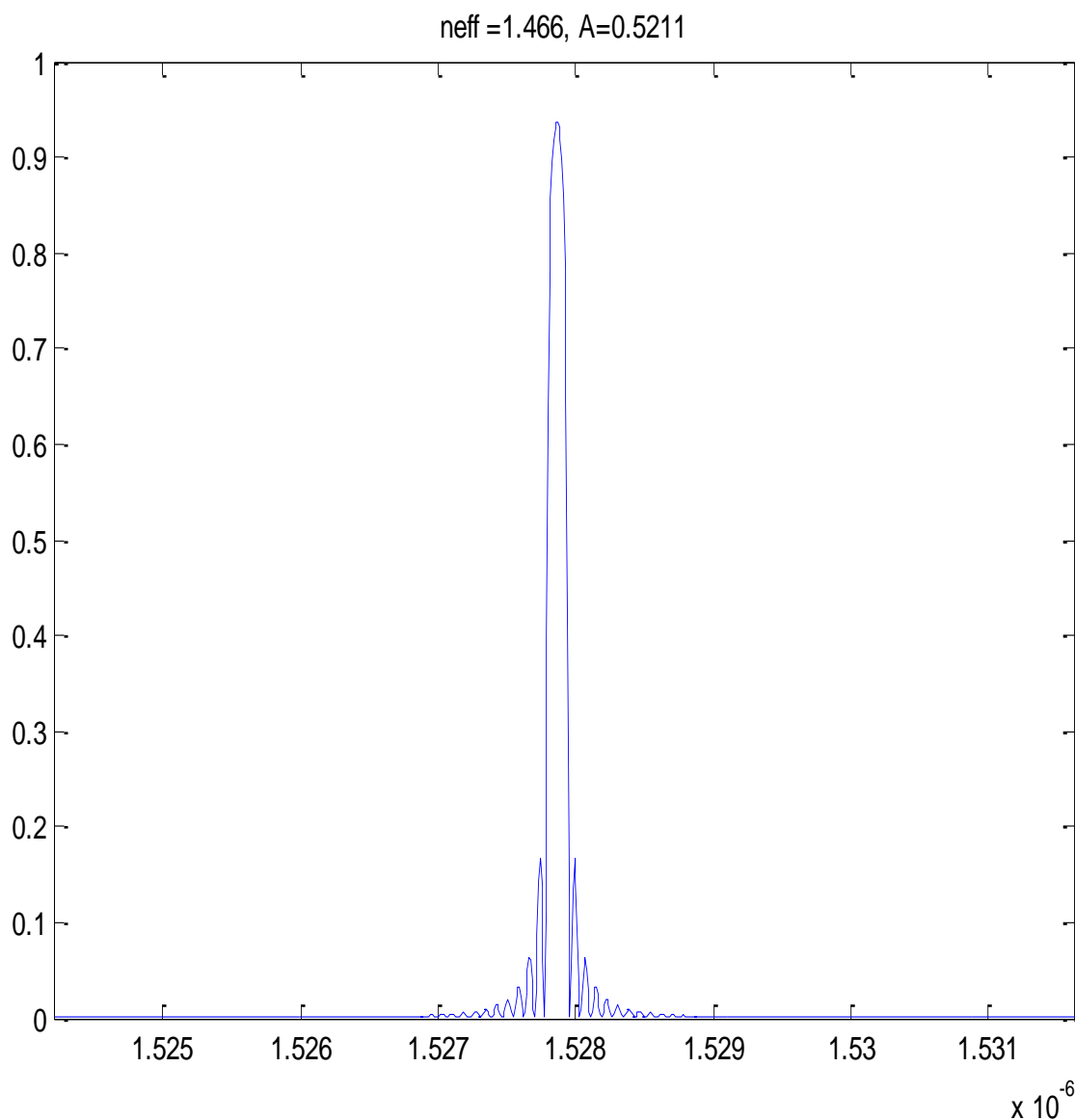
Ал тордың периоды мен температура арасындағы байланыс керісінше экспоненциалды артатындығы анықталды (сурет 4.6)

$$\Lambda = b * T^{\beta} \quad (4.39)$$

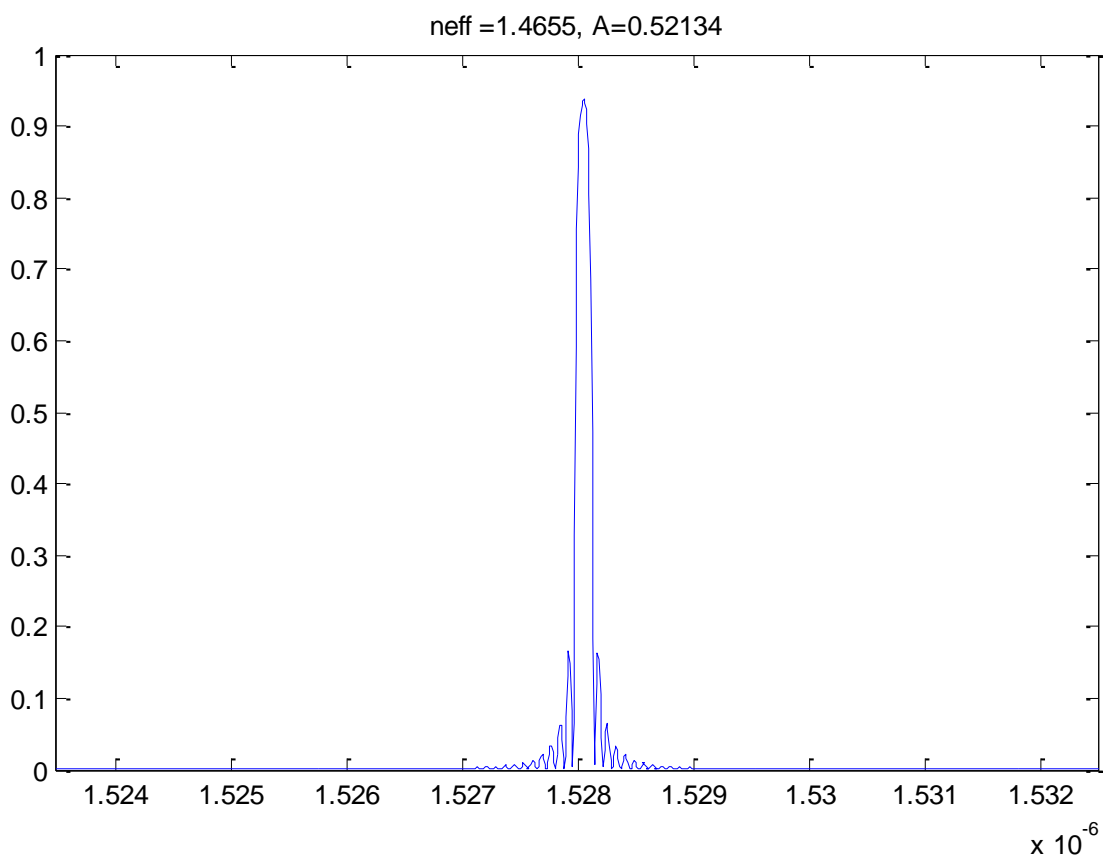
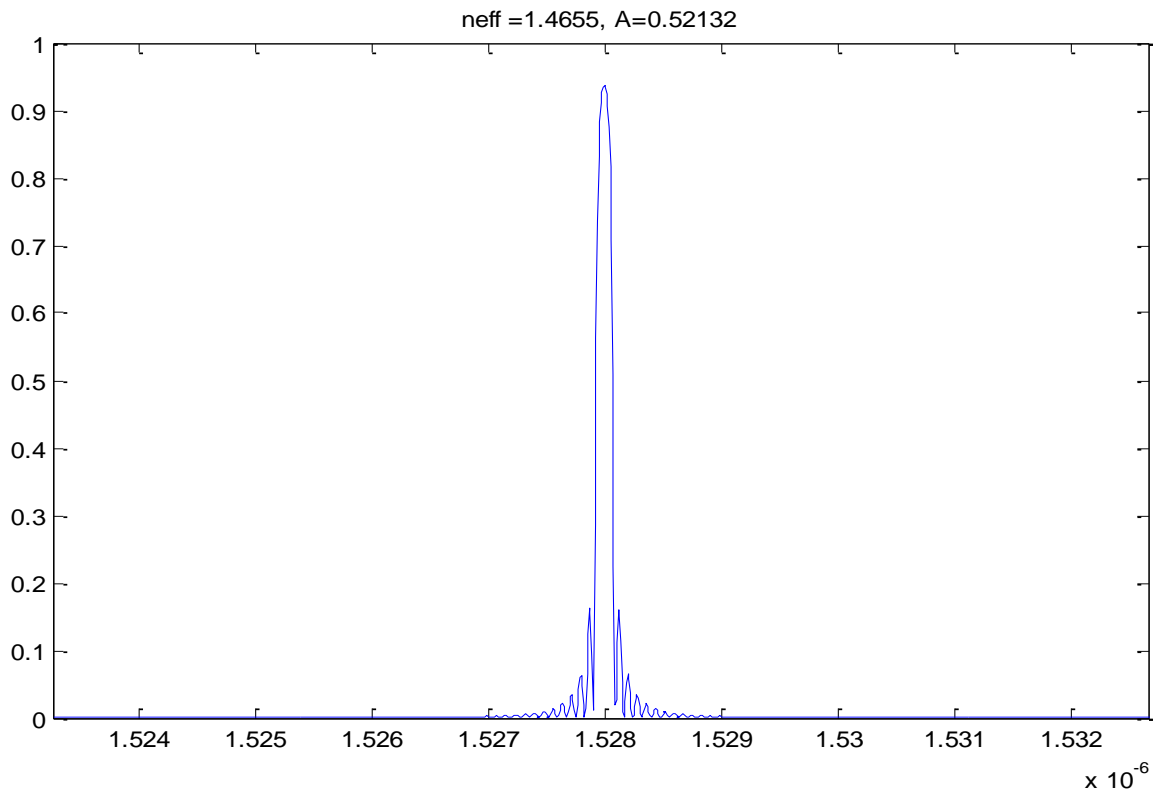


Сурет 4.6 - Брэгг торы моделінен алынған Брэгг толқын ұзындығы мен температура арасындағы тәуелділік

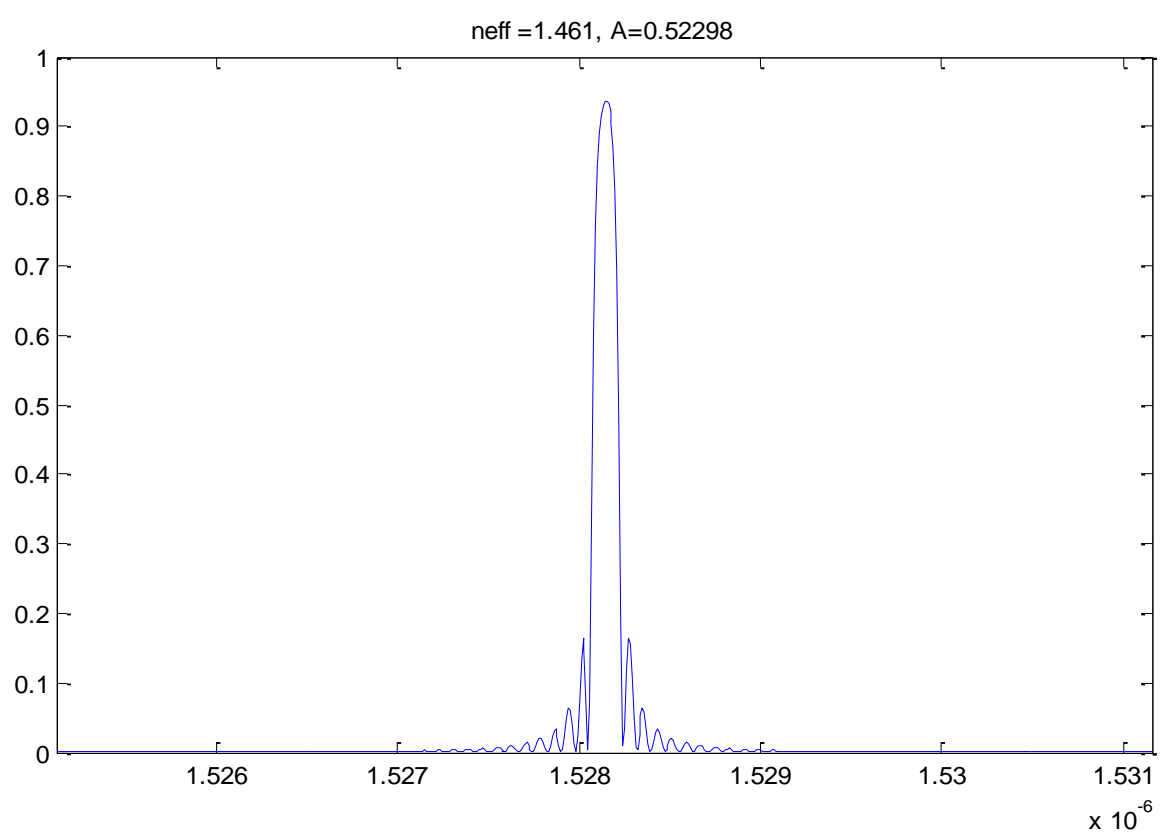
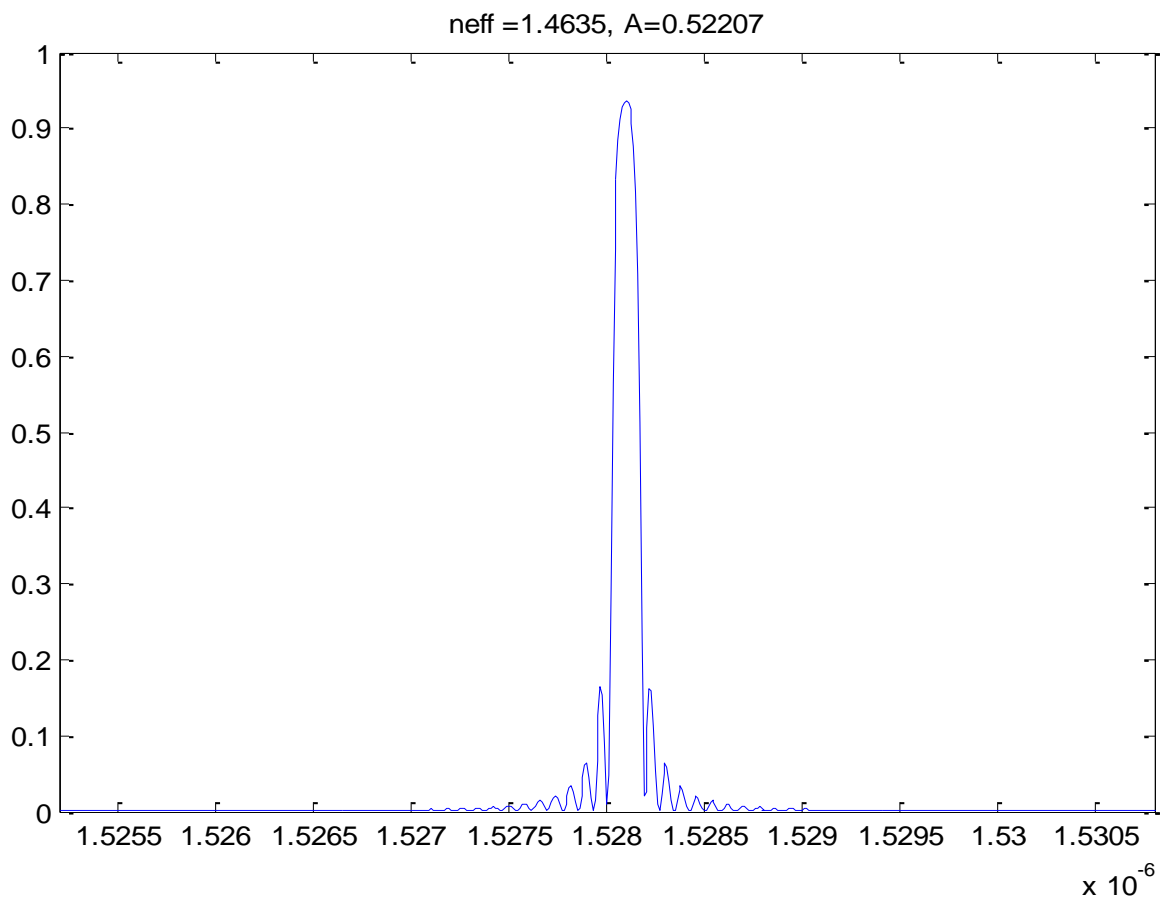
Бағдарлама нәтижесінде төмендегі (сурет 4.7) графиктерді алуға болады.



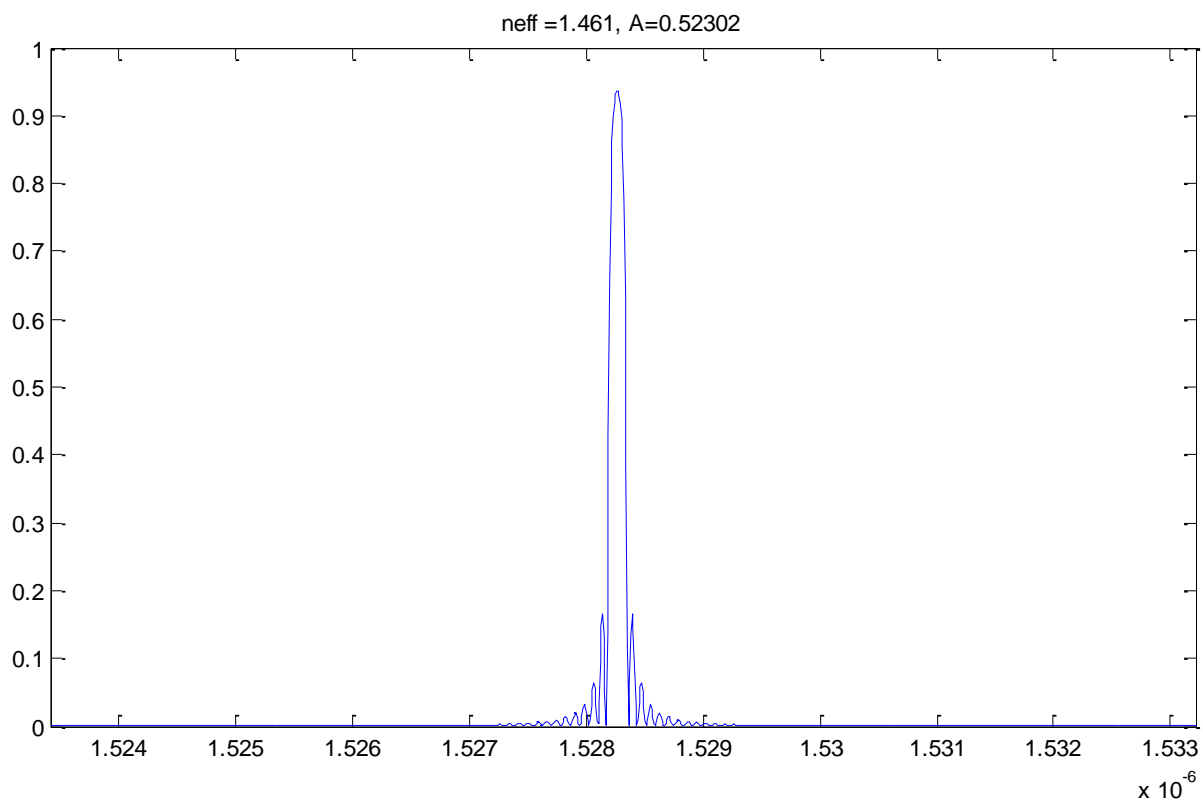
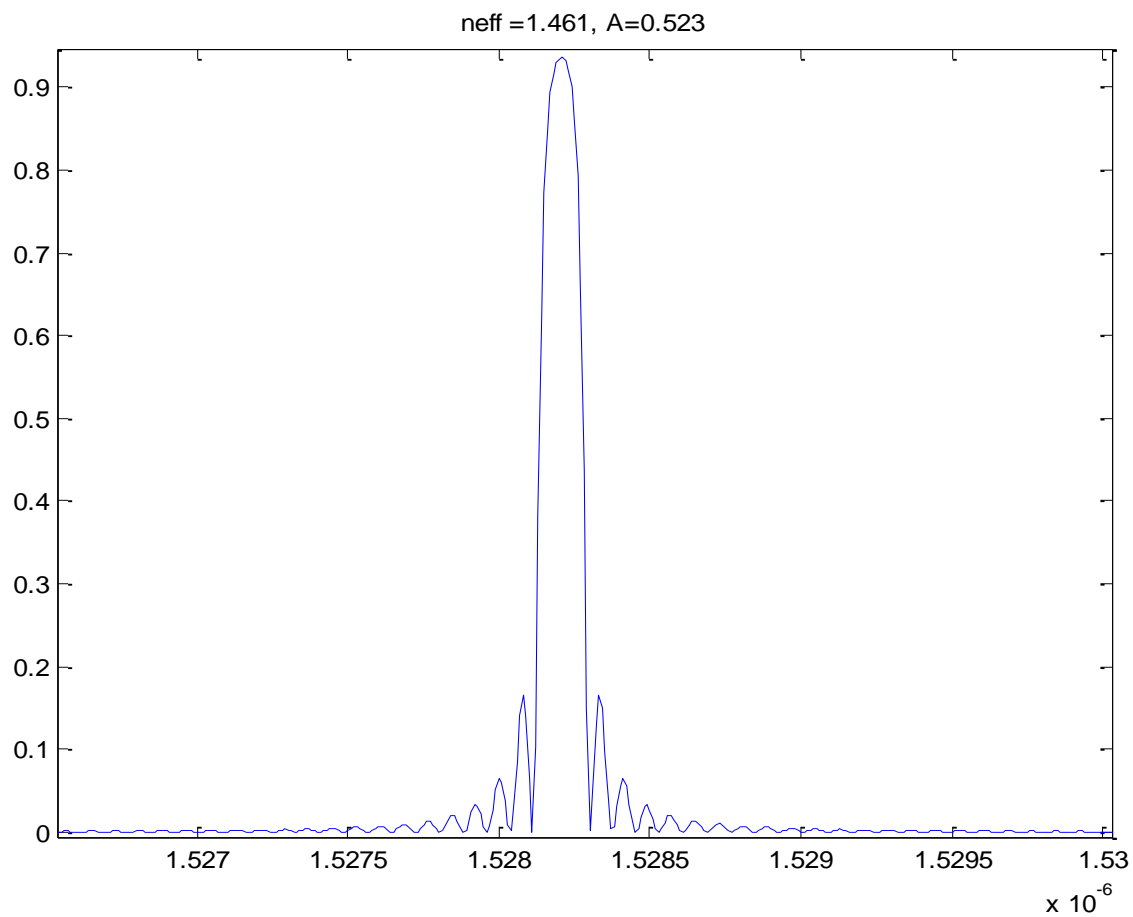
Сурет 4.7 - 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 1



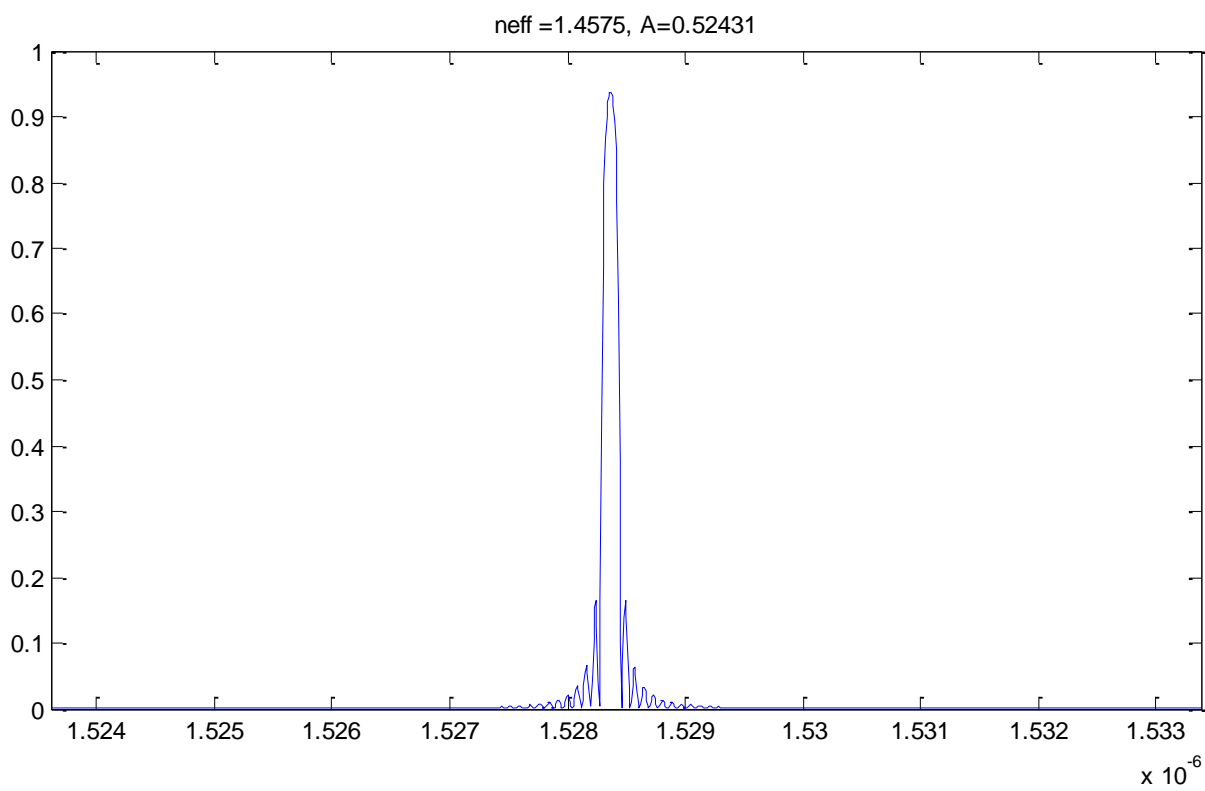
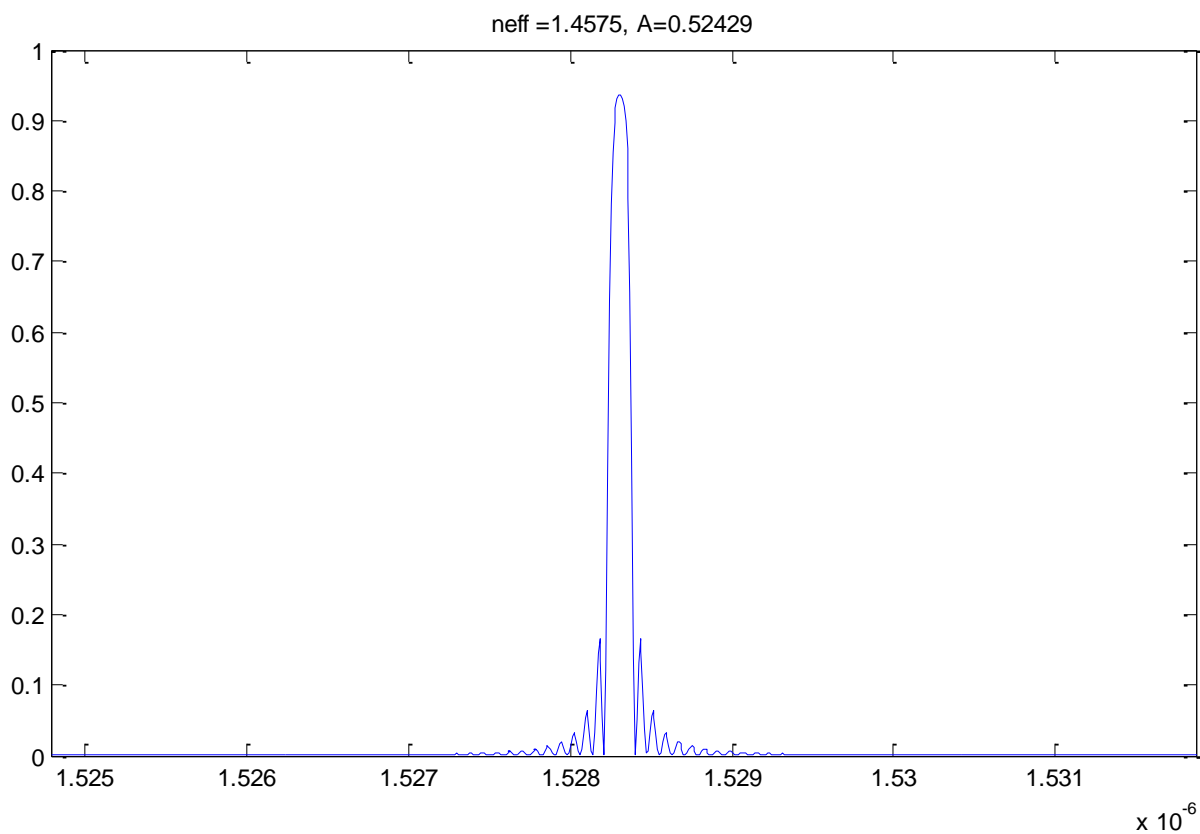
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 2



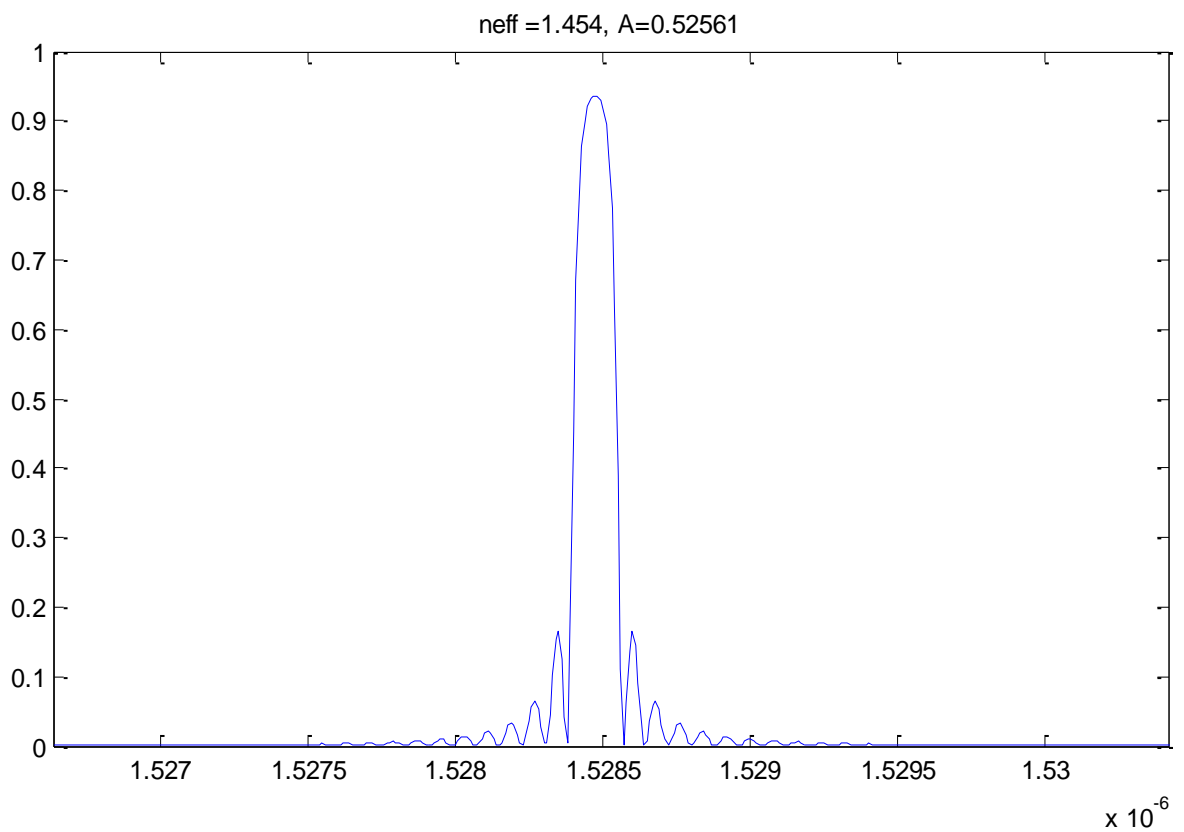
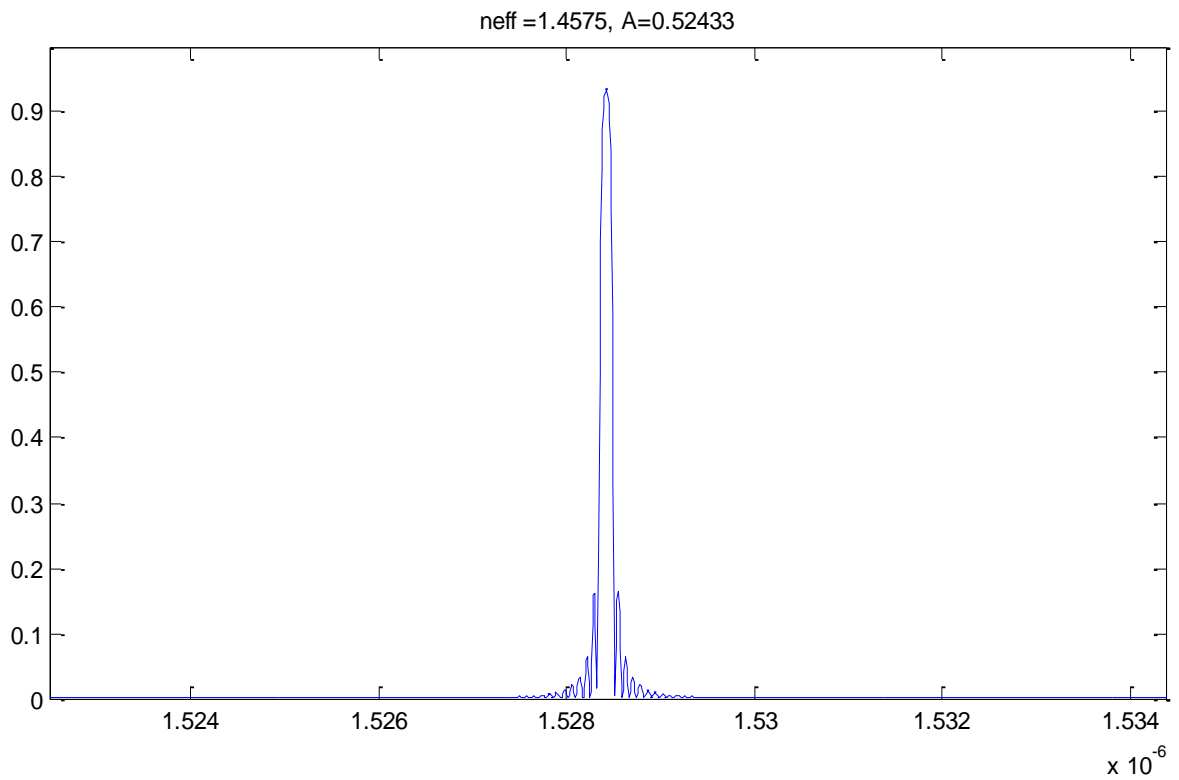
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 3



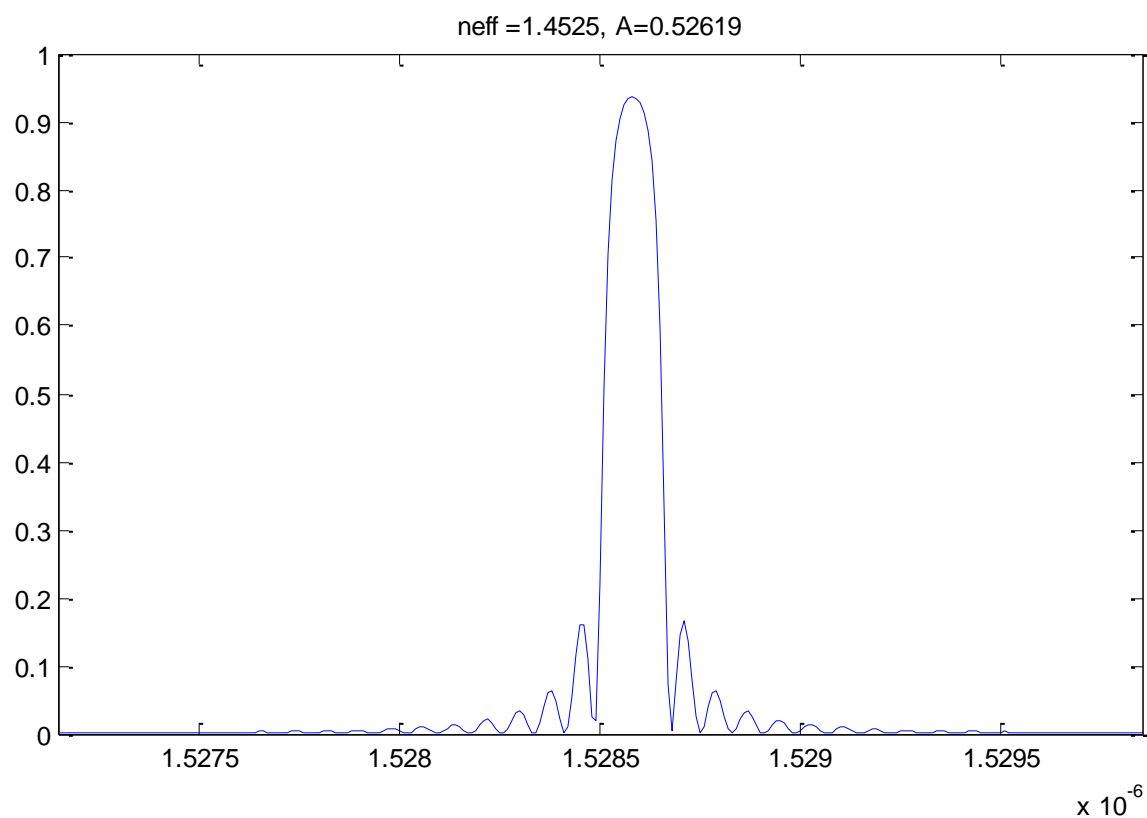
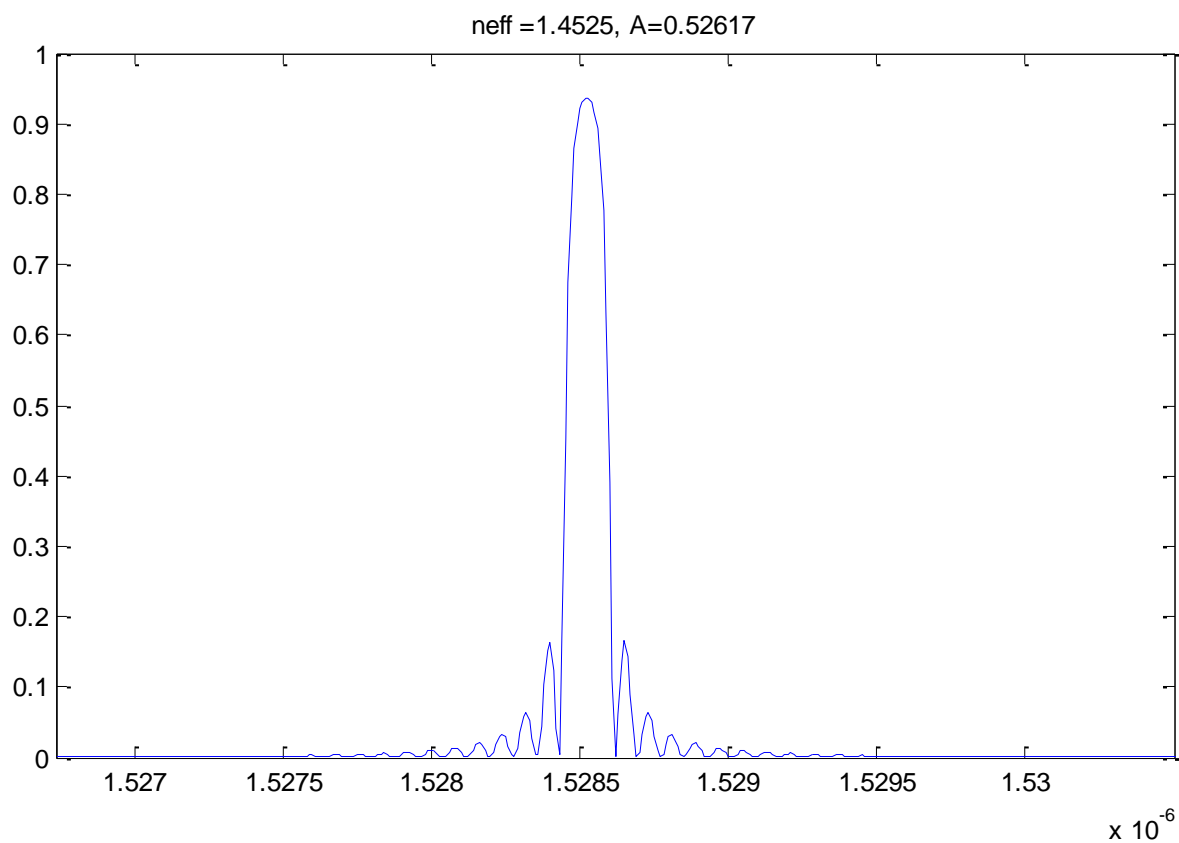
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 4



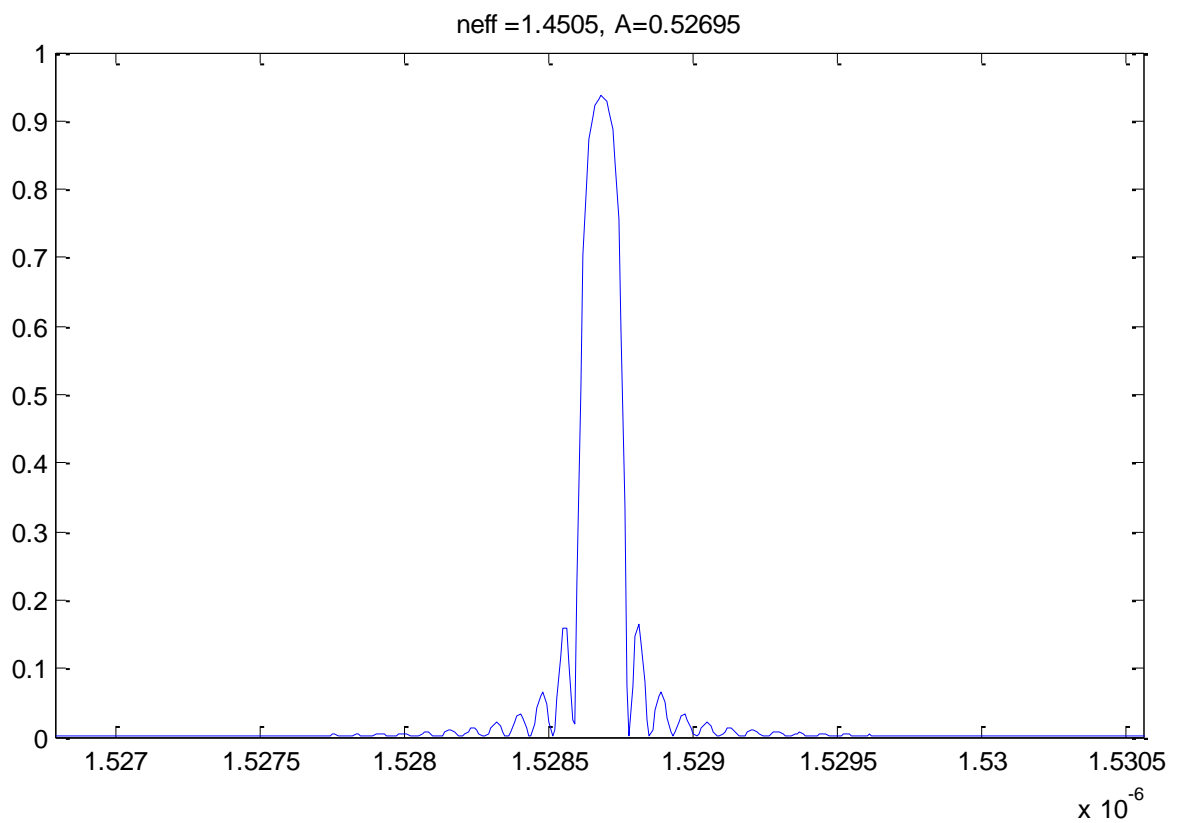
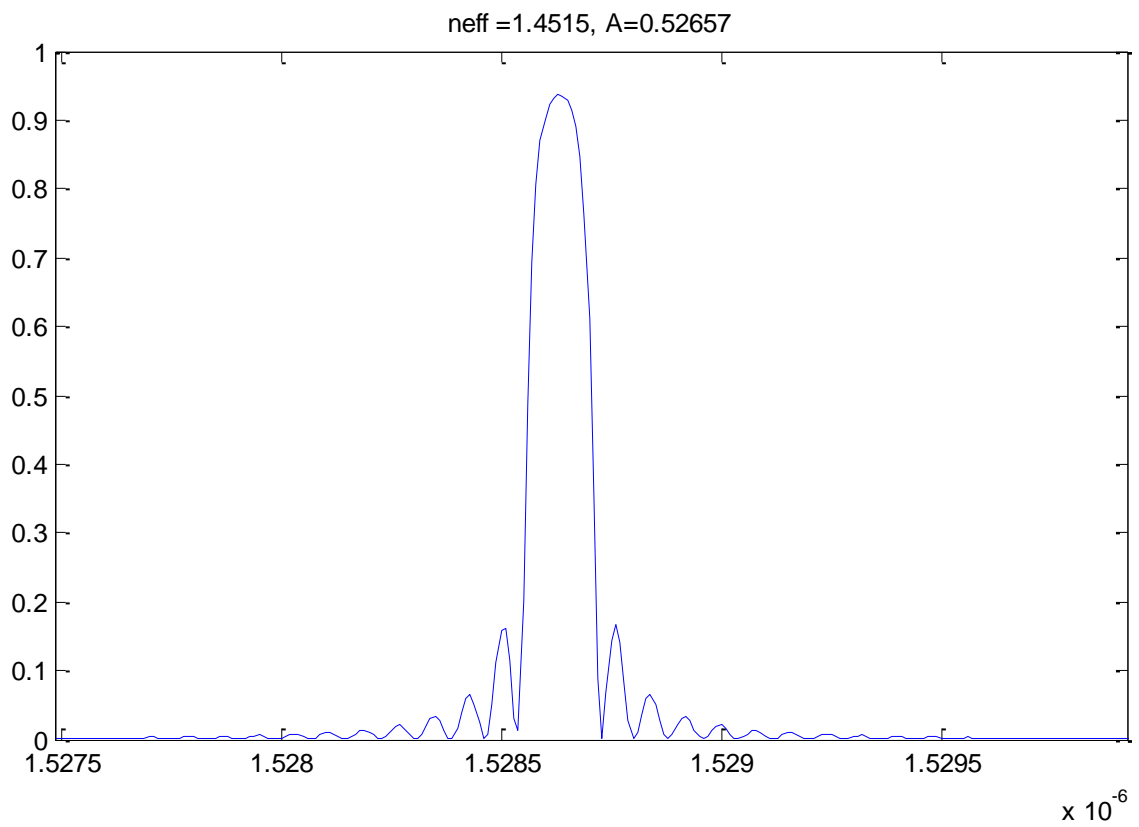
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 5



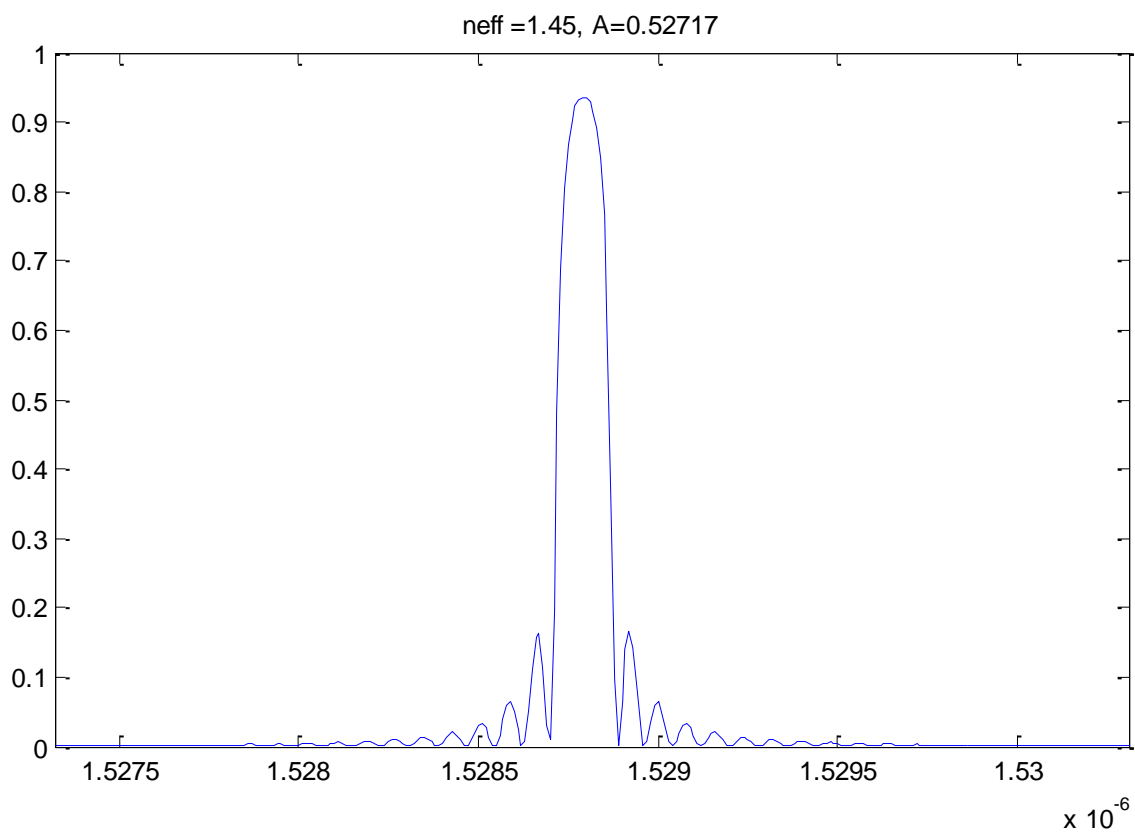
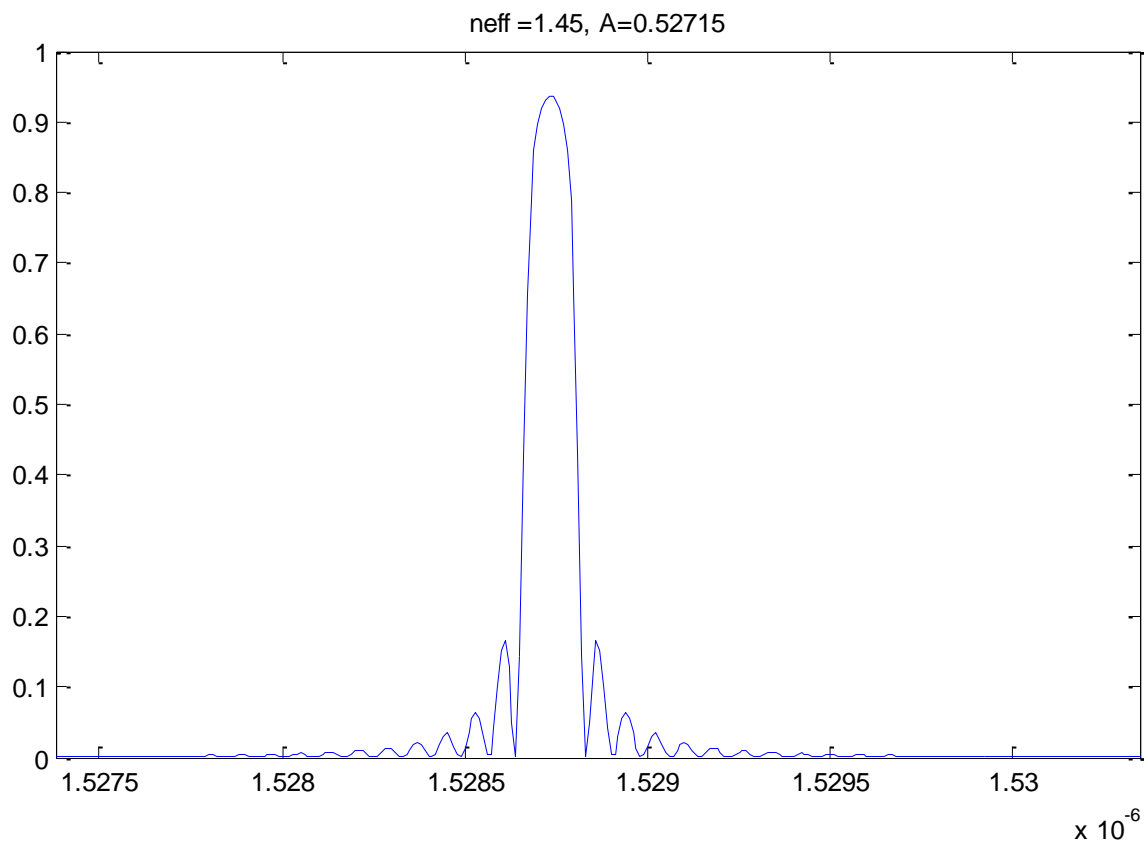
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 6



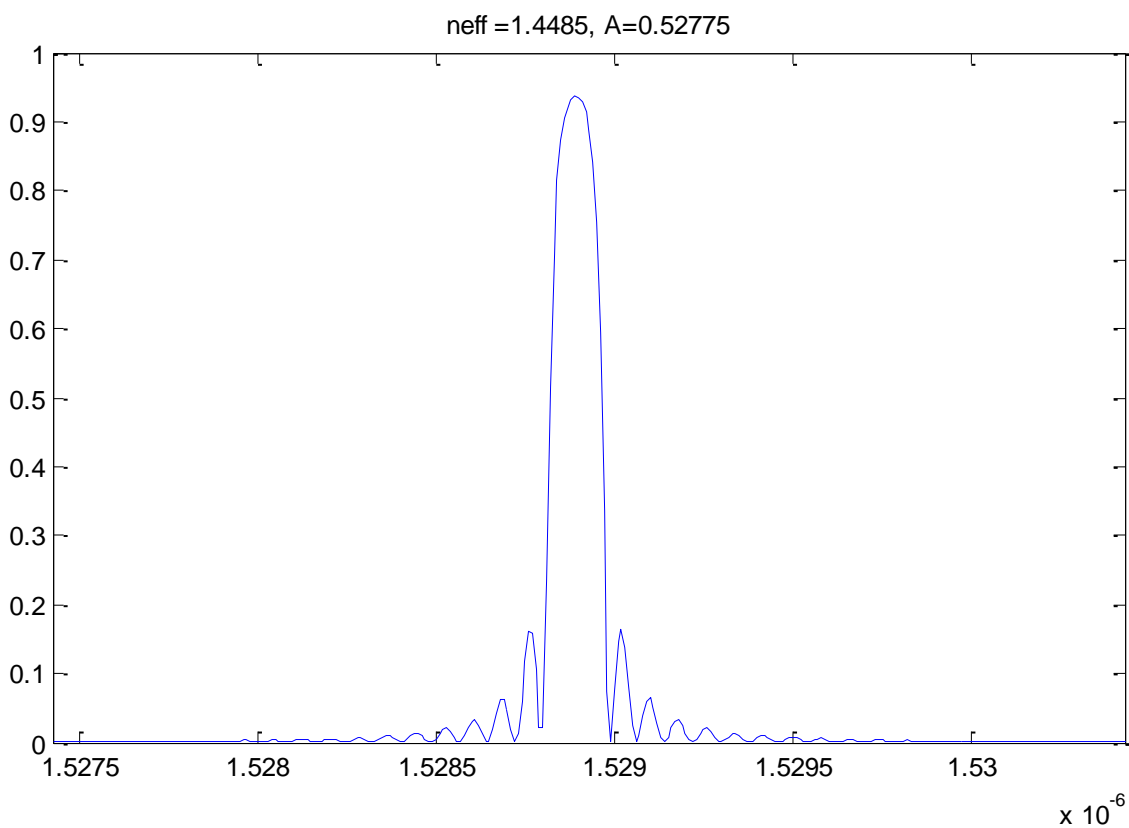
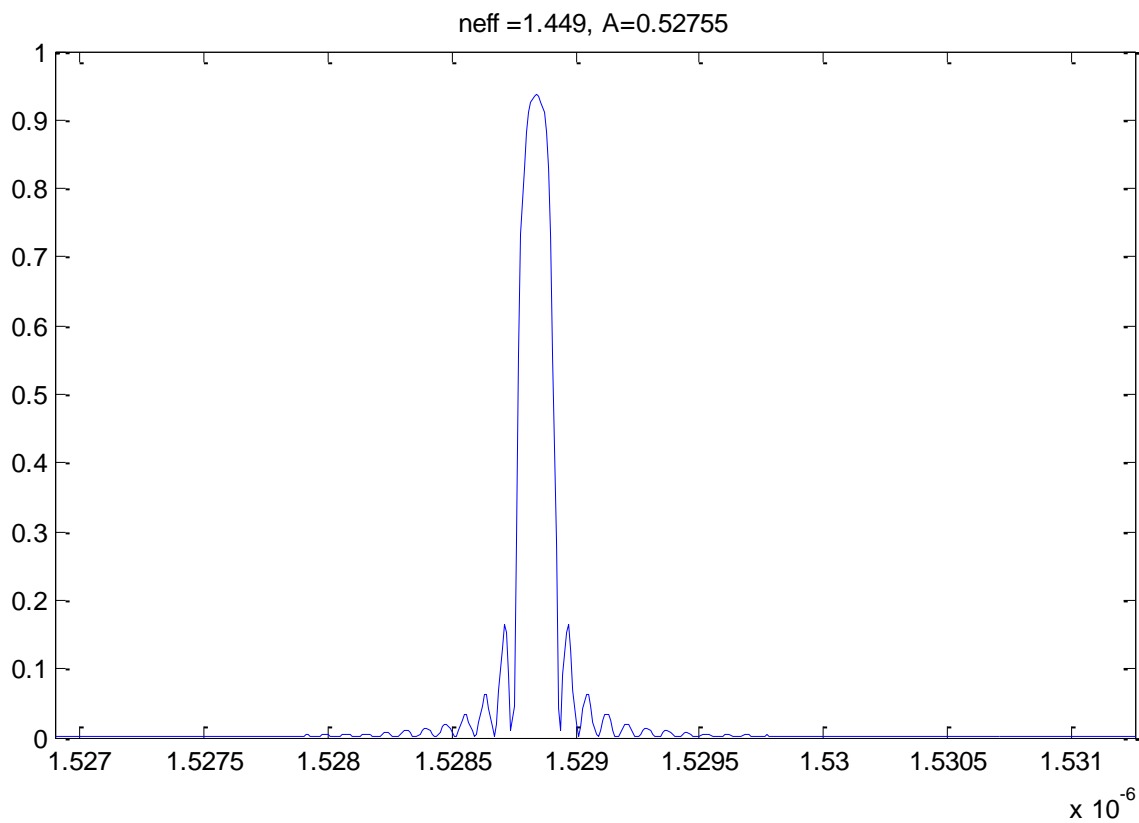
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 7



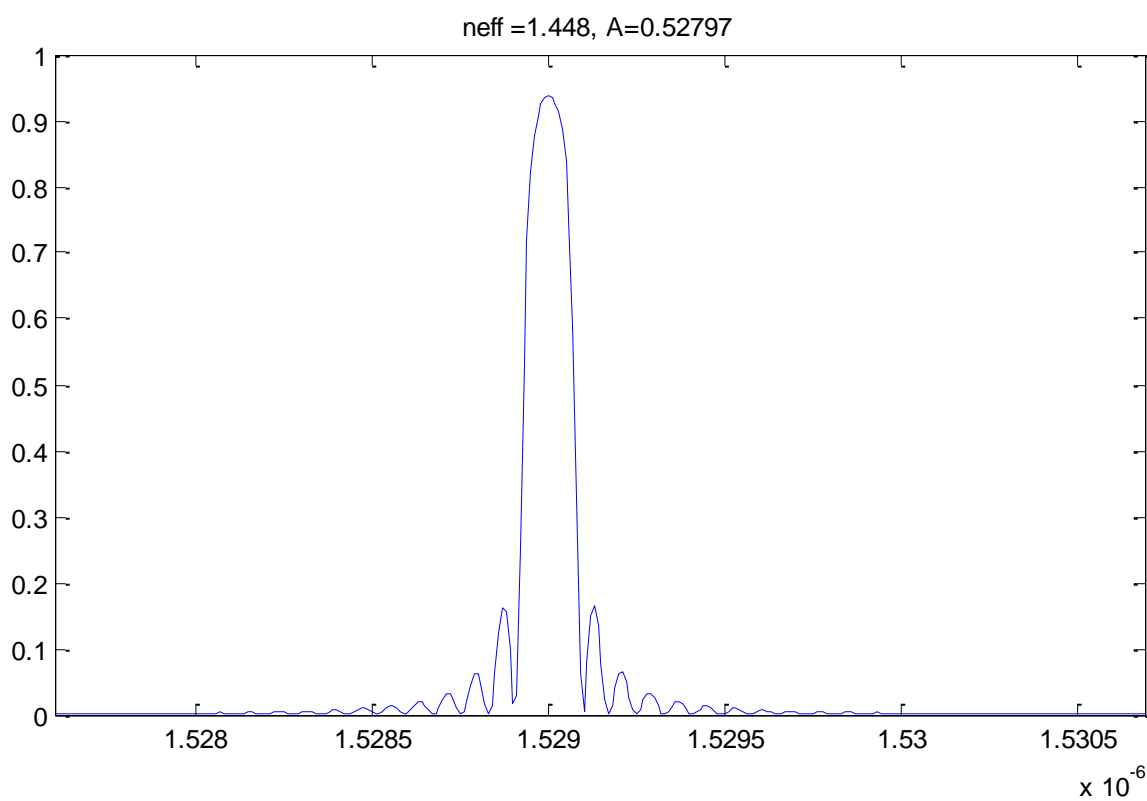
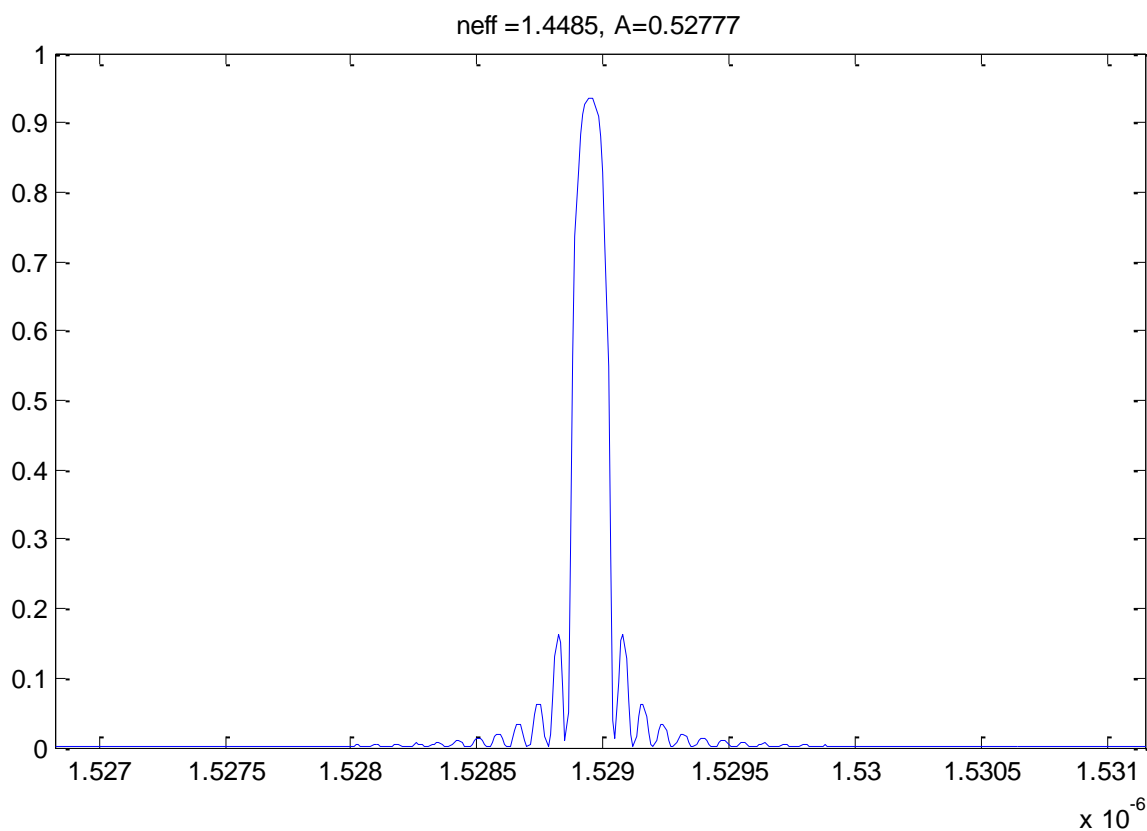
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 8



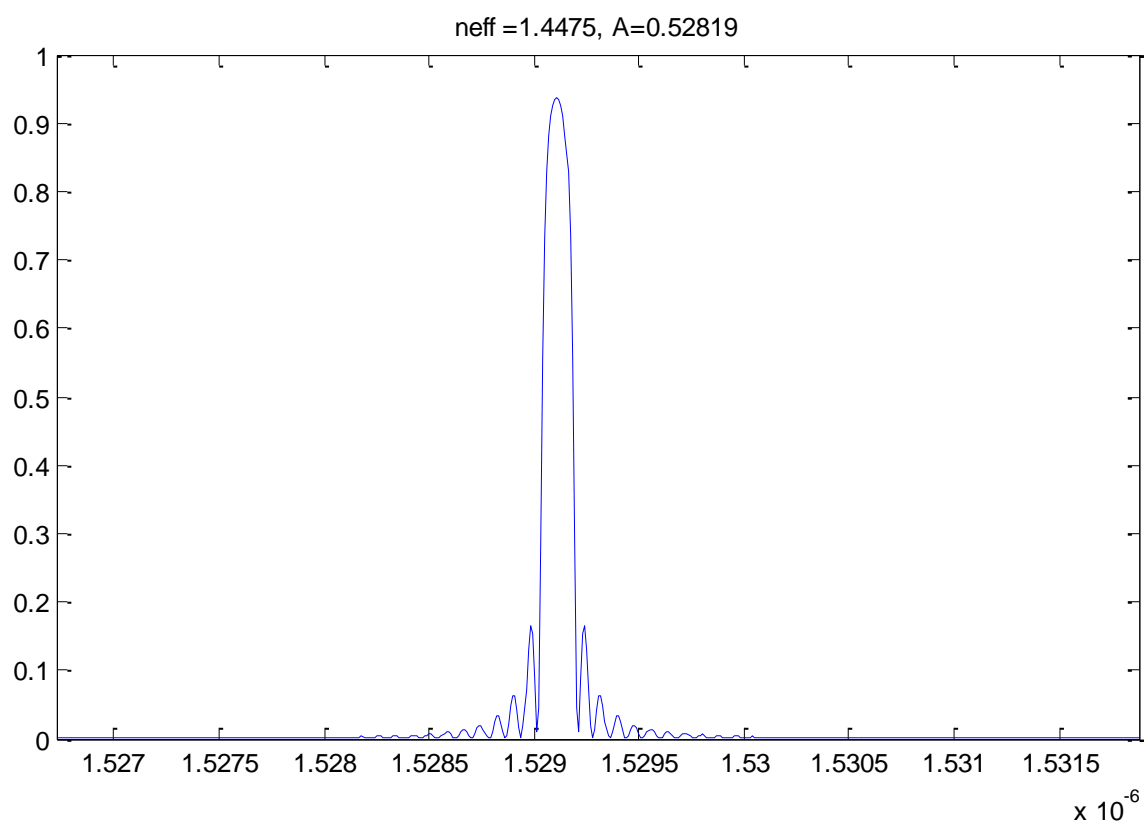
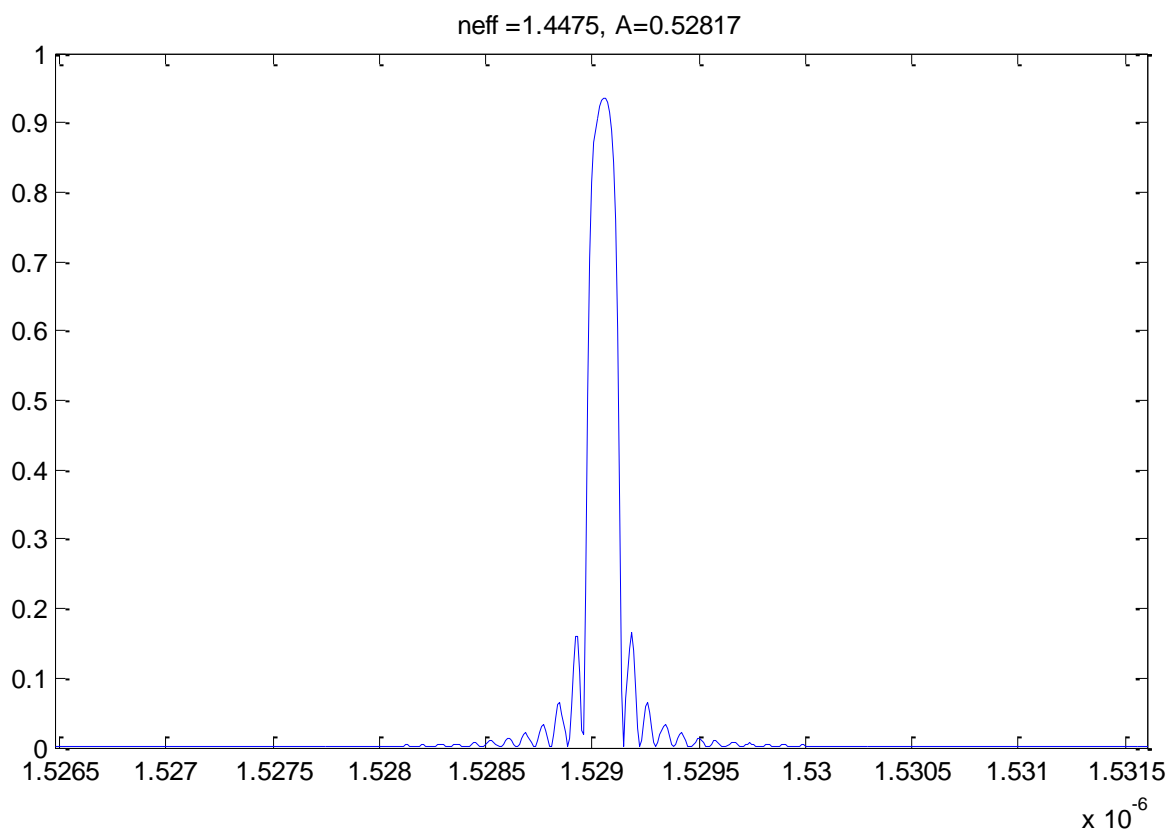
Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 9



Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 10



Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 11



Сурет 4.7. 3-3.30 спектралды сипаттаманың температураға тәуелділік өзгерісі, бет 12

Осы екі өзгерістердің қосындысы нәтижесінде толқын ұзындығы мен температура арасындағы байланыстың түзу сызықты екендігін көрсетуге болады:

$$k = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} \quad (4.40)$$

Демек, құрастырылған Брэгг торы сенсорының моделіндегі сенсордың кіріс параметрлері мәндерін алдын ала анықтап, оны құрастырушы мен қолданушы арасындағы дәнекер ретінде пайдалануға болады.

Суреттегі көк нүктелер 3-тараудағы тәжірибелік жұмыстардың нәтижесінде алынған мәндер, ал қызыл нүктелер сол алынған аппроксимацияға – жіңішке көк сызыққа жақын орналасқан модельден алынған дифференциалдың теңдеулер жүйесінің шешімдері болып табылады[82-84].

Модельді құрастыру кезінде сенсордың негізгі екі параметрлерінен басқа параметрлерді, мысалы – аподизация коэффициенттерінің өзгерістерін нөлге теңестіру есепті жеңілдеткен. Егер болашақта модельге басқа да қажетті параметрлердің өзгерісін енгізу қажет болса, онда құрастырылған модельге толығымен енгізу мүмкіндігі бар екендігін атап өтуге болады.

1. Брэг торына негізделген сенсордың моделін MathLab бағдарламалық платформасында құрастыру

1. AllDataBrag.m файлы

```
clearall
closeall
clc
% эксперименттік мәліметтер матрицасы (температура және Брэгг
толқынының ұзындығы)
Tmp = [18 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125
130 135];
IB = [1527.85 1528.02 1528.022 1528.117 1528.143 1528.237 1528.243 1528.3
1528.369 1528.42 1528.49 1528.527 1528.582 1528.608 1528.675 1528.733
1528.778 1528.82 1528.877 1528.955 1529.005 1529.087 1529.097];
%IB = [1527.83 1528.022 1528.022 1528.117 1528.143 1528.242 1528.243
1528.3 1528.369 1528.42 1528.49 1528.527 1528.582 1528.608 1528.675 1528.733
1528.778 1528.82 1528.877 1528.955 1529.005 1529.093 1529.097];

%=====
% алынған мәндерді тәжірибе негізінде алынған мәндермен салыстыру
%=====

% ең кіші квадраттар әдісімен a және b коэффициенттерін есептеу
(эксперимент)
X=Tmp;
Y=IB;
```



```

[a,b] = GetLineParam(X,Y);%
%=====
% скрипт для решения уравнения связанных мод с использованием
% матрицы передачи
%=====
%=====
%=====
% параметры волокна
%=====
%=====
L = 0.0100; % длина решетки
dn = 1.0e-4; % шаг изменения показателя преломления
design_lambda = 1528e-9; % центральная длина волны
neff = (1.375:0.0005:1.475); % вручную задаем матрицу значений neff
Nn = numel(neff);
A = (0.521e-6:0.1e-10:0.547e-6);
NA = numel(A);
LiamB(Nn*NA,3) = 0;

lambda=(1500.50e-9:0.01e-9:1550.50e-9); % область спектра

v=1;
k=(pi./lambda)*v*dn; % AC коэффициент связи
% для жесткой решетки предполагается, что sigma_dc = 0
sigma_dc =0;
%sigma_dc =(2*pi./lambda).*dn;

```

Төртінші бөлім бойынша тұжырымдама

Төртінші бөлімде математикалық модель негізінде тәжірбелік нәтижелер компьютерлік бағдарламада тексерілген. Ол үшін тәжірбелік жұмыстардан алынған нәтижелерді негізге ала отырып, Брэгг торына негізделген сенсордың кіріс параметрлерінің мәндері алынып және матрицалық әдісті қолданып, тәжірбелік зерттеулердің нәтижелері алынды. Сонымен қатар, берілген бөлім бойынша зерттеу нәтижелері ҚР БҒМ білім және ғылым саласындағы бақылау Комитетімен ұсынылған ғылыми басылымдарда «ПМУ хабаршысы. Энергетика бөлімі» [78] басылып шығарылған, Киев қаласында өткен «Заманауи ақпараттық- телекоммуникациялық технологиялар» атты халықаралық ғылыми мультипәндік конференциясында баяндалған [79].

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста Брэгг торына негізделген температуралық сенсорды зерттеу және модельдеу жұмыстарын ұйымдастыруда Брэгг торын модельдеудің маңыздылығы қарастырылды. Брэгг торының басқа оптикалық талшықты сенсорлардан ерекшеліктері мен артықшылықтары туралы мәліметтер келтірілді. Брэгг торының негізгі сипаттамалары, оны жасау кезінде қолданылатын негізгі параметрлердің сипаттамалары зерттелді. Оптикалық талшыққа негізделген сенсорлардың физикалық және химиялық қасиеттеріне қатысты мәліметтер қарастырылды. Брэгг торын лазерлермен жазудың (жасау) негізгі екі түрі – фазалық маска және интерферометрлік айналар арқылы жасаудың ерекшеліктері туралы мәліметтер келтірілді.

Кіріспеде бекітілген негізгі жұмыстың мақсаты мен алға қойылған мәселелерге қатысты барлық процестер орындалды. Нақты айтқанда, тақырыпта көтерілген мәселелерге тікелей қатысы бар ғылыми еңбектерге әдебиеттік шолулар жасалып, Брэгг торын пайдаланып, қоғамдағы әр түрлі құбылыстарды тіркеуге арналған сенсорларды құрастыру мен пайдалануға қатысты еңбектер анықталды. Атап айтқанда – Брэгг торын пайдаланып сұйықтың сыну көрсеткішінің өзгерісін анықтайтын (сұйықтың мөлдірлігін), бөлменің жарықтылығын анықтайтын, қуатты электрлік кабельдердің температуралық өзгерісін тіркеп отыратын сенсорларды жасауға арналған ғылыми жұмыстарға шолу жасалды.

Брэгг торына негізделген сенсордың температуралық тәуелділік заңдылығын анықтауға арналған зертханалық өлшеулер ұйымдастырылып, алынған нәтижелер бойынша математикалық модель түрі таңдап алынып, компьютерлік есептеулер жүргізілді. Модельдің негізгі функциясы торды жасаушылар мен қолданушылар арасындағы байланыстырушы түйін болғандықтан нақты математикалық есептеулер мен параметрлердің сәйкестігі бірінші орынға қойылды.

Жұмыстың негізгі мақсатына жету үшін Брэгг торы сенсорының моделін құрастыру, модельді құрастыру барысында сенсордың негізгі сипаттамаларын зерттеу процестері орындалды. Жұмыстың мақсатына негізделіп төмендегідей бірнеше негізгі тапсырмаларды орындау қажеттілігі айқындалып, жүзеге асты:

1. Брэгг торына негізделген сенсордың негізгі сипаттамаларын қарастырған ғылыми еңбектерге шолу жасалды;

2. Брэгг торына негізделген сенсордың негізгі параметрлерінің температураға тәуелділігі заңдылықтары анықталды:

2.1. $n_{eff} = f(T)$ эффективті сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі заңдылығы;

2.2. $\Lambda = f(T)$ Брэгг торының периоды мәнінің температураға тәуелділік заңдылығы;

3. Аталған заңдылықтарды анықтау мақсатында тәжірибелік зертхана ұйымдастырылды және сенсордың температуралық диапазондардағы спектрлік сипаттамалары бекітілді;

4. Алынған тәжірибелік нәтижелерді қолдана отырып, ұсынылған математикалық модельдің нәтижелерін Matlab бағдарламалық платформасында есептеп, салыстырылды. Диссертациялық жұмыстың жаңалығы ретінде эффективті сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі заңдылығы және Брэгг торының периоды мәнінің температураға тәуелділік заңдылығы анықталды. Себебі: зерттелген барлық ғылыми еңбектерде аталған байланыс қарастырылмаған.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

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

2 Xia Xiao, Yan Xu. Zexing Dong State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, 1037 Luoyu Road, Wuhan 430074. - China, 2015 //xuyang919@hust.edu.cn (Y.X.); dzexing@163.com (Z.D.).

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

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

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

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

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

8 В.Д., Бурков. Математическое Моделирование Волоконно - Оптический Датчик Напряженности Электрического Поля / ред. проф. каф. Проектирования и технологии Пр-Ва Приборов Мгул, д-р техн. наук, А.М. Мамедов, ст. науч. сотр. Ирэ Ран, В.Т. Потапов, проф. Ирэ Ран, д-р тех. наук, Т.В. Потапов, ст. науч. сотр. Ирэ Ран, канд. физ.-мат. наук, М.Е. Удалов, доц. каф.

проектирования и технологии пр-ва приборов МГУЛ, канд. техн. наук. - Мытищи, 2008. - 31с.

9 Садыков И.Р., Морозов О.Г., Садеев Т.С., Степущенко О.А., Кокурина О.Е., Арбузова Е.Ю. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // Электронный журнал "Труды МАИ". - 2012. - №61 // www.mai.ru/science/trudy

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

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

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

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

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

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

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

17 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 // Phys. Rev. B. - 1992. - Vol. 46, № 18. - P. 11445-11451.

18 Janer C., Rivas L.M., Rubio R.M., Galo J.L., Navarro L., Carballar A. Ge-doped silica fibers: modelling of photosensitivity // Proc. of SPIE. - 2005. - Vol. 5971. - P. 59710L-1.

19 Dong L., Pinkstone J., Russell P.St. J., Payne D.N. Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition performs // J. Opt. Soc. Am. B. - 1994. - Vol. 11, №10. - P. 2106-2111.

20 Nishii J., Kitamura N., Yamanaka H., Hosono H., Kawazoe H. Ultraviolet-radiation-induced chemical reactions through one and two-photon absorption processes in GeO₂-SiO₂ glasses // Opt. Lett. - 1995. - Vol. 20, №10. - P. 1184-1186.

21 Nishii J., Fukumi K., Yamanaka H., Kawamura K., Hosono H., Kawazoe H. Photochemical reactions in GeO₂-SiO₂ glasses induced by ultraviolet irradiation: Comparison between Hg lamp and excimer laser // Phys. Rev. B. - 1995. - Vol. 52, №3. - P. 1661-1665.

22 Неуструев В.Б. Электрострикционный механизм образования брэгговской решетки в германосиликатных световодах // Квантовая электроника. - 2001. - Т. 31, №11. - С. 1003-1006.

23 Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C. Photosensitivity in optical fibers // Annu. Rev. Mater. Sci. - 1993. - Vol. 23. - P. 125-157.

- 24 Кукушкин С.А., Осипов А.В., Шлягин М.Г. Образование микропор в оптическом волокне под воздействием импульсного УФ света высокой интенсивности // Журнал технической физики. - 2006. - Т. 76, №8. - С. 73-84.
- 25 Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Термоупругий и абляционный механизмы лазерного повреждения поверхности прозрачных твердых тел // Квантовая электроника. - 1998. - Т. 25, №3. - С. 277-281.
- 26 Колдунов М.Ф., Маненков А.А., Покотило И.Л. Формулировка критерия термоупругого лазерного разрушения прозрачных диэлектриков и зависимость порога разрушения от длительности импульса // Квантовая электроника. - 1997. - Т. 24, №10. - С. 944-948.
- 27 Reekie L., Archambault J.L., Russell P. St. J. 100% reflectivity fibre gratings produced by a single excimer laser pulse // OSA/OFC. - 1993. - №715. - P. 327-330.
- 28 Bilodeau F., Malo B., Albert A., Johnson D.C., Hill K.O., Hibino Y., Abe M., Kawachi M. Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides // Opt. Lett. - 1993. - Vol. 18, № 12. - P. 953-955.
- 29 Chojetzki C., Rothhardt M., Ommer J., Unger S., Schuster K., Mueller H.R. High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings-arrays and single gratings of type II // Opt. Eng. Lett. - 2005. - Vol. 44, №6. - P. 060503-1.
- 30 Davis K.M., Laser Miura K., Sugimoto N., Hirao K. Writing waveguides in glass with a femtosecond // Opt. Lett. - 1996. - Vol. 21, №21. - P. 1729-1731.
- 31 Mihailov S.J., Smelser C.W., Lu P., Walker R.B., Grobnc D., Ding H., Henderson G., Unruh J. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation // Opt. Lett. - 2003. - Vol. 28, №12. - P. 995-997.
- 32 Dragomir A., Nikogosyan D.N., Zagorulko K.A., Kryukov P.G., Dianov E.M. Inscription of fiber Bragg gratings by ultraviolet femtosecond radiation // Opt. Lett. - 2003. - Vol. 28, №22. - P. 2171-2173.
33. Bernier M., Sheng Y., Vall?e R. Ultrabroadband fiber Bragg gratings written with a highly chirped phase mask and Infrared femtosecond pulses // Optics Express. - 2009. - Vol. 17, № 5. - P. 3285-3290.
- 34 Becker M., Bergmann J., Br?ckner S., Franke M., Lindner E., Rothhardt M., Bartelt H. Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry // Optics Express. - 2008. - Vol. 16, №23. - P. 19169-19178.
- 35 Fang X., He X.Y., Liao C.R., Yang M., Wang D.N., Wang Y. A new method for sampled fiber Bragg grating fabrication by use of both femtosecond laser and CO2 laser // Optics Express. - 2010. - Vol. 18, №3. - P. 2646-2654.
- 36 Mihailov S.J., Grobnc D., Walker R.B., Smelser C.W., Cuglietta G., Graver T., Mendes A. Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation // Optics Communications. - 2008. - Vol. 281. - P. 5344-5348.
- 37 Kelleher P., Nikogosyan D.N. Inscription of narrow-band fibre Bragg gratings with 264 nm femtosecond pulses // Optical Fiber Technology. - 2010. - Vol. 16. - P. 212-216.

38 Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Анализ механизмов фотоиндуцирования фемтосекундными лазерными импульсами Брэгговских дифракционных структур в оптическом волокне // Сборник трудов конференции "Фундаментальные проблемы оптики 2010" - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. - С. 15-17.

39 Загоруйко К.А., Крюков П.Г., Дианов Е.М., Драгомир А., Никогосян Д.Н. Запись брэгговских решеток в одномодовых волоконных световодах с помощью УФ фемтосекундного излучения // Квантовая электроника. - 2003. - Т. 33, №8. - С. 728-730.

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

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

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

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

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

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

46 Lai Y., Zhou K., Sugden K., Bennon I. Point-by-point inscription of sub-micrometer period fiber Bragg gratings // OSA/CLEO/QELS. - 2008. - paper CTuU2.

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

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

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

50 Varzhel' S.V., Kulikov A.V., Konnov K.A., Gribaev A.I. Single excimer pulse writing of Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding: visualization and thermal annealing of the gratings // Materials of the V international research and practice conference. - Munich, 2013. - Vol. 1. - P. 305-310.

51 Bartelt H., Schuster K., Unger S., Chojetzki C., Rothhardt M., Latka I. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // *Applied Optics*. - 2007. - Vol. 46, №17. - P. 3417-3424.

52 Malo B., Johnson D.C., Bilodeau F., Albert J., Hill K.O. Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations // *Opt. Lett.* - 1993. - Vol. 18, №15. - P. 1277-1279.

53 Meshkovskiy I.K., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Varzhel' S.V. Bragg Gratings Induced in Birefringent Optical Fiber with an Elliptical Stress Cladding // *Journal of Photonics*. - 2013. - Vol. 2013. - P. 4 // doi:10.1155/2013/936036.

54 Chojetzki C., Rothhardt M., Ommer J., Unger S., Schuster K., Mueller H.R. High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings-arrays and single gratings of type II // *Opt. Eng. Lett.* - 2005. - Vol. 44, №6. - P. 060503-1.

55 Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 256 с.

56 Федоринин В.Н., Сидоров В.И. Поляризационные оптические датчики для измерений физических величин // *Журн. аналит. химии*. - 2005. - Т. 55, №7. - С. 511.

57 Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалеv В.Е. Анализ механизмов фотоиндуцирования фемтосекундными лазерными импульсами Брэгговских дифракционных структур в оптическом волокне // Сборник трудов конференции "Фундаментальные проблемы оптики 2010". - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. -С. 15-17.

58 Slattery S.A., Nikogosyan D.N., Brambilla G. Fiber Bragg grating inscription by high-intensity femtosecond UV laser light: comparison with other existing methods of fabrication // *J. Opt. Soc. Am. B*. - 2005. - Vol. 22, №2. - P. 354-361.

59 Kelleher P., Nikogosyan D.N. Inscription of narrow-band fibre Bragg gratings with 264 nm femtosecond pulses // *Optical Fiber Technology*. - 2010. - Vol. 16. - P. 212-216.

60 Martinez A., Khrushchev I.Y., Bennion I. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser // *Opt. Lett.* - 2006. - Vol. 31, №11. - P. 1603-1605.

61 Smelser C.W., Bilodeau F., Malo B., Grobnic D., Mihailov S.J. Novel phase mask Apparatus for 'Through the Jacket' inscription of FBG's in unloaded SMF-28 fiber // *OSA/BGPP*. - 2010. - №11. - P. 3.

62 Becker M., Bergmann J., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Schuster K., Kobelke J., Unger S., Bartelt H., Fernandes L.A., Marques P.V.S. Fiber Bragg Grating Inscription with DUV Femtosecond Exposure and Two Beam Interference // *Proc. of SPIE*. - 2009. - V. 16. - № 23. - P. 19169-19178.

63 Mihailov S.J., Grobnic D., Smelser C.W., Lu P., Walker R. B., Ding H. Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phase mask // *Optical Materials Express*. - 2011. - Vol. 1, №4. - P. 754-765.

64 Nolte S., Thomas J., Voigtlander C., Becker R., Richter D., Tunnermann A. Femtosecond Laser Induced Fiber Bragg Gratings - Status and Prospects // OSA/BGPP. - 2010. - paper BWA2 .

65 Dignon M.J.F., Vakoca B.J., Hodgson C.W., Kino G.S., Edward L. Acoustic Fiber Sensor Arrays // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proc. SPIE. - 2004.- №5502.

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

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

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

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

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

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

72 Fang X., He X.Y., Liao C.R., Yang M., Wang D.N., Wang Y. A new method for sampled fiber Bragg grating fabrication by use of both femtosecond laser and CO2 laser // Opt. Express. - 2010. - Vol. 18, №3. - P. 2646-2654.

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

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

75 Wojcic W. Жунусов К.Х., Смайлов Н.К. "азіргі замандағы талшықты-оптикалық байланыс желілері мен брэг торының температураға тәуелділігін анықтау" // "Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар: білім, ғылым, тәжірибе" атты II Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференцияның еңбектері. - Алматы, 2015. - Т. 2. - С. 306-309.

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

77 Mykhailo M.K., Yosyp Y.R., Vitalii Y.I., Ivan I.M., Ihor P.S., Sandor K., Paweł K., Zhailaubayev Y., Smailov N. Temperature behaviour of optical parameters in (AG3ASS3)0.3(AS2S3)0.7 // Thin films Proceedings of SPIE - The

International Society for Optical Engineering 20159816. - Optical Fibers and Their Applications, 2015. - P. 98160 // doi:10.1117/12.2229336.

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

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

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

81 Ibrayev A.T., Zhunussov K., Smailov N., Tleumuratova K.T. Study of temperature sensors based on bragg grating Magyar Tudomanyos Journal (Budapest, Hungary) The journal is registered and published in Hungary // The journal publishes scientific studies, reports and reports about achievements in different scientific fields. - 2017. - №4. - P. 62-67.

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

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

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

ҚОСЫМША А

Диссертациялық жұмыстан алынған нәтижелер бойынша акт



АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящая справка подтверждает внедрение результатов экспериментального исследования моделирования температурных сенсоров на основе волоконно-оптических Брэгговских решеток, выполненной Смайловым Нуржигитом Куралбаевичем по диссертационной работе:

«ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО - ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕТКИ БРЭГГА»

представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD), в которой установлено, что работа температурных сенсоров зависит напрямую от эффективности показателя преломления.

Председатель комиссии:

док. тех. наук профессор

Члены комиссии:

Prof.dr hab. inż. Andrzej Kotyra

Prof.dr hab. inż. Andrzej Smolarz

Waldemar Wojcik

ДЫРЕКТОР
Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wojcik

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel. (81) 53 84 309, fax: (81) 53 84 312

ҚОСЫМША Б

MathLab бағдарламалық платформасында құрастырылған модель
1. AllDataBrag.mфайлы

```

clearall
closeall
clc
% матрица экспериментальных данных (температура и длина волны
Брэгга)
Tmp = [18 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105 110 115 120 125
130 135];
IB = [1527.85 1528.02 1528.022 1528.117 1528.143 1528.237 1528.243 1528.3
1528.369 1528.42 1528.49 1528.527 1528.582 1528.608 1528.675 1528.733
1528.778 1528.82 1528.877 1528.955 1529.005 1529.087 1529.097];
%IB = [1527.83 1528.022 1528.022 1528.117 1528.143 1528.242 1528.243
1528.3 1528.369 1528.42 1528.49 1528.527 1528.582 1528.608 1528.675 1528.733
1528.778 1528.82 1528.877 1528.955 1529.005 1529.093 1529.097];

%=====
%Сравнение с экспериментом смоделированных значений
%=====

%Расчет коэффициентов а и b методом наименьших квадратов
(эксперимент)
X=Tmp;
Y=IB;
[a,b] = GetLineParam(X,Y);%
%=====
=====
% скрипт для решения уравнения связанных мод с использованием
% матрицы передачи
%=====
=====

%=====
=====
% параметры волокна
%=====
=====

L = 0.0100; % длина решетки
dn = 1.0e-4; % шаг изменения показателя преломления
design_lambda = 1528e-9; % центральная длина волны
neff = (1.375:0.0005:1.475); % вручную задаем матрицу значений neff
Nn = numel(neff);
A = (0.521e-6:0.1e-10:0.547e-6);
NA = numel(A);
LiamB(Nn*NA,3) = 0;

```

```

lambda=(1500.50e-9:0.01e-9:1550.50e-9); % область спектра

v=1;
k=(pi./lambda)*v*dn; % AC коэффициент связи
% для жесткой решетки предполагается, что sigma_dc = 0
sigma_dc =0;
%sigma_dc =(2*pi./lambda).*dn;

% В цикле вычисляем длину отраженной волны в зависимости от neff и
периода
%решетки
Pi=0;
e9=1e9;
for I=1:Nn
for J=1:NA
Params(1)=neff(I);
Params(2)=A(J);
[R] = GetLiambdaSpectre(lambda,Params);
[maxR, maxI] = max(R);
Pi = Pi + 1;
LiamB(Pi,1) = lambda(maxI)*e9;
LiamB(Pi,2) = neff(I);
LiamB(Pi,3) = A(J);
end;
end;

% Строим график прямой по экспериментальным данным
X=Tmp;
minX=min(X);
maxX=max(X);
clearXL;
clearYL;
XL(1)=minX;
XL(2)=maxX;
YL(1)=a+b*XL(1);
YL(2)=a+b*XL(2);
plot(Tmp,lB, '*');
holdon;
plot(XL,YL);
%-----

NE = numel(Tmp);
ND = length(LiamB);

```

```

LiamBB(NE,3)=0;
e6=1e6;

Pneff = 0;
PA = 0;
for I=1:NE
    D = abs(LiamB(:,1) - (b*Tmp(I)+a));
%D = abs(LiamB(:,1) - lB(I));
LiamMin=max(D)+1;

for J=1:ND
%if (LiamB(J,2) >= Pneff)&&(LiamB(J,3) >= PA)
if ((LiamB(J,3) >= PA))
if (D(J) <= LiamMin)
        LiamMin = D(J);
        K = J;
end;
end;
end;

LiamBB(I,1) = LiamB(K,1);
LiamBB(I,2) = LiamB(K,2);
LiamBB(I,3) = LiamB(K,3);

    Pneff = LiamB(K,2);
    PA = LiamB(K,3);
end;

plot(Tmp, LiamBB(:,1), 'r*');
holdoff;

figure
plot(Tmp, LiamBB(:,2),'*');

%Расчет коэффициентов а и b методом наименьших квадратов
(эксперимент)
X=log(Tmp');
Y=log(LiamBB(:,2));
[a,b] = GetLineParam(X,Y);
c1 = exp(a);
n1 = b;
%Строим график функции c*x^n
clearXL;
clearYL;

```

```

XL(NE)=0;
YL(NE)=0;
for I=1:NE
XL(I) = Tmp(I);
YL(I) = c1*XL(I)^n1;
end;
holdon;
plot(XL,YL);
%-----
holdoff;

figure
plot(Tmp, LiamBB(:,3),'*');

%Расчет коэффициентов a и b методом наименьших квадратов
X=log(Tmp');
Y=log(LiamBB(:,3));
[a,b] = GetLineParam(X,Y);
c2 = exp(a);
n2 = b;
%Строим график функции c*x^n
clearXL;
clearYL;
XL(NE)=0;
YL(NE)=0;
for I=1:NE
XL(I) = Tmp(I);
YL(I) = c2*XL(I)^n2;
end;
holdon;
plot(XL,YL);
%-----
holdoff;

%Строим спектр из модели для экспериментальных данных
for I=1:NE
Params(1)=LiamBB(I,2);
Params(2)=LiamBB(I,3);
[R] = GetLiambdaSpectre(lambda,Params);
figure;
plot(lambda,R);
title(strcat('neff = ',num2str(Params(1)), ', A=', num2str(Params(2)*e6)));
end;

```


2. Bragg3.mфайлы

```
%=====
=====
% matlab script for solving the coupled-mode equation using
% the transfer matrix method
%=====
=====
% clear all
% close all
% clc
%=====
=====
% fibre simulation parameters
%=====
=====

L = 0.0100; % Grating Length
dn = 1.0e-4; % Induced index change
design_lambda = 1550e-9; % design wavelength

%=====
=====
% finding neff(effective reflective index) for the designed fibre
%=====
=====
formatlong
n=40;
a=0.5;
increment=2;
tolerance=1e-4;

nco=1.447; % nco-core index
ncl=1.444; % ncl-cladding index
xstart=((ncl-0.0112)+nco)/2;
x=xstart;
dx=increment;

%=====
=====
% to find the root of neff(effective reflective index)
%=====
=====
for m=1:n
```

```

neff= sqrt((ncl^2)+(a*x)*(nco^2-ncl^2));
while dx/x>tolerance
if neff~=sqrt((ncl^2)+(a*(x+dx))*(nco^2-ncl^2));
dx=dx/2;
else
    x=x+dx;
end
end
route(m)=x;
dx=increment;
    x=1.0001*x;
end

%neff=route(40:end);
neff = [1.4:0.001:1.43];
Nn = numel(neff);
LiamB(Nn) = 0;
%neff = 1.45;

V =(2*pi/design_lambda)*a*sqrt(nco^2-ncl^2); % normalize frequency

%A=design_lambda/(2*neff); % Grating period 5.36e-7;

A = 5.36e-7;

lambda=(1400.50e-9:0.005e-9:1600.50e-9); % Spectra range

%=====
=====
% Coupled-mode Theory
%=====
=====

v=1; % visibility, v assumed to be 1
k=(pi./lambda)*v*dn; % AC coupling coefficient
% DC(period averaged) coupling coefficient

% for stronger grating, sigma_dc assumed to be 0
sigma_dc =0; %(2*pi./lambda).*dn;

% general DC coupling coefficient
sigma = 2*pi*LiamBB(1,2)*(1./lambda - 1/(2*LiamBB(1,2)*LiamBB(1,3))) +
sigma_dc;

```

```

%=====
=====
% Power Reflection coefficients(R)
%=====
=====
    K2 = k.*k;
    sigma2 = sigma.*sigma;
    difference = K2-sigma2;
    up = sinh(L*sqrt(difference)).^2;
    down = cosh(L*sqrt(difference)).^2 - sigma2./K2;
    R = up./down;
    [maxR, maxI] = max(R);
    LiamB(I) = lambda(maxI);

%Rt = transpose(R);

%=====
=====
% plots for reflection spectra for Bragg reflector
%=====
=====

```

```

figure
plot(lambda,R,'b');
%axis( [1549.50e-9, 1550.50e-9, 0, 1]);
title('Reflection Spectra of Bragg grating');
xlabel('Wavelength(m)');
ylabel('Reflectivity(p.u)');

```

3. Zfunction.m функциясы

```

a=1;
b=5;
x=(0:0.01:10);
mu=1./(1+ ((x-b)/a).^2);
plot(x,mu);

```

4. GetLineParam.m функциясы

```

function [a,b] = GetLineParam(X,Y)
meanX=mean(X);
meanY=mean(Y);

```

```
b=sum((X-meanX).*Y)/sum((X-meanX).^2);
a=meanY-b*meanX;
```

5. GetLiambdaSpectre.m функциясы

```
function [R] = GetLiambdaSpectre(lambda,Params)
% lambda область спектра
```

```
%=====
```

```
=====
% параметры волокна
```

```
%=====
```

```
=====
L = 0.01; % длина решетки
```

```
dn = 1.0e-4; % шаг изменения показателя преломления
```

```
neff = Params(1); % значение neff
```

```
A = Params(2); %значение периода решетки
```

```
v=1;
```

```
k=(pi./lambda)*v*dn; % AC коэффициент связи
```

```
% для жесткой решетки предполагается, что sigma_dc = 0
```

```
sigma_dc =0;
```

```
%sigma_dc =(2*pi./lambda).*dn;
```

```
% Вычисляем длину отраженной волны в зависимости от neff и периода
решетки
```

```
% главный DC коэффициент связи
```

```
sigma = 2*pi*neff*(1./lambda - 1/(2*neff*A)) + sigma_dc;
```

```
K2 = k.*k;
```

```
sigma2 = sigma.*sigma;
```

```
difference = K2-sigma2;
```

```
up = sinh(L*sqrt(difference)).^2;
```

```
down = cosh(L*sqrt(difference)).^2 - sigma2./K2;
```

```
R = up./down;
```