

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу Университеті

ӘОЖ 53.087.92

Қолжазба құқығында

Хабай Анар

**Температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчикті зерттеу
және өңдеу**

6D071600-АСПАП ЖАСАУ

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілері:
Физика-математика ғылымдарының кандидаты
Бактыбаев М.К
Чжэцзян атындағы ғылым және
технология университеті
профессоры Чжи Ван

**Қазақстан Республикасы
Алматы, 2018**

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР	4
АНЫҚТАМАЛАР	5
БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР	6
КІРІСПЕ	7
1 ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫ АНЫҚТАУДЫҢ ЖАЛПЫ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ӨЛШЕЙТІН ДАТЧИК ТҮРЛЕРІНЕ ШОЛУ ЖАСАУ	14
1.1 Температураны өлшеу әдістері.	16
1.1.1 Температураны өлшейтін датчиктер	17
1.2 Ылғалдылықты анықтау әдістері	20
1.2.1 Ылғалдылықты анықауға арналған датчик түрлері	23
1.3 Температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчиктерді талдау	26
1.3.1 Металл оксиды негізіндегі жартылай өткізгішті температурамен ылғалдылықты анықтауға арналған датчик	27
1.3.2 Ылғалдылықты анықтау режимі	28
2 ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚ НЕГІЗІНДЕГІ ЛАЗЕРЛЕР АРҚЫЛЫ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ЗОНТТАУ ӘДІСТЕРІНЕ ТАЛДАУЛАР ЖАСАУ	34
2.1. Оптикалық талшықтағы жарықтың таралуы	34
2.2.1 Оптикалық талшықты датчиктер	39
2.2.2 Фемтосекундты лазерлі индуцирленген оптикалық талшықты Брэгг торлары	42
2.2.3 Фемтосекундтық лазердің индуцирлеу индексінің өзгеру механизмі	42
2.2.4 Еркін электронды плазманың пайда болуы	43
2.2.5 Индексті өзгертудің индуцирленген режимі	44
2.2.6 Лазерлерде оптикалық талшық негізіндегі Брэгг торлары қабаттасудың фемтосекундтық әдістері	47
2.2.7 Оптикалық талшық Брэгг торларының жоғары температурада қолданылуы	51
2.2.8 Жанармай сұйылтылған қабатты сұйықтығы бар жану камерасының оптикалық талшық негізінде қадағалау технологиясы	54
2.2.9 Оптикалық талшықтың датчик негізіндегі газ турбиналарының симулятор мониторингі	55
2.2.10 Оптикалық талшықты таяқшадағы 2 талшықты Брэгг торларының қолданылуы	57
2.2.11 Микроқұрылымданған талшықтардағы II типті FBG	60
2.2.12 Жақұтты талшық Брэгг торлары	61
2.3. Жоғары иондаушы радиациялық орта	63
2.3.1 Өте қолайсыз жағдайларда көп параметрлік оптикалық	63

	талшықты датчиктермен зондтау	
2.3.2	Оптикалық талшықты датчиктердің жоғары қысымда қолданылуы	66
2.4	Жоғары деңгейде өлшеу үшін оптикалық талшықты Брэгг торларын пайдалану	67
2.5	Чирптелген Брэгг талшығы энергетикалық материалдардағы соққылық толқынды анықтау үшін арналған .	70
3	ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫ БІР УАҚЫТТА ӨЛШЕЙТІН ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТЫ ДАТЧИКТЫ ТАЛДАУ	72
3.1	Фс-ТБТ негізіндегі талшықтың температурасын лазердің көмегімен бақылау	72
3.1.1	Оптикалық Брэгг талшықты торларын пайдалану технологиясы	73
3.2	Фабри –Перо (интерферометр) резонаторы	81
3.2.1	Резонатордың жоғалуы, жарықтан тыс жарықтың пайда болуы, резонанстық жиіліктер және спектральды сызық пішіндері	81
3.2.2	Джордж Айидің талдауы (Generic Airy distribution) ішкі резонансты күшейту коэффициенті	83
3.3	Температурамен ылғалдылықты анықтауға арналған датчикті талдау	83
3.3.1	Оптикалық талшықты Брэгг торының температураға кері шағылуы	83
3.3.2	Фабри-Перот интерферометрдің әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімталдығы	85
4	ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫНЫ ДАЙЫНДАУ ЖӘНЕ НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ	85
4.1	Әр түрлі толқын ұзындықтарын бір-біріне қатыссыз өткізетін Оптикалық циркулятор	86
4.2	Оптикалық-талшықты оқшаулағыш	87
4.3	Ылғалдылыққа сезімтал агроза гелінің дайындалу технологиясы	89
4.3.1	Салыстырмалы ылғалдылыққа байланысты сезімталдықа тәжірибе жасау және нәтижелерді талдау	91
4.4	Температураға байланысты талдаулар нәтижесі	97
	ҚОРЫТЫНДЫ:	101
	ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ ЖӘНЕ	104
	ҚОСЫМШАЛАРЫ	114

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі нормативті құжаттарға сілтемелер берілген: ҚР МЖМБС 2011жылғы 5.04.034 – «Қазақстан Республикасының Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты. Жоғары оқу орынан кейінгі білім. Докторантураның негізгі ережелері (2012 жылғы «23» тамыздағы № 1080 өзгертуі); Ғылыми дәреже беру ережесі 2011 жылғы 31 наурыздағы № 127 Мемлекетаралық стандарттар: МЕСТ 7.32-2001 (2006ж. өзгерту). Ғылыми-зерттеу есебінің құрылымын жобалау ережелері; МЕСТ 7.1-2003. Библиографиялық жазбалар. Библиографиялық сипаттамасы. Жалпы талаптар және жобалау ережелері. ҚР Білім және ғылым министрімен бекітілген 2011 жылғы «17» маусымдағы № 261. Астана, 2011.

Рекомендация МСЭ-Т L.1310 - Показатели и методики измерения для оборудования конвергированных пакетных оптических сетей, обладающего функциями как передачи пакетных сигналов, так и сигналов TDM.

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.

АНЫҚТАМАЛАР

Шағылу – жарық сәулесінің екі түрлі ортаның шекарасында бағытын өзгертіп, өзінің келген ортасына қайтуы.

Жарық дисперсиясы деп заттың сыну көрсеткішінің жарықтың толқын ұзындығына тәуелділігіне негізделген құбылысты айтады.

Snell (снелл) заңы – екі мөлдір медианың шекарасында жарық сынуын сипаттайды. Сондай-ақ, басқа табиғат толқындарының сынуын сипаттау үшін қолданылады.

Фемтосекундтық лазер – оптикада ультрафиолтты жарық сәулесі - уақыттың ұзақтығы пико-секунд (10^{-12} секунд) немесе оданда аз болатын электромагниттік импульс. Мұндай импульс кең жолақты оптикалық спектрге ие және құлыпталған режимді осцилляторлар арқылы жасауға болады. Мұндай қысқа импульстардың генерациясы әрдайым пассивті режимді құлыптау әдісімен жеткізеді.

Оптикалық талшық – шыны (кремний) немесе пластиктен жасалған, адам шашына қарағанда сәл қалың диаметрдегі икемді, мөлдір талшық[1]. Оптикалық талшықтар көбінесе талшықтың екі ұшы арасында жарық беру құралы ретінде пайдаланылады және талшықты-оптикалық байланыста кеңінен қолданылады.

Оптикалық талшықты Брэгг торлары – оптикалық талшық арнасына, ядросына орнатылған оптикалық фильтр.

Оптикалық-талшықты оқшаулағыш – оптикалық талшықты байланыс үшін пайдаланылатын пассивті компонент.

Жұқа пленкалық интерференция – табиғи құбылыс болып табылады, онда жұқа пленкалардың жоғарғы және төменгі шекараларында көрінетін жарық толқындары бір-бірімен қабаттасып жарықты күшейтетін немесе азайтатын құбылыс.

Спектрлік сызықтың пішіні (Spectral line shape) – атом, молекула немесе иондағы энергия өзгеруіне сәйкес келетін спектроскопияда байқалатын ерекше нысан.

Бір модальды талшық – жарықты тарату кезінде тек бір моданы (бағытты) ғана қолдайтын оптикалық талшық, бұл жағдай шекаралық толқын ұзындығынан асқан жағдайда болады.

Поляризатор – жарық толқындарын электр өрісінің белгіленген бағытында өткізетін құрылғы.

Сыну көрсеткіші (Refractive index) – оптикалық тығыз ортада мысалы: шыныда, вакуумге қарағанда жарық жылдамдығының қаншалықты кем екенін білдіретін коэффициент. Сыну көрсеткіші екіге бөлінеді: фазалық және топтық болып. Сыну көрсеткіші вакуумнен басқа оптикалық ортада толқын ұзындығына байланысты болады.

БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

ХКТШ- халықаралық классикалық температуралық шкала

СЫ – салыстрмалы ылғалдылық

ТБТ – талшықты Брэгг торлары

ОТБТ – оптикалық талшықты Брэгг торлары

БШТК – Брэгг шағылдырғышынан таралған конфигурациясы

ФПИ – фабри перо интерферометр

Фс-ИК –фемтосекундты инфрақызыл сауле

n_{eff} – бақыланатын зондты жарық режимін басқаратын, талшықты торлар арқылы таралатын тиімді сыну көрсеткіші.

L_G - қоршаған ортаға байланысты оптикалық талшықтағы толқын арнасындағы сезгіштік

l – Фабри-Перот резонаторының екі айнасының геометриялық ұзындығы

c_0 - вакуумдағы жарық жылдамдығы,

$\Delta\mathcal{V}_{FSR}$ - еркін спектральды диапазон

R_i – i айнаның шағылыстыру шамасы

q – әрбір резонатордың режим индексі, $q[-\infty, \dots - 1, 0, 1, \dots, \infty]$ аралықтағы бүтін сан

$\mathcal{V}_q$ – резонанстар жиілігі

E_q – белгілі жиілікте ыдырайтын электр өрісі

$\hat{A}$ – Airy басқа үлестірімі

λ_B - Брэгг толқынының ұзындығы

Λ – тордың периодтық кезеңі

$\Delta\lambda_{BT}$ – ΔT температурадағы ϵ деформациядан туындаған Брэгг толқын ұзындығы

P_e –фотоэластикалы тұрақтылығы

a – жылу кеңейту коэффициенті

ξ –оптикалық талшықтың термо-оптикалық коэффициенті

E_0 – берілген электр өрісі

$\varphi_{пф}$ - айнарудың фазалық ығысуы

n_A - Агарозалық сыну көрсеткіші

КІРІСПЕ

Жұмыстың жалпы сипаттамалары. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан, пайдаланған әдебиеттерден және қосымшалардан тұрады.

Диссертациялық жұмыстың бірінші бөлімінде температура мен ылғалдылықты анықтаудың жалпы әдістері мен өлшеу датчиктері қарастырылды. Температураны анықтайтын кедергілі термометрлер, Кварц резонаторлары негізіндегі температура датчиктер, интегралды датчиктер. Сыйымдылықты термометрлер, температуралық және ылғалдылық датчиктерінің сезімталдылығының анықтаулары, ылғалдылықты анықауға арналған датчик түрлері, сондай-ақ, металл оксиді негізіндегі жартылай өткізгішті температурамен ылғалдылықты бір уақытта анықтауға арналған датчиктің схемасы қарастырылды, қорытынды жасалды.

Екінші бөлімінде оптикалық талшықты лазерлік сәулеленумен талшықты Брэгг торларының көмегімен қоршаған ортаның қатаң зондауда өндірісі саласындағы соңғы жасалған жұмыстар мен қолданылулар, сондай-ақ лазер мен материалдардың арасындағы өзара фемтосекундтық әрекеттесу теориясының кейбір алғышарттары қарастырылды. Фазалық маска немесе «нүктеден кейін нүкте» әдісін пайдаланып фемтосекундты инфрақызыл және көрінетін лазерлермен кремний диоксиді негізіндегі оптикалық талшықтарда жасалынған Брэгг торына сәйкес әсер ету шарттары талданған. Талшықты Брэгг торлары мен талшықтардың ерекше геометриясын пайдаланып, жарықтың әр түрлі параметрлері арқылы өлшеулер жүргізілді. Таза кремний диоксиді, радиацияға төзімді фторидты легирленген диоксиді немесе микрокернауленген таза кремний диоксидтер негізіндегі фотонды-кристалл талшығы және шыны талшықтардан жасалған датчиктер мұнай және газ саласында пайдаланылған, олар сутегінің өтуіне, радиациялық иондалуына ұшырамайды, сондықтан оларды ядролық өнеркәсіпте пайдалануға болады. Температура 1300°C-дан жоғары болған жағыдайларда, оптикалық сапфир негізді талшықтарында орнатылған Брэгг торларының көмегімен анықталады. Сапфирден жасалынған ТБТ реактивті қозғалтқыштар, көмірді газдандыру реакторларында және электр энергиясын өндіруде, табиғи газ турбиналарында жанудың қатаң шарттары үшін жоғары температураны және қысымды өлшеуде қолданылуы. Сондай ақ кристалды талшыққа негізделген ылғалдылықты анықтауға арналған талшықтық датчиктердің көптеген түрлері қарастырылған.

Үшінші бөлімінде температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшеуге арналған оптикалық талшықты датчикке талдаулар жасалынды. Фабри -Перо интерференциясына негізделген оптикалық талшықтың салыстырмалы ылғалдылық сезімталдылығын Джордж Айидің ішкі резонансты күшейту әдісі негізінде талдаулары жасалды. Оптикалық талшықты Брэгг торларының (ОТБТ) белгілі бір спектрлерді кері шағылыстыру фемтосекундық эффектісіне негізделіп температураға байланысты талшықтың деформациялық өзгерісі

арқылы температураны анықтауға болатындығы жайында дәлелдер ұсынылды. Осы талдаулар негізінде температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін оптикалық талшықты датчиктің жұмысына теориялық талдаулар мен математикалық моделдеулері жасалынды.

Төртінші бөліміде экспериментте алынған нәтижелерге талдаулар жасалынды. Тәжірибелік қондырығыдағы оптикалық талшықты анализатор, оптикалық циркуляторды, оптикалық-талшықты оқшаулағыш, сезімтал агрозоа гелін қолдану технологиясы қарастырылды. Сондай ақ оптикалық талшық негізіндегі температура мен ылғалдылықты өлшейтін датчиктен тәжірибе барысында алынған нәтижелерге сәйкес датчиктің өлшеу дияпозоны қарастрылды. Жалпы жұмыс қорытындыланды.

Жұмыстың өзектілігі. Температура мен ылғалдылық датчиктері микроэлектроникалық өндірісті технологиялық бақылауда, химия, биология, метеорология, электроника, автомобильдер метеорологиясы, ауыл шаруашылығын бақылауда, жүйелерді энергиямен қамтуда және коптеген медициналық техниканың өлшеу және бақылау салаларында кеңінен қолданылуда. Қазіргі уақытта түрлі физикалық принциптерді қолданатын көп сандық датчиктер бар. Дегенмен, датчиктердің сезгіштік, селективтілік, сенімділігін және жауап беру уақыттарын одан әрі жетілдіру қажет.

Температураны және ылғалдылықты өлшеу әдістеріне, температурамен ылғалдылықты өлшейтін датчик түрлерімен танысу және оларға талдау жасау. Қазіргі таңда қолданыстағы ылғалдылық пен температураны бір уақытта өлшейтін датчиктер бар [1-4]. Алайда оптикалық талшық негізіндегі ылғалдылық пен температураны бір уақытта өлшейтін датчик жоғары сезімталдыққа, тез жауап беруге, ықшамды көлеміне және анти-электромагниттік кедергі сияқты артықшылықтарына байланысты қызығушылығымен зерттелді.

Ылғалды ортада жұмыс істеуге арналған ағзаға имплантацияланған электронды құрылғылар ағзаға кірген кезде интегралды схемасының белсенді аймағында ылғалдылық нәтижесінен конденсация, коррозия пайда болады. Бұл құралдың эффективтілігін жоғалтып құрылғының жұмыс істемей қалуына алып келеді. Микропроцессорлық жүйелердің құрғақ екендігін тексерудің ең тікелей жолы оның ішкі салыстырмалы ылғалдылығын өлшеуге арналған датчикті пайдалану. Қазіргі кезде чипте орналасқан электроникасы бар қосымша металл-оксидті жартылай өткізгіш негізіндегі ылғалдылық датчигі бар [6]. Ол бейорганикалық пассивация қабатымен жабылған, полиимидті пальпокпен қамтылған өзара бөлінген конденсатор негізіндегі жоғары сапалы ылғал сезгіш датчигтер бар. Алайда, ол кеңейтілген өңдеу қадамдарын қажет етеді. Әрі датчик үшін қажетті аймақ өте үлкен (4~2мм) [6]. Мысалы, микроаппаратпен имплантацияланатын стимуляторларды кішкентай датчикті қамтамасыз ету керек. [7-14] Біздин мақсатымыз температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчик құрылымы және чиптің қажетті аймағы едәуір азайтылған салыстырмалы ылғалдылықты және температураны бірге анықтайтын датчикті қарастыру.

Талшықты оптикалық датчиктер ішкі электромагниттік әсерлерге ұшырамайды. Талшықты оптикалық материалдар кең қолданылатын және арзан материалдардан дайындайды. Қазіргі таңда кварцтық талшықты оптиканың бағасы мыс сымның бағасынан арзан.

Соңғы жылдарда, оптикалық талшықты лазерінің ішкі сезімталдығына негізделген датчиктер кеңінен зерттелді, өйткені олардың спектрлі резонансы шыңның көрінуін жақсартылды және өткізу қабілеттілігі 3-дБ-ге жеткізілді. Оптикалық талшықты лазерлерге негізделген ішкі сезімталдылықты дамыту арқылы датчиктердің сигналдың шуылға қатынасы жақсартылды, ал тар диапозондағы 3 дБ өткізу сенсорлық желінің сыйымдылығын арттырды.

Жұмыстың мақсаты мен міндеттері. Электромагнит қарсылықты қасиетке ие оптикалық талшықты лазерінің ішкі сезімталдығына негізделген температура мен ылғалдылықты бір уақытта анықтайтын датчикті талдау.

Зерттеу барысында төмендегідей мәселелерді шешу қажет:

1. Оптикалық талшықты лазерге негізделген қоршаған ортаны зондауда қолданылған ғылыми жұмыстың тақырыбына сәйкес келетін негізгі ғылыми жұмыстарға шолу жасау;

2. бір бағытты режимдегі оптикалық талшықтың температураға байланысты функционалды өзгеру коэффициенті бар. Осы талшыққа орналастырылған Брэгг торларынан кері шағылатын фемтосекундтық лазердің фазалық ығысуына талдау жасау арқылы температура өзгерісін қадағалау.

3. ФПИ интерферометріне негізделген ылғалдылық сезімтал агроза гелінің әсерінен резонанстық күшейу арқылы ылғалдылық анықталған.

4. Оптикалық талшық негізінде температурамен ылғалдылықты өлшеу әдістері қарастырылып математикалық модельдері құрылып тәжірибе жүзінде тексерулер жүргізу.

Мақсатқа жету үшін келесі міндеттерді шешу қажет. Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленумен талшықты Брэгг торларының көмегімен қоршаған ортаның қатаң зондауда өндірісі саласындағы соңғы жасалған жұмыстар мен қолданылуларға, сондай-ақ лазер мен материалдардың арасындағы өзара фемтосекундтық әрекеттесу теориясының кейбір алғышарттарын қарастыру. Кристалды талшыққа негізделген ылғалдылықты анықтауға арналған талшықтық датчиктердің көптеген түрлерін қараstrу [15-18]. Оптикалық талшықты температураны өлшеуде қолдану әдістерін талдау [20]. Оптикалық талшықты Брэгг торлы шағылыструдың негізіндегі сезімталдықтар [20-23] және Фабри-Перот интерферометрлері [14-15], біртекті оптикалық талшықтар [16-23] басылымдарда талқыланған. Агроза гелінің шығыны төмен, дайындалуы оңай және тиісті есептерде жақсы көрсеткіштерге ие, сондықтан салыстырмалы ылғалдылық үшін кеңінен қолданылады [24-25]. Талшықты оптикалық сезімталдықты жақсарту үшін бұларды гигроскопиялық материалдардан жасайды, мысалы Агроза гелі, графен оксиді, поливинил спирті, SiO₂, WS₂ және SiO₂, WS₂ сияқты т.б. Қазіргі кезде көптеген оптикалық датчиктер пассивті кең жолақты жарық көзімен жұмыс істейді. Соңғы жылдарда, оптикалық талшықты лазерінің ішкі сезімталдығына негізделген датчиктерде

кеңінен зерттелді, өйткені олардың спектрлі резонансының шынның көрінуін жақсартылды және өткізу қабілеттілігі 3-дБ-ге жетті [26-30]. Оптикалық талшықты лазерлерге негізделген ішкі сезімталдылықты жақсарту арқылы датчиктердің сигналдың шуылға қатынасы жақсартылды, ал тар диапазондағы 3 дБ өткізу сенсорлық желінің сыйымдылығын арттырады.

Осы қарастырған нақты мәлімдемелерге сүйене отырып диссертациялық жұмыс екі негізгі сезгіштік принципен қарастырған: (1) Фабри-перо интерферометрі әдісімен ылғалдылыққа сезімтал агрозалық шағылыструдан пайда болатын; (2) температура өзгерісіне тәуелді талшықтың деформациялық өзгерісі арқылы оптикалық талшықты Брэгг торларынан (ОТБТ) кері шағылған спектрлердің фазалық ығысу негізінде температура анықтаған.

Жоғарыда келтірілген оптикалық датчиктермен қашықтықтан мониторинг жүргізуге болады. Фемтосекундтық Инфрақызыл сәулеллік (фс-ИК) ТБТ лазерлік конструкция негізіндегі белсенді датчиктік құрылғыларды жасау үшін сирек сілтілік элементтермен легирленген активті талшықтар[31-32] пайдалану керек. Талшықтағы белсенді аймақ ол ішкі өзекшеде орнатылған Брэгг торларының кері фс шағылыстру спектрі. Бұл бізге талдау жасауға қажетті конфигурациясы болып табылады. Талшықты лазер негізіндегі осы белсенді датчиктер тек қана I типті ТБТ көмегімен жүзеге асырылады. Жоғары температура немесе жоғары оптикалық қуат жағдайы үшін I типті ТБТ қатаң шарттарға төзімсіз болады. Жоғары температурада жұмыс істей алатын талшықты лазердің қуысын жасау үшін термиялық тұрақты регенерацияланған торлар пайдаланылады. Регенерацияланған торлардың әдетте шағылдыру қабілеті төмен болады, әрі сәйкесінше талшықты лазердің резонаторының кейбірі [33-34] өлшеу талабындағы конфигурацияларына сәйкес келмейді.

Фабри-Перот резонаторының спектрлік реакциясы, оған шығарылған жарыққа және резонатор арасындағы интерференцияға негізделген. Құрылымдық интерференцияда шағылған екі лазер фазалары резонатор ішіндегі жарықтың резонанстық жақсаруына[35] алып келеді. Егер екі сәуленің фазасы қарама-қарсы болса, іске қосылған жарық әлсіреп белгілі бір бөлігі резонатордың ішіне сақталады[36]. Әйнектен қайта өтетін жарықта пен әйнектен шағылатын жарықта интерференция құбылыс пайда болады. Біз осы негізгі принципке сүйене отырып екінші айна орынына ылғалға сезімтал жұқа пленканы пайдаланып жарықтың өтімділігінің артуына сәйкес ылғалдылықты анықтау принципін пайдаландық.

Қорғауға ұсынылатын жаңа тұжырымдар:

1. Оптикалық бір бағытты режимдегі талшық және оған Брэгг торлары орналастырылған, оның көлденең қимасы жарты-рефлексиялық шынымен жабылып ол Фабри-Перот интерферометрының (ФПИ) вакуумдық қуысына жалғасады. ФПИ вакуумдық қуысында кремний диафрагмасына құйылып дайындалған ылғалдылыққа сезімтал агроза гелі бар. Ұзындығы h (жарықтың ең жоғары толқын ұзындығы $\lambda = 1500 \text{ nm}$ деп берілген, мынаған тең $\lambda_m = \frac{2h}{m}$) деп анықталған қуыстың алдыңғы және артқы екі шағылыстратын беті бар, екіншісі ылғалдылыққа сезімтал агроза гелі. Бұл екі беттен шағылысқан жарық арасында

интерференция өзгерісі арқылы ылғалдылық өзгерісін анықтау. Оптикалық бір бағытты режимдегі температураға байланысты функционалды өзгеретін талшыққа орналастырылған Брэгг торларынан кері шағылатын фемтосекундтық лазердің фазалық ығысуымен температураны анықтау әдісін қарастыру.

2. Жоғарыдағы талдаулар негізінде жасалған тәжірибелік нәтижелерді негізге ала отырып температура мен ылғалдылық бір уақытта өлшейтін микроқұрылымды, ішкі электромагниттік әсерлерге иммунитетті датчиктің жұмысын ұсыну.

3. Тәжірибелік және нақты берілген мәндерге сүйене отырып температура мен ылғалдылықты өлшеу датчигінің өлшеу диапазонын анықтау.

Зерттеу нысаны. Оптикалық талшықты лазерінің ішкі сезімталдығына негізделген температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін электромагниттік әсерлерге ұшырамайтын микроқұрылымды датчиктің жұмысын анықтау.

Зерттеуде мәні. Қазақстанда, сондай-ақ, дүние жүзілік техникалық процестердің үнемі жетілуі, өнім сапасын қамтамасыз етуге және энергия шығындарын үнемдеуге қатаң талаптар қойылуы, электроника, жұқа үлдірлі технология, материалтану саласындағы сандық және сапалық талаптардың артуына байланысты ауаның сапасы яғни дымқылдық пен температурасын қадағалау маңызды мәселенің біріне айналып отыр.

Зерттеу әдістері. Оптикалық бір бағытты режимдегі температураға байланысты функционалды өзгеретін талшыққа орналастырылған Брэгг торларынан кері шағылатын фемтосекундтық лазердің фазалық ығысуымен температураны анықтау әдісін қарастыру.

ФПИ интерферометріне негізделген ылғалдылыққа сезімтал агроза гелінің әсерінен резонанстық күшейту нәтижесінде ылғалдылықты анықтау.

Ғылыми жұмыстың жаңалығы. Диссертациялық жұмыс нәтижелерінің ғылыми құндылығы – температура мен ылғалдылық бір уақытта өлшейтін оптикалық талшықтың ішкі сезімталдылығына негізделген микроқұрылымды электромагниттік әсерлерге иммунитетті датчиктің жұмысының ұсынлуы.

Зерттеу тәжірибелік құндылығы ылғалға сезімтал агрозалық гель негізінде ПФИ-ның шағылыстру резонансының ылғалдылыққа байланысты сызықты артуы және Брэгг торларының кері бағыттағы шағылыструы фемтосекундтық лазердің фазалық ығысу арқылы температураны анықтаудағы сенімділігі, сондай ақ, диссертацияда алынған нәтижелерді халқаралық басылымдарға беруге негізделеді.

Теориялық маңыздылығы. Фемтосекундты лазерлі ТБТ температураға байланысты ерекше қасиеттерге ие, олар әртүрлі әдістермен өндіріледі, сонымен қатар, оларды қатаң жағдайларда әртүрлі қадағалаушы құралдарда өлшеуіш қосымшалар үшін қолдануға болатындығы негізіндегі соңғы жылдарда қолданысқа енген жұмыстармен ғылыми басылымдардағы материалдар қарастырылды. Сондай ақ, ылғалдылыққа сезімтал Фабри-Перот интерференциясының спектрлік резонансы математик және астроном Джордж Бидделл Айидің талдауларына сүйене отырып анықталды.

Практикалық қолдану. Ылғалды ортада жұмыс істеуге арналған ағзаға имплантацияланған электронды құрылғылар ағзаға кірген кезде интегралды схеманың белсенді аймағында ылғалдылық нәтижесіненен конденсация, коррозия пайда болады. Бұл датчиктің эффективтілігін(тиімділігін) жоғалтып құрылғының жұмыс істемей қалуына алып келеді. Микрокабельді функционалдың құрғақ екендігін тексерудің ең тікелей жолы, оның ішкі салыстырмалы ылғалдылығын өлшеуге арналған датчикті пайдалану. Мысалы, микроаппаратпен имплантацияланатын стимуляторларды көлемі өте кішкентай өлшеу қаблеті жоғары, сенімді, әрі электромагнитік әсерлерге ұшырамайтын датчикпен қамтамасыз ету керек. Бұл температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчик құрылымы жеңілдететін және чиптің қажетті аймағын едәуір азайтылған салыстырмалы ылғалдылық пен температураны бірге анықтайтын датчикті қарастыруды талап етеді.

Автордың жеке қосқан үлесі. Берілген тапсырмаларға сай теориялық талдаулар жасап теңдеулер құрдылды, тәжірибелер жүргізілді, алынған нәтижелерді синтездеу және түсіндіру. Осы алынған нәтижелер мен талдауларға негізделі отырып мақалалар мен есептер жазу.

Жұмыстың көлемі және құрылымы. Диссертациялық жұмыс 122 парақтан тұрады, 70 сурет және 5 кестесі бар. Жұмыс кіріспеден әдеби шолудан, зерттеу нәтижелерінен және оларды талдау мен қорытындылаудан тұрады. Диссертациялық жұмыста 129 әдебиет қолданылған.

Нәтижелердің сенімділігі және негізділігі

Диссертациялық жұмыс нәтижелерінің сенімділігі және негізділігі - барлық алынған эксперименттік зерттеулер оптикалық талшықтың ішкі сезімталдығына негізделген заманға сай ғылыми теориялық әдістермен сәйкес келеді.

Диссертациялық зерттеудің нәтижелері бойынша келесі қорытындылар жасалды. Диссертациялық жұмыста негізгі мынадай ғылыми нәтижелер алынған:

ФПИ әдісіне негізделген салыстырмалық ылғалдылықты өлшеу 20%-98% диапазонында жүргізілген. Қоршаған ортаның ылғалдылығы өзгерген кезде және салыстырмалы ылғалдылық 10% бойынша өзгергенде талшықты лазердің шығу спектрі -36.78 дБм-ден -22.61 дБм дейін артады. Тиісінше сенсор сигналының шуылға қатынасы 30 дБ-ден 45 дБ-ға дейін артқан және өткізу қабілеті 3-дБ, ол 0,05 нанометр кем болған. Ылғалдылық сезімталдығы 0.183 дБ/% , температура сезімталдығы $0.117 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ деп өлшенеді. Тәжірибеде датчиктің жақсы сызықты екенін көрсетілген. Агрозаның сыну индексі 1,45-ден 1,48-ге дейін. Тәжірибе нәтижесі сенсордың ылғалдылыққа сызықты жауап беретінін көрсетті. Температураға байланысты талшықты Брэгг торларының t өзгерісі $-50\text{ }^\circ\text{C}$ дан $130\text{ }^\circ\text{C}$ сәйкесінше ξ деформация 8.75×10^{-4} м ден - 0.00122 дейін өзгереді.

Датчиктің болжамды жауап беру уақыты 72 микросекунд тез болған. Қалпына келу уақыты шамамен 357 микросекунд.

Датчиктің тұрақтылығын талдау үшін 180 минут ішінде қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығын 65% және 95% деңгейінде белгілеу арқылы толқын ұзындығы мен шығу қуаты өлшенген.

Толқын ұзындығы мен қуат ауытқуының стандарты сәйкесінше 65% салыстырмалы ылғалдылық кезінде 0.101 нанометр және 0.129 дБм болған, ал стандартты ауытқулар 95% салыстырмалы ылғалдылық кезінде тиісінше 0.046 нанометр және 0.137 дБм құрайды. Нәтижелер датчиктің жақсы тұрақтылыққа ие екендігін көрсетеді. Датчикте процесс жақсы қайталанатындығын көрсетеді, ылғалдылыққа сезімталдығы мен нақты ауытқуы шамасы $\pm 2\%$ -данда аз, ал температураға байланысты $\pm 1\text{C}^0$ шамасында боғаны анықталған.

1. ТЕМПЕРАТУРАНЫ ЖӘНЕ ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫ АНЫҚТАУДЫҢ ЖАЛПЫ ӘДІСТЕРІ МЕН ӨЛШЕЙТІН ДАТЧИК ТҮРЛЕРІНЕ ШОЛУ ЖАСАУ

1.1 Температураны өлшеу әдістері

Техниканың әр түрлі салаларында, ғылымда және адам тіршілігінің көптеген салаларында температураны өлшеу температураны сәйкес құралдардың көмегімен тікелей өлшегенде қандай да бір физикалық шаманы түрлендіру арқылы жүзеге асырылады. Бұл кезде өлшеу құралдары үлгілі аспаптардың көмегімен градуирленеді және олардың санағы немесе шығыс сигналы Халықаралық классикалық температуралық шкала (ХКТШ) бойынша өрнектеледі. Осылайша, Кельвинмен немесе Цельсий градусымен температураны тура өлшеу жүзеге асырылады[38].

Температураны басқа физикалық шамаға түрлендіру қажеттілігі: бірінші ретті түрлендіргіш блогы деп аталатын өлшеу құралының атауынан көрініс табады.

Алғашқы ретті түрлендіргішті градуирлеу операциясы U шығыс сигналының кіріс сигналына – t температураға тәуелділігін эксперименттік анықтаудан тұрады. Мұндай тәуелділік градуирлік сипаттама немесе түрлендіргіштің статикалық сипаттамасы деп аталады. Көптеген түрлендіргіштер үшін $U(t)$ градуирлік сипаттамасы бейсызық болып табылады. Кейбір жағдайда бұл тәуелділік сызықты болады:

$$U = kt \quad (1.1)$$

Бұл жерде k – түрлендіру коэффициенті.

Негізінен, температураны тура өлшеу $U(t)$ тәуелділігін есептеу немесе $U(t)$ градуирлік графигінің немесе градуирлік кестенің көмегімен белгіленетін өлшеу аспабының шкаласы бойынша жүзеге асырылады.

Түрлендіргіштің жұмыс диапазонының ішінде $U(t)$ мәні температураның үздікті мәндерінде анықталады, сонымен бірге t -ның осы мәндерінің әрқайсысы U шығыс сигналының мәндерін есептеу барысында тұрақты болып қалады.

Осы типтегі түрлендіргіштер үшін орнатылған орташаландырылған статикалық сипаттама түрлендіргіштің номинал статикалық сипаттамасы деген атаумен аталады.

Температурасы өлшенетін нысанмен бірінші ретті түрлендіргішті контактілеу сипатына байланысты температураны өлшеу әдістерін негізгі екі топқа – контактілі және контактісіз деп бөледі.

Температураны контактілі өлшеу әдістері; Температураны өлшеудің контактілі әдістері деп қолданылуы бірінші ретті түрлендіргіштің өлшеу нысанымен механикалық контактінің болуын талап етеді және олардың арасындағы жылу алмасу жылу өткізгіштік және (немесе) конвекция арқылы жылу берілуімен анықталады.[38б., 12-15]

Өлшеудің көптеген контактілі әдістері бірінші ретті түрлендіргіштің шығыс сигналдарының өлшеу құралдарымен байланыс желісінің болуын талап етеді. Алайда олардың кейбіреулері байланыс желісінің қолданылады және

температураны есептеуді бақылаушы түрлендіргішсіз көзбен бақылап белгілеу арқылы жүргізеді.

Температураны өлшеудің контактісіз әдістері; Температураны өлшеудің контактісіз әдістерінің барлығы (пирометрия әдістері) нысанның жылулық сәулеленуінің қандай да бір қасиетін қолдануға негізделеді. Бұл сәулелену қашықтықта орналасқан қабылдағышпен қабылданады. Сонымен нысанның температуралық күйі туралы ақпаратты беру бірқатар жағдайда нысаннан қабылдағышқа жіберілетін бағытта бірқатар өзгерістерге ұшырайтын сәулелі энергиямен жүзеге асырылады.

Пирометрия әдістері нысанның сәулелену спектрінің сипатына байланысты екі негізгі топқа бөлінеді:

1) сәулелену спектрі тұтас денелер үшін (осындай спектр көптеген қатты денелер мен олардың қорытпалары үшін тән);

2) сәулелену спектрі сызықты немесе жолақты денелер үшін (газдар мен сұйықтықтардың атомдық және молекулалық спектрлері).

Пирометрия әдістерінің көпшілігі әр түрлі конструкциялық түрде жасалған өлшеу құралдарында жүзеге асырылған және отандық өндірісте кеңінен жаппай қолданылатын аспап ретінде сериялы шығарылады.

Температураны атомды немесе молекулалық спектрлер бойынша өлшеу әдістері қыздырылған газ ағындарын, жалынды, плазманы зерттеу үшін арналған спектралды аппаратураны пайдалана отырып қолданылады. Осы әдістердің кейбіреулері жылулық энергия қарқынды бөлінетін процестерде тепе-тең емес температураларды анықтау үшін қолданылады.

Қандай да бір әдісті таңдау нысанның сәулелену сипатымен, энергетикалық процестің уақыттық сипаттамаларымен анықталады.[38б., 19]

1.1.1 Температураны өлшейтін датчиктер

Резистивті термометр; Резистивті термометрия металл, қорытпа және жартылай өткізгіштердің активті электрлік кедергілерінің температураға тәуелділігін қолданатын температураны өлшеу құралдары мен әдістерін қамтиды. Резистивті термометрияда өлшеу түрлендіргіштерін кедергі термотүрлендіргіштері (КТ) деп атау қабылданған. Оларда температура өзгерісін электрлік кедергі өзгерісіне түрлендіретін сезімтал элементпен (СЭ) бірге негізінен қорғайтын қабы, бекіту тетіктері және СЭ оқшаулағышы, электрлік шығыстары болады. КТ көмегімен температураны өлшеудің құрылымды сызбасында КТ кедергісін өлшеу үшін арналған КТ, олардың арасындағы байланыс желісі бар. Кедергінің температураға тәуелділігі аналитикалық түрде кесте, графиктер, температура бірліктеріне градуирленген аспап шкаласы түрінде немесе өлшеу аспабының микропроцессорына орнатылған алгоритм көмегімен берілуі мүмкін.

КТ негізгі сипаттамалары: сезімталдық, түрлендірудің номинал статикалық сипаттамасы $R=f(t)$, тұрақтылық, СЭ конструкциясы мен материалымен анықталатын қолданылу диапазоны. $R=f(t)$ түрін анықтайтын процестер жеткілікті түрде күрделі, олардың сапалық жағы толығымен түсінікті болғанымен және теория металдардың, қорытпалардың және жартылай өткізгіштердің электрлік кедергісінің температуралық тәуелділігінің жалпы түрін болжауға мүмкіндік бергенімен, температураны өлшегенде КТ есептік сипаттамаларын қолдану үшін сандық бағалаулардың дәлдігі жеткіліксіз.[38б., 14]

Өзара әрекеттесу процестерінің қарапайым моделі үшін шашыраудың әр түрлі механизмдері бірінші жуықтауда p металдың меншікті кедергісіне аддитивті үлесін қосады, оны Матиссен ережесі деп атау қабылданған:

$$p = \sum_i p_i = \sum_i P_F / ne^2 l_i, \quad (1.2)$$

бұл жерде n – өткізгіштік электрондарының концентрациясы; e – электрон заряды; P_F – шекаралық фермилік импульс; l_i – шашыраудың нақты механизміне негізделген еркін жүру ұзындығы.

Жартылай өткізгіштердегі электрлік өткізгіштік екі типтегі: электрондар мен кемтіктердің – заряд тасымалдаушыларының қатысуымен анықталады. Өткізгіштік меншік немесе қоспалы, яғни жартылай өткізгішті материалға басқа заттың атомдарын енгізуге негізделген болуы мүмкін. Төмен температура аумағынан басқа аумақтарда, металдардағы сияқты фонондардағы шашырау басым болады; төмен температураларда құрылым ақауларындағы шашырау маңызды рөлге ие болады. Тасымалдаушылардағы тасымалдаушылардың шашырауы да өткізгіштік процесіне өз үлесін қосады. Жартылай өткізгіштердің өткізгіштігі келесі тәуелділікпен сипатталады:

$$\sigma = \sum_i n_i e \mu_i \quad (1.3)$$

Бұл жерде n_i – осы типтегі заряд тасымалдаушыларының саны; e – электрон заряды; μ_i – осы типтегі заряд тасымалдаушыларының қозғалғыштығы; i – заряд тасымалдаушыларының типтері.

Металдармен салыстырғанда жартылай өткізгіштердің меншікті кедергілерінің температуралық тәуелділігі екі фактормен: температураға байланысты заряд тасымалдаушылар санының n_i және олардың қозғалғыштықтарының μ_i өзгерісімен анықталады. Бірінші фактор басым болып табылады. Температура артқанда жартылай өткізгіштіктегі заряд тасымалдаушыларының саны $T^{3/2} \exp(-E/2kT)$ пропорционал артады, бұл жерде E – электрондардың күшею энергиясы; k – Больцман тұрақтысы. Сонымен бірге, температура артқанда заряд тасымалдаушыларының қозғалғыштығы $T^{-3/2}$ пропорционал өзгереді. Қорыта келгенде жартылай өткізгіштердің меншікті кедергісінің температураға тәуелділігін мына түрде жазуға болады

$$P(T) = A * \exp\left(\frac{E}{2kT}\right) \quad (1.4)$$

бұл жерде A —пропорционалдылық коэффициенті.

Жартылай өткізгіштіктердің кедергісінің температураға сезімталдығы металдарға қарағанда жоғары; жартылай өткізгіштердің КТК $(5 \div 20) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ құрайды және негізінен теріс болады.

Белгілі бір температураның аз аралығында (Кюри нүктесінен жоғары) кедергі температура жоғарылағанда артатын позисторлар деп аталатын жартылай өткізгішті материалдар бар. Позисторлар жартылай өткізгішті керамикалардан тұрады. Олардың кедергілері негізінен түйірлердің шекараларының ауыспалы кедергісімен анықталады, олар өз кезегінде материалдың диэлектрлік тұрақтысына тәуелді болады. Материалдың диэлектрлік тұрақтысы Кюри нүктесінің маңайында максимум мәнге ие болады. Түйірлер шекарасында диэлектрлік тұрақты төмендегенде Кюри температурасынан жоғары температурада бекітуші қабат түзіледі, оның нәтижесінде позистордың кедергісі экспоненциалды артады.

КТ СЭ үшін арналған материалдар бірқатар талаптарды қанағаттандыруы керек: температураға кедергінің тәуелділігі тұрақты және жақсы жандандырылатын монотонды болуы керек және төмендегі өрнекпен анықталатын КТК мәні жеткілікті түрде жоғары болуы қажет

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1.5)$$

Олардың физикалық және химиялық қасиеттері температуралардың жұмыс диапазонында уақыт бойынша тұрақты болып қалуы керек. Сонымен қатар, КТ СЭ материалы қысым, ылғалдылық, магнит өрісінің кернеулігі, ластану және солар сияқты басқа да сыртқы параметрлердің өзгерістеріне сезімтал болмауы керек.

Аталған талаптарды платина, мыс, никель сияқты таза металдар қанағаттандырады. Жартылай өткізгішті материалдарды жасау технологиясындағы жетістіктердің арқасында қазіргі уақытта сонымен бірге КТ СЭ дайындау үшін жарамды болатын материалдардың кең класы бар.

Кварц резонаторлардың негізіндегі температура датчиктері; Кварц резонаторларды температураның өлшеу түрлендіргіштері (ТӨТ) ретінде қолдану мүмкіндіктерін талдай отырып, осындай типті өлшеу құрылғыларының келесі артықшылықтарын көрсетеміз:

- температураны өлшегенде шешуші қабілетінің мүмкіндіктері жоғары;
- өлшеу нәтижелерін цифрлы түрде тікелей өңдеу мүмкіндігі бар;
- осындай ТӨТ ескіруі салыстырмалы түрде баяу;
- қоректендіру көзінен қуатты тұтынуы төмен.

Сонымен бірге тағайындалуы ұқсас басқа ТӨТ (кедергі термометрлерімен, термоқосақтармен, жартылай өткізгішті ТӨТ салыстырғанда олардың елеулі кемшіліктері де бар;

- жіберу (F/T түріндегі тәуелділіктің) сипаттамасының бейсызықтығы жоғары;

- сәйкес электронды сызбаларды (генераторларды, санағыштарды) аппаратуралы жүзеге асыруға шығындар салыстырмалы түрде жоғары. Электронды техниканың дамуының заманауи деңгейінде жоғарыда көрсетілген кемшіліктер тәжірибе жүзінде болмайды, себебі қазіргі уақытта температураның кең диапазонында F/T түріндегі сипаттама сызықтығы жоғары кварц генераторлар жасалынады. Сонымен қатар, қазіргі кезде генераторлар мен санағыштардың қызметін атқаратын және жоғары сенімділігімен, кішкентай габариттерімен ерекшеленетін жартылай өткізгішті интеграл элементтер жүзеге асырылып жатыр. Осының барлығы метрологиялық сипаттамалары жоғары кішкентай кварц термометрлерді жүзеге асыру мүмкіндігін қамтамасыз етеді.[35б.,6]

Техникалық әдебиеттерде келтірілген мәліметтерге сәйкес кварц резонатордың меншік жиілігінің температураға тәуелділігі 3-ші ретті бейсызық функциямен былай сипатталады:

$$\frac{F-F_0}{F_0} = a_0 + a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 + a_3(T - T_0)^3 \quad (1.7)$$

Бұл жерде $F_0 - T_0$ температура үшін жиіліктің бастапқы (тіреу) мәні; $a_1 a_2 a_3$ – 1-ші, 2-ші және 3-ші ретті температуралық коэффициенттер (ТК). ТК мәндері кварц пластинаның кристалдың X, Y, Z осьтеріне қатысты бағытына тәуелді болады. Осындай типтегі бірінші ТӨТ X -қимасы бар пластина негізінде жасалған. Осы ТӨТ үлкен сызықты ТК (a_1) ерекшеленген. Сонымен бірге бұл кезде a_1 шамасы да қима бұрышына тәуелді болады және шешуші қабілеті $4 \cdot 10^{-6}$ К дейін болғанда $20 \cdot 10^{-6}$ 1/К және 10^{-5} 1/К аралықта өзгереді. Идеал кварц ТӨТ үшін a_1 шамасы барынша жоғары мәнге ие болуы керек, ал 2-ші және 3-ші реттегі ТК нөлге ұмтылуы керек екендігі белгілі. Бұл жағдайда белгілі электрлік және механикалық кварц тұрақтыларының және олардың температуралық сипаттамаларының негізінде жеткілікті түрде жоғары дәлдік дәрежесімен барлық үш ТК осьтерге қатысты резонатор бағытына тәуелділігін бағалауға болады.

Табылған есептік бағдар қысқаша түрде LC-қима деп белгіленген және 0-мен 200°C температура диапазонында ТӨТ жіберу сипаттамасының шамамен 0,06% бейсызықтығын қамтамасыз етеді; бұл кезде $a_1 = 35 \cdot 10^{-6}$ 1/К. LC-резонатор үшін қима бұрышының нақты мәндері 39 суреттегі сызбада көрсетілген. Сонымен бірге LC-қимамен кварц резонаторларды дайындау барысында бір мезгілде екі осьтер бойынша қиманың жоғары дәлдігін қамтамасыз ету қажеттілігімен байланысты қиыншылықтар туындайды[34б.,7].

Температураның интегралды датчиктері; Температураның интегралды датчигі көбінесе p-n ауысуда кернеудің төмендеу шамасының температураға тәуелділігіне негізделеді. Физикадан білетініміздей, диодтың вольтамперлік сипаттамасы келесі формуламен өрнектеледі:

$$U = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.8)$$

Бұл жерде: U – диодтағы кернеу, K – Больцман тұрақтысы, T – Кельвин градусымен берілетін температура, q – электрон заряды, I – диодтогы, I_0 – жылулық ток (немесе кері қанығу тогы).

Температура датчигін жасаудың әдісінің бірінде диодты тұрақты токпен ығыстырады, кернеудің тура төмендеуін өлшейді және температура есептелінеді. Осы әдістің кеңінен қолданылуын шектейтін айтарлықтай кемшілігі кернеудің бастапқы тура төмендеуінің диодтың жасалу жағдайы мен оның параметрлеріне тәуелділігі болып табылады.

Өнімділігі жоғары басқа бір әдіске температураны база-эмиттер кернеуінің артуы бойынша есептеу жатады.

Бұл жағдайда жоғарыда келтірілген формула мына түрге ие болады:

$$\Delta U_{BE} = \left(\frac{KT}{q} \right) \ln(I_{C1}/I_{C2}) \quad (1.8)$$

бұл жерде: ΔU_{BE} – база-эмиттер кернеулерінің айырымы,

I_{C1}, I_{C2} – коллектор токтары.

Осылайша, база-эмиттер кернеуінің өсімі температураға тура пропорционал. Белгілі бір дәлдікпен коллектордың екі тогын беріп, ΔU_{BE} шамасының өлшеу нәтижелері бойынша ауысудағы кернеудің бірінші ретті төмендеуіне, ауысу өлшеміне, шығып кететін ток пен ауысудың басқа да параметрлеріне тәуелсіз есептеуге болады.

Сыйымдылықты термометрлер; Сыйымдылықты термометрлерде (СТ) температураны өлшеу үшін СЭ ретінде қолданылатын конденсатор сыйымдылығының температуралық тәуелділігі пайдаланылады. Екі типті СТ бар: бірінші ең кең таралған түрінде конденсатор сыйымдылығының өзгерісі конденсатор материалының ε диэлектрлік өткізгіштігінің температуралық тәуелділігімен анықталады; дилатоконденсаторлы термометр деп аталатын басқа түрінде СЭ сыйымдылығының өзгерісі бөліктердің арасындағы қашықтықтың немесе қоршау ауданының температурамен өзгерісіне негізделеді.

Диэлектрлік өткізгіштіктің температуралық тәуелділігі анық көрсетілетін матеиалдарға ε жоғары мәнімен сипатталатын сегнетоэлектриктер жатады. Кюри нүктесінен жоғары температураларда диэлектрлік өткізгіштіктің температураға тәуелділігі мына қатынаспен сипатталады

$$\varepsilon = \frac{A}{T - T_K} \quad (1.9)$$

бұл жерде A – Кюри-Вейс тұрақтысы; T – температураның мәні; T_K – Кюри нүктесінің температурасы.

Қысымның пьезорезистивті интегралды датчиктері; Жұмыс істеу принципі мембранаға түсірілетін қысымның сәйкес пьезорезистивті эффекттің кедергісінің қосымша өзгерісіне алып келетін майысуды құрауға негізделген қысымның

пьезорезистивті интегралды датчигін толығырақ қарастырайық. Мембрана қалыңдығы, оның беттік ауданы және резисторлардың геометриялық конструкциясы қысымның рұқсат етілетін деңгейін анықтайды. Кедергілердің өзгерісі механикалық кернеу әсерінен резисторлардың геометриялық параметрлерінің өзгерісімен түсіндіріледі. Эффекттің негізі кристалдағы механикалық кернеуге тәуелді өткізгіштіктің өзгерісі болып табылады. Бұл тәуелділік пропорционалдылық константасымен анықталады.

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \sigma \times \pi \quad (1.10)$$

Жартылай өткізгішті кристалдың созылуы немесе сығылуы (σ) көпірлік сызбада жалғанған пьезорезисторларда кедергінің өзгерісін тудырады.

Қысымның жалпы қабылданған датчиктерімен салыстырғанда жартылай өткізгішті технологияны қолданатын датчиктермен салыстырғандағы артықшылықтары:

- сезімталдығы жоғары;
- сызықтылығы жоғары;
- қысым мен температура гистерезисі өте төмен;
- сенімділігі жоғары;
- тез іске қосылады;
- ықшам;
- бағасы арзан.

Кемшілігі температураға тәуелділігі, бірақ бұл эффектті компенсациялық сызбамен жоюға болады. Интегралды қысым датчигін әзірлеу және өндіру бойынша жетекші фирма:

1.2 Ылғалдылық анықтау әдістері

Ылғалдылық ауадағы су буының мөлшерін білдіреді және ол көптеген тәсілдермен анықталады. Ылғалдылықты сипаттайтын бірнеше терминдер бар, мәселен метеорологиялық қосымшалар, термодинамикалық бағытта сондай-ақ химиялық технологияларды қолдану арқылы әртүрлі бағытта анықталған. Төменде ылғалдылықты анықтаудың кең тараған түрін атап өтеміз.[40-41]

Абсолютті ылғалдылық; Абсолютті ылғалдылық (АЫ) – белгілі бір температурада су буының массасының ауа көлеміне қатынасы. Егер m су буының массасы болса және V - жалпы көлемі, яғни ауаның және су буының қоспасының көлемі, онда абсолютті ылғалдылық. $АЫ = M/V$

Абсолютті ылғалдылық температураны есепке алмайды, бірақ температура мен қысым байланысты өзгереді. Бұл коэффициентке арналған басқа атаулар жаппай араластыру коэффициентін, ылғалдылық коэффициентін, массалық үлесті немесе араластыру коэффициентін қамтиды. Бұл мөлшерді қолдану қарапайым және бұқаралық тепе-тендік немесе жылу есептеу үшін дәлірек. Абсолютті ылғалдылықтың қарама-қайшы анықтамаларына байланысты бұл терминді пайдалану кезінде сақтық қажет.

Нақты ылғалдылық; Y_w метеорологиялық қосымшалар үшін г / кг немесе кг/кг болатын дымқыл ауа массасына су буы массасының қатынасы ретінде анықталуы мүмкін. Температура мен қысымның өзгеруі кезінде шықтану нүктеден жоғары жағдайлар кезінде ылғалдылық тұрақты және метеорологияда пайдалы мөлшер болып табылады. Судың булану жылдамдығы нақты ылғалдылыққа тікелей пропорционалды.

Салыстырмалы ылғалдылық; Салыстырмалы ылғалдылық ауаның ішіндегі су буының қаныққан кезде ауада болуы мүмкін су буының мөлшеріне қатынасы болып табылады, пайызбен көрсетілген. Салыстырмалы ылғалдылық,% СЫ немесе % rh жиі белгіленуіне қарамастан салыстырмалы ылғалдылықтың ресми белгісі ψ бар. Салыстырмалы ылғалдылық сұйық су жазықтығынан тұрақты температурадағы нақты бу қысымы p'' -ның қаныққан бу қысымына P'_s қатынасы ретінде көрінуі мүмкін. $RH = P' / P'_s \times 100$

Шық нүктесі; Ау жылыну кезінде ауаның ылғалдылықты сіңіру сыйымдылығы артады. Демек, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы ауа қызған кезде азаяды. Керісінше, дымқыл ауа салқындатылғандықтан, ылғалды сіңіру қабілеті төмендейді және салыстырмалы ылғалдылық артады. Керісінше, дымқыл ауа салқындатылғандықтан, ылғалды сіңіру қабілеті төмендейді және салыстырмалы ылғалдылық артады. Шық нүктесі - бұл тұрақты қысымда ылғалды ауа қаныққан (100% салыстырмалы ылғалдылыққа жетеді) қосымша суды сіңіре алмайтын жағдай. Температура шық нүктесінен төмендеген сайын, жаңа төмен температурада ауаның қаныққанына дейін (100% салыстырмалы ылғалдылыққа дейін) ылғалдың конденсациясы болады[39].

Қату нүктесі; Мұздату нүктесі қатты мұздың үстіндегі шық нүктесі сияқты, сұйық судың орнына конденсатта мұздың пайда болуы.

Жылыулық қысым: Жылу индексі мен желдің желдетуі адам температураны қалай қабылдайтынын және оларды бірлестіре отырып «айқын температура» немесе «салыстырмалы сыртқы температура» деп аталуы мүмкін.

Адам ағзасы конвекцияны өткізу арқылы жылуды жоғалтады. Дене жоғалту жылдамдығы терінің әсерінен және желдің жылдамдығымен байланысты. Адам денесі бетінің температурасын сақтауға тырысып, жылу жоғалуына жауап береді. Жылдам жылу жоғалту төменгі температура сезіміне, сондай-ақ дененің дене температурасын ашық теріге ұстап тұруға тырысып, гипотермия, қатқылдық пен өлім қаупін жоғарылатуына әкеліп соғады[40б.,6].

1-кесте. Желдің салқындату температурасы

$V \backslash T_a$	40 °F	30 °F	20 °F	10 °F	0 °F	-10 °F	-20 °F	-30 °F
10 миль/сағ	34	21	9	-4	-16	-28	-41	-53
20 миль/сағ	30	17	4	-9	-22	-35	-48	-61
30 миль/сағ	28	15	1	-12	-26	-39	-53	-67
40 миль/сағ	27	13	-1	-15	-29	-43	-57	-71
50 миль/сағ	26	12	-3	-17	-31	-45	-60	-74

Қоршаған ортаның сапалы болуы: Дәстүрлі түрде температура өлшеуге негізделген. Соңғы жылдары салыстырмалы ылғалдылықты өлшеу маңызды болып табылды. Ылғалдылықты бақылау тіршілікте, материалдарды сақтауда

және өндіріс орындарында ерекше маңызды. Температура мен салыстырмалы ылғалдылықты бақылау көптеген материалдарды, оның ішінде дәрілік заттарды, тамақ өнімдерін, маталарды және ағаштан жасалған бұйымдарды сақтауда да маңызды. Температураның немесе салыстырмалы ылғалдылықтың қолайсыз деңгейлері материалдардың бөлінуіне елеулі үлес қосады. Жылу тербелістерді тездетеді, ал жоғары салыстырмалы ылғалдылық қажетті ылғалдылықты қамтамасыз етеді, зиянды химиялық реакцияларды ілгерілету үшін температура үйлесімділігі, ыңғайлы температура мен ылғалдылық өсімдіктер өсуі және жәндіктер белсенділігін ынталандырады. Қыста орталықтандырылған жылытылатын ғимараттарда орын алуы мүмкін өте төмен салыстырмалы ылғалдылық кейбір материалдардың бұзылуына әкелуі мүмкін. Температура мен ауаның салыстырмалы ылғалдылығындағы үлкен ауытқулар материалдардың кеңею мен қысқару салдарынан зақымдалуы мүмкін. Консервация стандарттарына сай келетін климаттық бақылаудың жеткілікті деңгейде орнатылуы, жұмыс адамдар үшін жұмыс істеуге қолайлы жағдайды сақтай отырып, материалдардың нашарлауының алдын алады. Мысалы, лютиерлер скрипкалар ұяшықтары және Гитара сияқты аспаптар дымқылдық 45-55% және 16 °C (55 °F) -дан 21 °C (70 °F)-да ажырап кету немесе бұлінулер болуы мүмкін. Температура мен салыстырмалы ылғалдылық материалады қолдануға байланысты белгіленеді. Әдетте көптеген қосымшалар үшін тұрақты температурасы 16-21 °C-да салыстырмалы ылғалдылық 30% -дан 60% -ға дейін жетеді. Тым аз қуатпен жұмыс істейтін температура мен ылғалдылық сенсорлары азық-түлік және басқа да материалдарды тасымалдау немесе сақтау кезіндегі жағдайды бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін.

1.2.1 Ылғалдылықты анықауға арналған датчик түрлері

Алюминий тотығының негізіндегі датчиктер; Алюминий электродқа қалыңдығы бірнеше микрометр алюминий тотығын салады, одан кейін оның үстіне су буын өткізетін жұқа алтын қабатымен қаптайды. Нәтижесінде импедансы ылғалдылыққа тәуелді болатын конденсатор шығады, себебі алюминий тотығы су буын сіңіреді. Бұл өлшеу түрлендіргішінің ерекшелігі импеданстың абсолют ылғалдылыққа (шық нүктесінің температурасы) тәуелді болуында және металл емес диэлектриктері бар сыйымдылықты датчиктер сияқты салыстырмалы ылғалдылыққа тәуелді болмайды[39.,6-76].

Шық нүктесі айнасымен гигрометрлер; Айна диаметрі бірнеше миллиметр болатын, Пельтье элементінің суық жағымен жалғанған жақсы өңделген металл бет болып табылады. Шық нүктесіне дейін суытқанда айна бетінде әдетте оптикалық әдістермен анықталатын конденсат түзіледі (шағылдыру қабілетінің өзгеруі бойынша). Сонымен бірге айна температурасы шық нүктесінің температурасын орнатуға арналған датчик көмегімен реттелінеді.

Шық нүктесінің гигрометрлері өлшеудің қызықтыратын барлық диапазоны үшін жүзеге асырылуы мүмкін, алайда аспаптардың жеке модельдері осы диапазонның шектелген аралығында ғана жұмыс істей алады. Олар дәл гигрометрлер қатарына жатқызылады және эталонды өлшеу құралы ретінде жиі

қолданылады. Өлшеу дәлдігі бірінші кезекте айна температурасының дәлдігін анықтауға және реттеу контурының беріктігіне, сонымен бірге термотүрлендіргіштің тозуына, газ және механикалық қоспалардың болуына, айна бетінде конденсаттың қатуына тәуелді болады. Өлшеудің қорытынды қателігі 1K дейін жетеді.

Электролитті ылғалдылық датчиктері; Өзінің сипаттамалары, геометриясы және қолдану мүмкіндіктері бойынша электролитті датчиктер сыйымдылықты датчиктерге ұқсайды. Оларда өлшеу үшін қоршаған орта ылғалымен өзара әрекеттескенде электролит тамшысының импедансының өзгерісі қолданылады. Электролит ортамен белгілі бір физикалық сорбциялық қатынаста болатындықтан сипаттамалар тұрақтылығы, нәтижелердің жандандырылуы, химиялық әсерге төмен сезімталдығы қамтамасыз етіледі. Кемшіліктері: терлеуге және сумен дымқылдауға сезімталдығы жоғары. Хлорлы литий ерітіндісімен гигрометрлер; мата айнымалы ток көзіне қосылған бифиляр электрод көмегімен қыздырылады (электролизді болдырмау үшін). LiCl гигроскопиялық және қоршаған ортаның ылғалын қабылдайтындықтан, ертінді ток өткізеді және осының нәтижесінде ерітіндідегі бу қысымы орта буының қысымымен теңескенге дейін қыздырылады; температура термотүрлендіргішпен өлшенеді.

Абсорбталған бояғышпен Ленгюмор-Блоджет үлдірлерінің негізіндегі жылдам әсер етуі жоғары гигрометр; Өте жұқа полимер үлдірлерге (Ленгюмор-Блоджет үлдірлері) диспергирленген кейбір органикалық бояғыштар үшін оларға ылғал әсер еткенде жарықты жұту коэффициентінің өзгерісі бақыланады. Бұл бояғыш пен судың арасындағы қайтымды химиялық реакция нәтижесінде жүреді. Қазіргі уақытта жылдам әрекет етуі мен сезімталдығы жоғары фенолды бояғышпен Ленгюмор-Блоджет (ЛБ) үлдірлерінің негізінде гигрометрлерді зерттеу нәтижелері келтірілген.

ЛБ үлдірлерін алу үшін стеарин қышқылы мен хематопорфирин қолданылған. Ылғалға сезімтал материал ретінде рН-индикатор ретінде кең қолданылатын қызыл фенол (ҚФ) пайдаланылды. Осы бояғышқа су ерітіндісі әсер еткенде жарықты жұту коэффициентінің өзгеруіне алып келетін реакция орын алады.

Сыйымдылықты гигрометрлер; Ылғалдылықты өлшеу үшін су буының абсорбциясы немесе десорбциясы олардың кедергісінің, оптикалық немесе химиялық қасиеттерінің өзгеруіне алып келетін материалдармен датчиктер қолданылады. Алайда ылғалдылықты өлшеудің сыйымдылықты принципі ең көп таралған, ол үшін диэлектрлік константасы молекулалық түрде 29 тең болатын су түріндегі үлгілік диэлектрикті қолданумен сызба қолданылады. Аз ылғалдылықта диэлектрлік материал ретінде синтетикалық материалдарды қолданғанда су молекуласының конгломераты түзіледі және диэлектрлік тұрақты 80 дейін артады. Сонымен бірге полярлы синтетикалық материалдарда егер диэлектрлік тұрақтының артуына алып келетін материалға ылғал түссе, өрістің әсерінен электрлік дипольдердің бұрылуы жеңілдейді.

Өлшеу әдісі алюминий тотығынан анодтың электрлік қасиеттерінің ылғал мөлшеріне тәуелді өзгерісіне негізделген. Ылғалға сезімтал элемент өзекше түрінде шамамен 1,5 мм және ұзындығы 12 мм немесе ауданы бірнеше ондаған шаршы сантиметр болатын пластина түрінде таза алюминийден жасалынады. Таза алюминийдің сатылымдағы сұрыптарынан жасалған элементтерді майсыздандырады және электролитті тәсілмен кеуекті тотықты үлдірмен қаптайды. Үлдір қалыңдығы мен кеуекті құрылым тығыздығы айтарлықтай дәрежеде анодтау шартына: Табиғатта және электролиттегі қышқыл концентрациясына, температураға, ток тығыздығына және процесс ұзақтығына тәуелді болады.

Сезімтал элементтің өңделмеген бөлігін жуады, кептіреді және оқшаулайды, ал қалған бөлігіне субуын өткізетін сыртқы өткізгіш қабат қаптайды. Мұндай қабат графитті коллоидті ерітіндіден графитті тұндырғанда және элемент бетіне вакуумда буландырып, металл үлдір қаптағанда түзіледі. Өткізгіш қабатпен электрлік байланыс мысалы, мыс сымның кесіндісінің көмегімен жүзеге асырылады[7., 10-116].

Фоксборо фирмасының «дью-сэлл» типті гигрометр; Бұл гигрометр бірінші қарағанда өзінің жұмыс істеуі бойынша қазіргі уақытта қолданылатын қарапайым электролитті гигрометрге ұқсас болып көрінуі мүмкін, алайда олардың айтарлықтай ерекшеленеді. Гигрометр негізінен ауаны конденсирлеу жүйелерінде ылғалдылықты өлшеу үшін құрастырылған, бірақ соңғы уақытта метеорологиялық тәжірибеде табысты қолданылды. Өндірістік жағдайда ылғалдылықты өлшегенде гигрометрдің қарапайым типтерімен салыстырғанда үлкен артықшылықтарға ие болады, себебі оның бірінші ретті градуирленуі оның бетінің шаңмен ластануының әсерінен өзгермейді. Гигрометрдің бірінші үлгілері бірнеше жыл бойы шаңды атмосферада бірінші ретті градуирленуінің айтарлықтай өзгеріссіз жұмыс істеген.

Бұл гигрометрдің жұмыс істеу принцибін жоғарыда қарапайым электролиттік гигрометрдің жұмыс істеуін түсіндіргенде қолданылған тұз үлдірімен қапталған бет моделімен түсіндіруге болады. Жазық бет концентрациясы қоршаған ортаның ылғалдылығының барлық жағдайында ерітінді қаныққан болып қалатындай жеткілікті үлкен шамада болатын хлорлы литий ерітіндісімен қапталған деп алайық. Осы бетке су буының қысымы тұз ерітіндісін қанықтыру қысымынан жоғары ылғал ауа әсер еткенде ауадан су молекулаларының тұз ерітіндісінің бетіне диффузиялануы жүреді, сонымен бірге судың мөлшері су буының қысымының айырмашылығына тәуелді болады. Осындай жағдайда тұз ерітіндісінің беттік қабатындағы судың мөлшері үнемі артады және ерітінді концентрациясы төмендейді.

Сыйымдылық типті шыныланған ылғалдылық датчигі; Шынының екі параллель пластиналарының арасына орналастырылған қарама-қарсы зарядталған өткізгіштерден тұратын конденсаторлар ылғалды анықтау үшін жақсы. Шыны бетіндегі ылғалға сезімталдық датчиктердің және оны қоршаған материалдардың геометриясының және диэлектрлік қасиеттерінің күрделі

функциясы болып табылады. Ары қарай осындай датчиктердің конструкциясын оңтайландыру мақсаты үшін жарамды аналитикалық модельдерді қарастырамыз.

Жұқа үлдірлі ылғалдылық датчиктері; Технологиялық ортада және өндірістік ғимараттардың ауасындағы ылғалдың мөлшерінің деңгейін бақылау жүйелері үшін ең қолайлы ылғалдылық датчиктері микроэлектроника технологиясының көмегімен дайындалатын кішкентай датчиктері (сенсорлар) негізіндегі ылғалдылық датчиктер болып табылады. Сорбциялық-кондуктометрлік және сыйымдылықты сенсорлардың әр түрлі нұсқалары жасалған. Мұндай сенсорлардың жұмыс істеу принципі су буының қоршаған ортадан қайтымды (физикалық) сорбциясында ылғалға сезімтал үлдірдің электрфизикалық параметрлерін (өткізгіштік, диэлектрлік өтімділік) өлшеуге негізделген.

1.3 Температурамен ылғалдылықты бір уақыта өлшейтін датчиктерді талдау

Температура мен ылғалдылық датчиктері көптеген өлшеу және бақылау жүйелерінде кеңінен қолданылады, метеорология, ауыл шаруашылығы, аккумуляторлық жүйелер және медициналық жабдықтар [42,43]. Температура – бұл имплантацияланатын медициналық құрылғылардың, әсіресе нейрондық стимуляторлар нейрондық матаға жақын орналасқан жағдайларда басты проблема [44]. Имплантацияланатын стимуляторлардан бөлінген жылудың салдарынан пациенттерді қорғау үшін [45] имплантатын бөліктің сыртқы бетін қалыпты бір қалыпты жұмыс температурасы 2 °C-тан жоғары болмауы керек. Кез-келген жоғары температураның көтерілуі өндіруші белгілі бір қосымшаның қауіпсіздігін сенімді түрде көрсеткен жағдайға ғана негізделуі мүмкін [45]. Стимулятордың чипінде орналасқан кішкене температура диапазонында (мысалы, 35°C - 40°C) калибрленген шағын өзгерістерге өте сезімтал (мысалы, 0,1°C) температура датчигі бар. Имплантацияланатын процессорлардағы чиптегі жылуды басқару үшін қолданылатын датчиктерге қойылатын талаптар олардың рұқсат етілген кең ауқымының диапазоны мен кернеудің тұрақтылығына байланысты ерекшеленеді [46]. Металл оксиді негізіндегі жартылай өткізгіші ақылды температура датчигі [47] көмегімен абсолютті дәлдіктің жоғары деңгейіне қол жеткізуге болатынына қарамастан, имплантат мониторингі үшін салыстырмалы өзгерістер (имплантациядағы бастапқы мәннен) маңызды болып, сезгіштіктің жоғары деңгейін талап етеді.

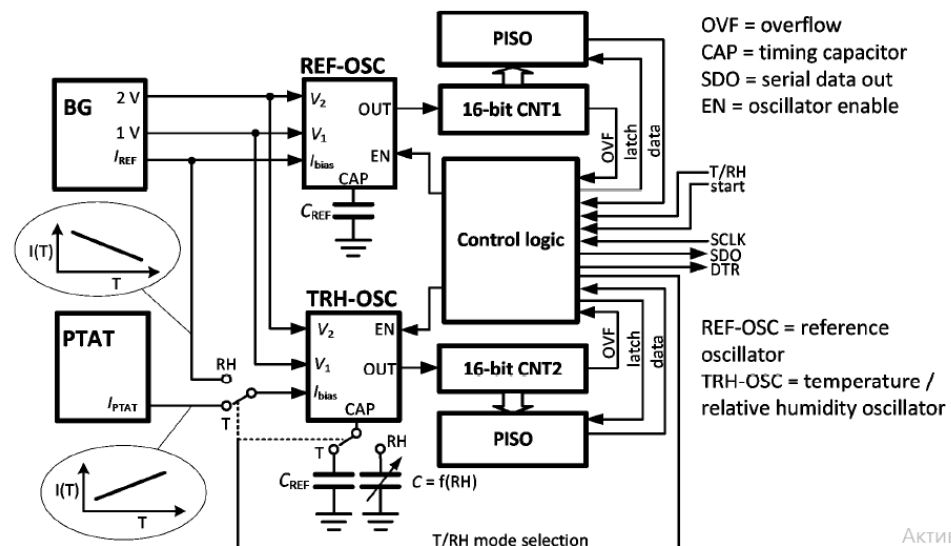
Ылғалды ортада жұмыс істеу ағзаға имплантацияланған электронды құрылғылардың тағы бір маңызды мәселесі болып табылады. Құрылғыға кірп кеткен ылғал нәтижесінде интегралды схеманың белсенді аймағында конденсация туындатады, сондай-ақ, коррозия пайда болады, эффективтілікті жоғалтып құрылғының жұмыс істемей қалуына алып келеді. Микрокабельдің [48] функционалды және құрғақ екендігін тексерудің ең тікелей жолы оның ішкі салыстырмалы ылғалдылығын өлшеуге арналған датчикті пайдалану. Чипте орналасқан оқу электроникасы бар 0,6 мм қосымша металл-оксидті жартылай

өткізгіш негізіндегі ылғалдылық датчигі бар [49]. Бейорганикалық пассивация қабатымен жабылған, полиимидті пальпокпен қамтылған өзара бөлінген конденсатор, ылғал сезгіш датчигін құрайды. Ол кейінгі өңдеу қадамдарын қажет етпейді. Дегенмен, сенсор үшін қажетті аймақ өте үлкен (4 мм^2). Мысалы, микроаппаратпен имплантацияланатын стимуляторларды қажетті кішкентай датчикпен қамтамасыз ету керек.

Бұл температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчик құрылымы жеңілдететін және чиптің қажетті аймағын едәуір азайтылған салыстырмалы ылғалдылық пен температураны бірге анықтайтын датчикті талдау және оны осы диссертациялық жұмыста талданған датчикпен салыстыру[50].

1.3.1 Металл оксиды негізіндегі жартылай өткізгішті температурамен ылғалдылықты анықтауға арналған датчик

1.4-суретте температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчиктің құрылымы көрсетілген. Оқу екі релаксациялық осциллятордың радиометриялық жиілігін өлшеуге негізделген. Датчиктің температурамен сылыстрмалы ылғалдылықты қадағалау екі жұмыс режиміне негізделген, онда температура режимі немесе салыстырмалы ылғалдылық режимі арқылы таңдалады. Осциллятордың бастапқы жұмысы екеуінде бірдей режимде анықтау. Тасымалдау тізбегінде V_1 және V_2 температураға тәуелсіз кернеу генерациялайды, олар осциллятордағы терезе компараторларының табалдырығын белгілеу үшін қолданылады. Осциллятордың әрдайым бірдей контактілі конденсаторға ($C_{\text{оц}}$) қосылады және $I_{\text{оц}}$ ағымдық IREF арқылы жеткізіледі, Ішкі ток көзін раковинасын азайтады. Бұл ток BG-де жасалады және негативті температуралық коэффициенті бар; сондықтан осциллятордың жұмысы жиілігі температураның жоғарылауымен азаяды.



1.4-сурет. Температура мен ылғалдылық бір уақытта өлшейтін датчиктің суреті

Өлшеу режиміне байланысты есептегіштердің бірі (CNT1 немесе CNT2) басқа есептегіш үшін анықтамалық кезеңді көрсетеді. BG жолақ схемасы; REF-OSC осциллятор анықтамасы; T/СЫ, температура мен салыстырмалы ылғалдылық; PTAT абсолюттік температураға пропорционалды; PISO, параллельді сериялық шығу; DTR дайын деректер; SCLK сериялық сағат.

1.3.2 Ылғалдылықты анықтау режимі

Осциллятор толқынының формуласы 2-суретте көрсетілген. Бір жарты мерзімде (T_{ON}) C конденсаторы V1-ден V2-ге дейінгі салыстырмалы кернеу деңгейінен алынады.

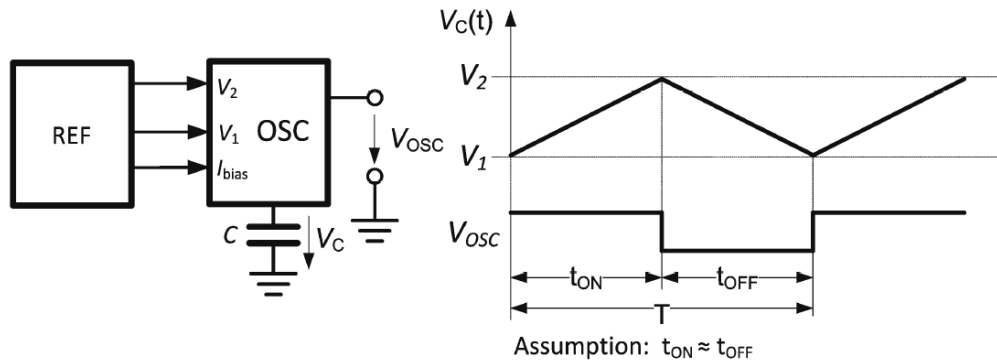
$$\Delta V = (V_2 - V_1) = \frac{1}{C} \int_{\tau=t}^{r=t+t_{on}} I(t) d\tau \quad (1.11)$$

$I(t) = I$ 50% 1 жұмыс циклі үшін:

$$\Delta V = \frac{1}{C} \cdot I \cdot t_{on} \rightarrow f_{osc} = \frac{I}{2C(V_2 - V_1)} \quad (1.12)$$

Өлшеу аралығы, T_{RH} осциллятор жиілігі, f_{RH} CNT2 санағышы есептегіш биттік өлшемі арқылы анықталады. 16 биттік санауыш үшін өлшеу аралығы: Демек, көрсетілген өлшеу есептегіштерінің орыны бір режимнен екіншісіне ауысу кезінде ауыстырылуы керек.

$$T_{RH} = \frac{N_{CHT2}}{f_{RH}} = \frac{2^{16}}{f_{RH}} \quad (1.13)$$



1.5-сурет. Уақытқа байланысты конденсатордың шығу функциясы сигналының үшбұрышты толқыны. Жұмыс циклі 50% деп есептеледі.

N_{CNT2} CNT2 санағыштағы есептелген мән. Бұл аралықта тіркеуші санауыштағы өлшенген сигнал жиілігі мен өлшеу аралығына байланысты N_{REF} мәніне дейін есептейді. Осылайша,

$$T_{RH} = f_{REF} \cdot T_{RH} = \frac{f_{REF}}{f_{RH}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 \quad (1.14)$$

f_{REF} осциллятор көрсеткен жиілігі. Жартысын санау кезінде кеткен қателер, яғни квантизациялау қатесі ескеріледі. 4-теңдеу эталондық санауыштың мәнін өлшеу болып табылады осцилляторлардың жиілік қатынасы. Жиіліктер

ток пен сыйымдылыққа байланысты болғандықтан (2-теңдеу қараңыз), жиілігі токтар мен сыйымдылықтардың риторикалық өлшемі ретінде көрінуі мүмкін:

$$N_{CNT} = \frac{f_{REF}}{f_{RH}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 = \frac{I_{REF}(T)}{C_{REF}(T)} \cdot \frac{C_{RH}(T, RH)}{I_{REF}(T)} \cdot 2^{16} \pm 0.5 \quad (1.15)$$

Ылғалдылық тәуелділігі теңдеуі: 1.5-теңдеудегі ағымдағы қатынасқа тәуелді емес, тек сыйымдылық коэффициентіне байланысты, яғни:

$$N_{CHT1} = \frac{f_{REF}}{f_{RH}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 = \frac{C_{RH}(CbI)}{C_{REF}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 \quad (1.16)$$

C_{REF} -ты тұрақты деп санауға болады және салыстрмалы ылғалдылыққа тәуелді емес болғандықтан, ылғалдылыққа қарсы мәннің өзгеруі:

$$\frac{\partial N_{CNT1}}{\partial_{HR}} = \frac{1}{C_{REF}} \cdot \frac{\partial C_{RH}(CbI)}{\partial RH} \cdot 2^{16} = \frac{C_{RH}(CbI)}{C_{REF}} \cdot NSRH \cdot 2^{16} \quad (1.17)$$

Онда NSRH қалыпты салыстрмалы ылғалдылықты сезгіштік болып табылады, ол 0.073% /%СЫ тәртібімен [15]. Тепе-тең сыйымдылықтар үшін санауыштың өзгеруі 730 ppm / СЫ · 216 ≈ 48 тәртібінде, рұқсат етілетін ең аз бит 1/48 ≈ 0,02% СЫ болады.

Температураға тәуелділік: 1.6-теңдеуге сәйкес сыйымдылығының температуралық тәуелділігін есепке алу үшін өзгертілген:

$$N_{CNT1} = \frac{f_{REF}}{f_{RH}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 = \frac{C_{RH}(T)}{C_{REF}(T)} \cdot 2^{16} \pm 0.5 \quad (1.18)$$

Өлшегіштегі температураның өзгеруі:

$$\frac{\partial N_{CNT1}}{\partial T} = \frac{1}{(C_{REF}(T))^2} \cdot \left(\frac{\partial C_{RH}(T)}{\partial T} C_{REF}(T) - \frac{\partial C_{REF}(T)}{\partial T} C_{RH}(T) \right) \cdot 2^{16} \quad (1.19)$$

Бұл тәуелділік екі сыйымдылық пен олардың температуралық коэффициенттері тең болғанда ғана мінсіз жағдайда жойылады. Кез келген басқа жағдайда, конденсатордың, ТТС температуралық коэффициентімынадай болады:

$$TCC = \frac{1}{C(T_0)} \cdot \frac{\partial C(T)}{\partial T} \quad (1.20)$$

Мұнда $C(T_0)$ - T_0 температурадағы сыйымдылық. Типтік 0,18 μm CMOS процесінде поли-полиэтилен конденсаторының салыстрмалы ылғалдылық үшін типтік мәні 20 ppm/°C құрайды. Металл-электрлік-металл конденсаторлар температураның жоғары коэффициенттеріне ие, ал жоғарғы ылғалдылық сенсорының температуралық коэффициенті шамамен 60 ppm /°C құрайды.

1.7-теңдеудегі температуралық көрініс келесідей болуы мүмкін:

$$\frac{\partial N_{CNT1}}{\partial T} = \frac{C_{RH}(T)}{C_{REF}(T)} (TCC_{RH} - TCC_{REF}) \cdot 2^{16} \quad (1.21)$$

Мұнда TCC_{RH} және TCC_{REF} тиісінше C_{RH} және C_{REF} конденсаторының температуралық коэффициенті болып табылады. Тепе-тең сыйымдылық үшін есептегіштің өзгеруі шамамен 40 ppm/°C · 216 = 2.62 / °C. Температураның жоғарылауы шамамен 18 °C 1%-ты салыстрмалы ылғалдықтың өсуі ретінде пайда болады.

Температураның өзгеруі төмен болатын импланттарда температура сезгіштігі қолайлы. Есептегіш сатының температуралық сезімталдығы алдымен нөлдік температура коэффициенті (яғни, $TCC_{REF} = 0$) бар I_{REF} анықтамалық ток

үшін зерттеледі. Өлшеу және айрымын есептеу санауыштарының рөлі ретінде керек (1.4-сурет). 5-теңдеудегі мына форманы қарастырады:

$$N_{CNT2} = \frac{f_T}{f_{REF}} \cdot 2^{16} \pm 0.5 = \frac{I_T(T, RH)}{I_{REF}} \cdot \frac{C_{REF}(T)}{C_T(T)} \cdot 2^{16} \pm 0.5 \quad (1.22)$$

Мұнда f_T - TRH-осциллятордың температуралық жиілігі және C_T және C_{REF} конденсаторлары бірдей, тең температуралық коэффициенттері бар. Осылайша, туындысы 8 және 11-теңдеулерге ұқсас түрде алынуы мүмкін:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{C_{REF}(T)}{C_T(T)} \right) = \frac{C_{REF}(T)}{C_T(T)} (TCC_{REF} - TCC_T) = 0 \quad (1.23)$$

Температура тек қана РТАТ ағымдағы (I_T) ток, C_{REF}/C_T масштабтаумен көбейтілген коэффициенті:

$$\frac{\partial N_{CNT2}}{\partial T} = \frac{1}{I_{REF}} \cdot \frac{C_{REF}}{C_T} \left(\frac{\partial I_T(T)}{\partial T} \right) \cdot 2^{16} \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial N_{CNT2}}{\partial T} = \frac{1}{I_{REF}} \cdot \frac{C_{REF}}{C_T} \left(\frac{\partial I_T(T)}{\partial T} \right) \cdot 2^{16} \quad (1.25)$$

Мұндағы I_T салыстырмалы ылғалдылыққа тәуелсіз деп есептеледі. ток бойынша температуралық коэффициент [17].

$$TCI_T = \frac{I}{I_T} \cdot \frac{\partial I_T}{\partial T} = \frac{1}{V_{EB12}} \cdot \frac{\partial V_{EB12}}{\partial T} - \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} = \left(\frac{1}{T} - TCR \right) \quad (1.26)$$

Мұндағы V_{EB12} - әртүрлі екі жақты биполярлы өткізгіштер арасындағы кернеу айырмасы (3а-сурет) және TCR – резистордың температуралық коэффициенті. Демек, 14-теңдеу келесідей болып жазылуы мүмкін:

$$\frac{\partial N_{CNT2}}{\partial T} = \frac{I_T}{I_{REF}} \cdot \frac{C_{REF}}{C_T} \cdot \frac{1}{T} (1 - T \cdot TCR) \cdot 2^{16} \quad (1.27)$$

T , TCR мәні сызықтық емес болып табылады. TCR поли резистор үшін өте аз болуы мүмкін

(-40 ppm/°C), бұл бөлме температурасында (шамамен 3300 ppm/°C) TCI_T -ден әлдеқайда аз. $TCI_{REF} < 0$, температураға тәуелділік.

Ағымдағы коэффициенттің туындысы 11-теңдеуге ұқсас түрде көрсетілуі мүмкін:

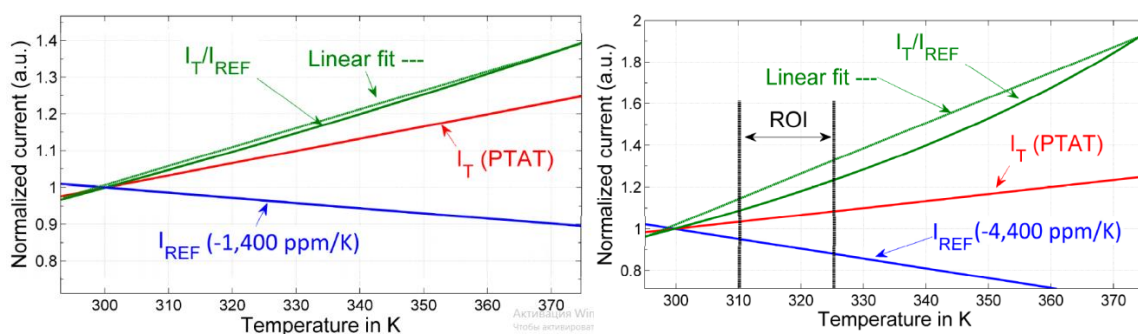
$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{I_T}{I_{REF}} \cdot (TCI_T - TCI_{REF}) \right) = \frac{I_T}{I_{REF}} \cdot \left(\frac{1}{T} - TCR - TCI_{REF} \right) \quad (1.28)$$

$CNT2$ -нің салыстырмалы мәні температураға тәуелді, ол келесідей:

$$\frac{\partial N_{CNT1}}{\partial T} = \frac{I_T}{I_{REF}(T)} \cdot \frac{C_{REF}}{C_T} \cdot \frac{1}{T} (1 - T(TCI_{REF} + TCR)) \cdot 2^{16} \quad (1.29)$$

Өткізгіштің температуралық коэффициенті нөлге жақын болғандықтан BG-да пайдаланылатын п-ұңғымалы резистордың температуралық коэффициенті $TCR=3000$ ppm/°C болса, анықталатын ток міндетті түрде $TCI_{REF} = -3000$ ppm / °C. Теріс мәнге ие болады. РТАТ ток генерациясы үшін таңдалған

поли типті резистормен бірге ($-1400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) екі коэффициенттің қосындысы - $4400 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ құрайды, ол РТАТ тогынан $3300 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ -тан 300 K -ге дейін алынып тасталады. Бұл РТАТ ток генераторына қатысты коэффициенті бойынша сезімталдықты арттырады. Есептегіштің өзгеруі $7700 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \cdot 216 \approx 505$, LSB $1/505 \approx 0,002 \text{ }^\circ\text{C}$ рұқсатына сәйкес келеді. Алайда, сезімталдықты жоғарылату сызықты емес жоғарылату есебінен болады. Соңғылардың анализі нақты емес, ал сызықтық сезімталдық арасындағы байланыс 3-суретте көрсетілгендей. Бұл датчикке қызығушылық температуралық диапазоны шектелген имплантарда температураны бақылау үшін пайдаланылатындықтан, сызықты емес байланысты қателер аз (3-сурет).



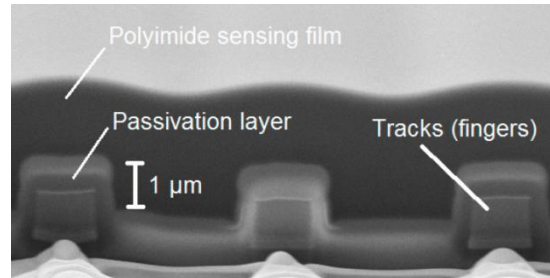
(a) төмен теріс температуралық коэффициенті бар анықтамалық ток жалпы қабылдағыш сезімталдылықты сызықтықты азайтады; (b) Сезгіштік неғұрлым жоғары теріс температура коэффициенті сызықтықтан ауытқудың эталондық жоғалтады.

3-сурет. РТАТ-ның анықтамалық токтар арасындағы қатынастың сызықтық және сапалы сезімталдық суреті берілген.

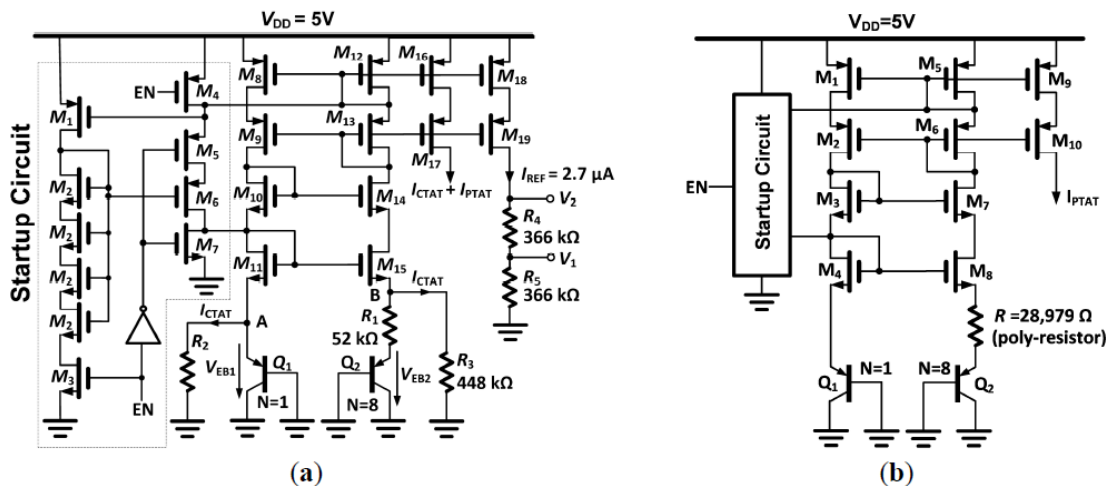
Датчиктің схемалары; Ылғалдылығы жоғары сыйымдылық негізіндегі датчик [48-51] жасалған және оны өңдеуден кейінгі қадамдар талап етпейді. Ол органикалық емес пассивация жабындысы бар жоғарғы метал қабатынан құрастырылған қабатты құрылымды қамтитын конденсаторға негізделген. Құрылымы ылғалды сезімтал пленкамен жабылады, ол оңай қол жетімді полиамидті пальтодан жасалады. [46] ішінде дайындалған сенсордың көлденең қимасы 4-суретте көрсетілген. Ұсынылған дизайнда қабаттар ұзындығы 3 мкм және аралықта $2,5 \text{ мкм}$ аралығындағы (технологияның жобалау ережелерімен рұқсат етілген минималды ені аралығы; $0,18 \text{ мм}$ X-FAB XR018). Сенсордың екі түрін әртүрлі көлемдегі конденсаторлармен бірге іске асырды. Бұл шағын құрылымдардағы сезімталдықты зерттеу үшін $1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$ (қабаттар арасында 15 pF стерилденген сыйымдылық) және $300 \text{ мкм} \times 300 \text{ мкм}$ ($1,1 \text{ pF}$ стерилденген сыйымдылық) дайындалды. Ылғалдылық функциясы ретінде оның сыйымдылығын анықтау үшін үлкен сенсорға палубалар арқылы қол жеткізілді. Чипта тестілеуде жүзеге асыратын контур құрылымдары, жекелеген блоктардың, мысалы, жолақтар қалыңдығы және РТАТ-шығысының көрсетілімі.

Температураға тәуелді емес кернеу V_1 және V_2 сілтемелері мен температураға тәуелді анықтамалық ток I_{REF} жасалады (1.7a-сурет). Топология

PTAT тогы мен қысқа арна процестерінде жиі қолданылатын дизайн болып табылатын толықтырылған-абсолюттік температура ағынын жинақтауға негізделген [50]. Өзіндік бағдарланған каскадты ток көзі (M8-M15) А және В түйіндерін бірдей кернеуде ұстап тұрушы базалық-эмитент кернеуі Q1. Косподты ағымдағы айнашамамен 2,3 В сәйкестігін талап етеді. PTAT тогы $W_{EB1}-V_{EB2}$ айырмашылығы R1 арқылы жасалады және R2 және R3 арқылы W_{EB1} арқылы генерацияланған толықтырылған-абсолюттік температура ағысына қосылады. Ағымдардың сомасы 1V(V1) және 2 V (V2). температуралық-тәуелсіз кернеу тамшыларын шығаратын R4 және R5-ге дейін айналдырылады.



1.6-сурет. Конденсатордың қабаттар арасына үш қабатты бөлінген иондық секциядағы сезгіштік арналар.



(a) Ток және кернеу көздері ұсынылымы. Барлық резисторлар n-ұңғыманың түріне жатады;(b) PTAT ток көзі.

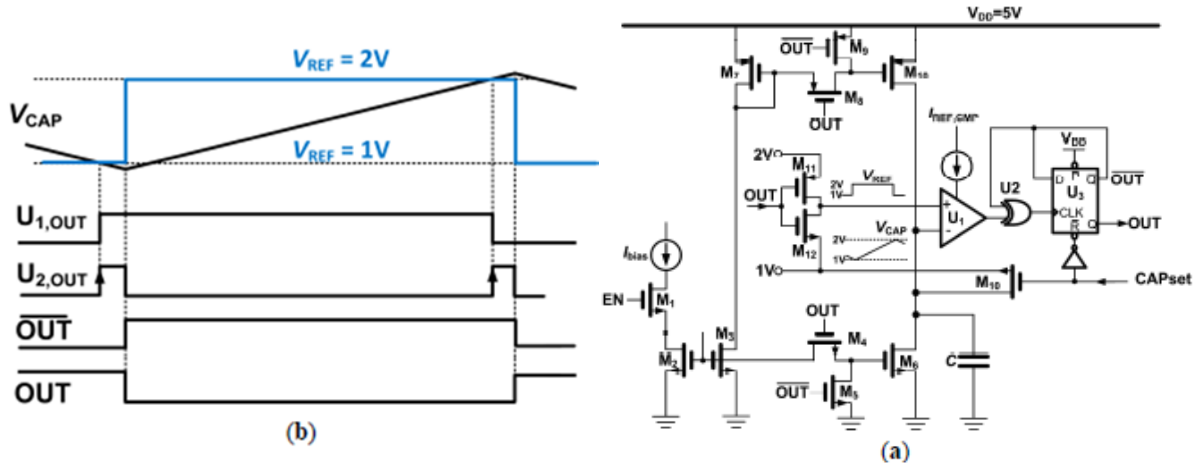
1.7-сурет. PTAT схемасы

PTAT схемасы; PTAT ток көзі 1.7-суретте келтірілген және оның топологиясы жолақты анықтамалыққа ұқсас (СТАТ токинсыз). Шығу тогының температуралық сезімталдықты одан әрі арттыру үшін поли резистор теріс температуралық -1400 ppm/K коэффициентіне ие. Схепадағы көрсетілетін жолақтар бірдей.

Осциллятордың анықтау шамасы; Осциллятор сипаттамасы 1.8а-суретте көрсетілген. Тербеліс басталғанға дейінгі, уақытша С конденсаторы (M10) және раковина (M6) белсенді активті транзисторлардан тұратын жоғары импеданс түйініне қосылған. Конденсатордың жиынтығы (CAPset) сигналдың шығуын

қалпына келтіреді және шығу түйінін төменгі шекті кернеуге қосады. Конденсатордың жылдамдығы 1V дейін, тіпті ең алғашқы зарядтауды 1.5-суретте анықталуға мүмкіндік береді. Осциллятор CAPset-ді «0»-ке осциллятордың (EN) сигналын «1» -ке қосу арқылы басталады, бұл M2, M3, M6 және M7, M10-мен құрылған 1:1 арқылы жылжымалы ток өткізуге мүмкіндік береді. Шығу транзисторлары M10 және M6 мезгіл-мезгіл өшіріледі (M5, M9) немесе M4, M8 арқылы ағымдағы аймаққа қосылады.

Бұл конструкция екінші компаратордың қуат шығынын үнемдей отырып, екі сатылы ампердің өтелмеген екі сатысы ретінде іске асырылған бірыңғай компараторды қолданады. Релаксация осцилляторы зарядтауға және уақытты өлшейтін конденсатор екеуі жақсы анықталған кернеулер арасын босатуға негізделген. Шекті мәндер конденсатордың зарядталғанына немесе зарядталмағанына байланысты ауыстырылады. Оны XOR қақпасы U2 және U3 D-триггер көмегімен орындады. Конденсатордың кернеуі төменгі шегіке жеткенде, компараторының шығысы оң қоректендіру тармағына орнатылады (1.8b-сурет). U3-нің инверттелген шығысы әлі де 0 В-ға дейін болып тұрады, U2-ні «1» деп орнатып, U3-ті қалпына келтіреді және U2-нің шығысы «0» -ге ауысады. U2 шығарылымының ұзақтығы негізінен U2 және U3 тарату кідірістерімен анықталады ол ns шамасында болады. Флип-флопты ауыстырудан бұрын пайда болған жағдайда, уақыттың қателігін азайтады (6-график). триггер ауыстыру алдында туындаған кемшіліктер шамалы уақыттық қателерге әкеледі (1.8b-сурет).



(a) Жалғыз компараторлы осциллятор; (b) осциллятордың уақыт диаграммасы (өлшемдер масштабты емес)

1.8-сурет. Старт сигналы

Басқару логикасы Verilog-да жобаланған және жай қарапайым машинадан тұрады. Старт сигналы алдымен CAPset жиілігін жоғары деңгейге орнатады, жолақты байланысы сілтемесін қосады (1.8a-сурет). M10 және M7 транзистрларын жалғайтын D-тригері шығысты қалпына келтіреді. Дегенмен, M2-M3 ағымдағы айна қосылмаған, сондықтан M7 ағымы V7D (5 V) кезінде өшіріледі. VCAP-дегі түйін, осылайша, жоғары импеданс болып ауақытты конденсатор M10 коммутаторы арқылы V1-ге дейін зарядталады. Тұрақты

коэффициенті $R4||R5$ болып табылатын тізбекті $V1$ шығаратын сыйымдылық шығыс кедергісімен анықталады және ол ылғалдылығы жоғары болғанда шамамен $2,7 \mu s$ болады. $20 \mu s$ импульс CAPset өшірмес бұрын және VCAP төменгі шегін $V1$ үшбұрышты ауытқуды бастамас бұрын конденсаторды алдын ала зарядтауға пайдаланылады. Әрбір осциллятордың шығысы есептегіштен асып кетуімен тізбектік тізілімге параллель жазылады (олардың рөлдері 1.4-суреттегі T/RH сигналына сәйкес анықталады) жеке есептегішке қосылады. Деректерді беру орын алғаннан кейін, деректерді дайын сигналдыөлшеудің соңын көрсету үшін жоғары орнатылған.

Бірінші бөлім бойынша қорытынды

Температураны және ылғалдылықты өлшеу әдістеріне, температурамен ылғалдылықты өлшейтін датчик түрлерімен танысу және оларға талдау жасау. Қазіргі таңда қолданыстағы ылғалдылық пен температураны бір уақытта өлшейтін датчиктер бар. Алайда, оптикалық талшық негізіндегі ылғалдылық пен температураны бір уақытта өлшейтін датчик жоғары сезімталдыққа, тез жауап беруге, ықшамды көлеміне және анти-электромагниттік кедергі сияқты артықшылықтарына байланысты қызығушылығымен зерттелді.

Ылғалды ортада жұмыс істеуге арналған ағзаға имплантацияланған электронды құрылғылар ағзаға кірген кезде интегралды схеманың белсенді аймағында ылғалдылық нәтижесіненен конденсация, коррозия пайда болады. Бұл датчиктің эффективтілігін (тиімділігін) жоғалтып құрылғының жұмыс істемей қалуына алып келеді. Микрокабельді схемалардың құрғақ екендігін тексерудің ең тікелей жолы, оның ішкі салыстырмалы ылғалдылығын өлшеуге арналған датчикті пайдалану.

Чипте орналасқан электроникасы бар қосымша металл-оксидті жартылай өткізгіш негізіндегі ылғалдылық датчигінің жұмысы қарастырылды. Ол бейорганикалық пассивация қабатымен жабылған, полиимидті пальпокпен қамтылған өзара бөлінген конденсатор, ылғал сезгіш датчигін құрайды. Ол кеңейтілген өңдеу кадамдарын қажет етеді. Әрі чипк орналастру үшін датчикке қажетті аймақ өте үлкен ($4\sim 2\text{мм}$). Мысалы, микроаппаратпен имплантацияланатын стимуляторларды кішкентай датчикті қамтамасыз ету керек. Сондықтан біз температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчик құрылымы жеңілдететін және чиптің қажетті аймағын едәуір азайтылған салыстрмалы ылғалдылық пен температураны бірге анықтайтын датчикті қарастыруды негізгі мақсат етеміз.

2. ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚ НЕГІЗІНДЕГІ ЛАЗЕРЛЕР АРҚЫЛЫ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ЗОНТТАУ ӘДІСТЕРІНЕ ТАЛДАУ ЖАСАУ

2.1 Оптикалық талшықтағы жарықтың таралуы

Оптикалық талшық - шыны (кремний) немесе пластиктен адам шашына қарағанда сәл қалың диаметрде жасалған икемді, мөлдір талшық [52]. Оптикалық талшықтар көбінесе талшықтың екі ұшы арасында жарық беру құралы ретінде пайдаланылады және талшықты-оптикалық байланыста кеңінен қолдануға болады, олар алыс арақашықтарда электр кабельдеріне қарағанда жоғары өткізу қабілетіне ие (деректердің жылдамдығы). Оптикалық талшықты пайдаланып сигналдар тасмалдағанда шығындары аз, сондықтан металл сымдардың орнына талшықты пайдаланады; Сонымен қатар, талшықтар электромагниттік кедергіге ұшырамайды[53]. Талшықтарды жарықтандыру және бейнелеу үшін де қолдануға болады, қапталған ормдармен олар жарықты тасымалдау үшін қолданылады немесе жабық кеңестікке суреттер жасауға болады, сондай-ақ, арнайы жасалынған оптикалық талшықтардан сенсорлар және талшықты лазерлер сияқты көптеген басқа қосымшаларда да қолданылады [54].

Оптикалық талшықтар, әдетте, сынудың төменгі көрсеткішіндегі мөлдір жабынды материалмен қапталған ядродро болып табылады. Жарық ішкі ядрода сақталады, ол оптикалық талшықа толқын ретінде әрекет етеді [55]. Көптеген тарату жолдарын немесе көлденең режимдерін қолдайтын талшықтар көп режимді талшықтар деп аталады, ал бір режимді қолдайтындар талшықтар деп аталады. Бірнеше режимдегі талшықтар, әдетте, неғұрлым кең ядролық диаметрге ие [56] және қысқа қашықтықтағы байланыс арналары үшін жоғары қуат берілетін қосымшаларда пайдаланылады. Бір молульды талшықтар 1000 метрден (3,300 фут) артық ұзындықтағы байланыс арналары үшін пайдаланылады. Талшықты-оптикалық байланыс кезінде төмен шығынмен оптикалық талшықтарды қосуға қабілетті болу маңызды. [57] Бұл электрлік сымға кабельді қосудан гөрі күрделірек, талшықтарды мұқият жалғастру керек, талшықтардың өзектерін дәл сәйкестендіру және тағы басқа осы тураланған ядролардың қосылуын қамтиды. Тұрақты қосуды қажет ететін қосымшалар үшін фьюжнді қосылым кең таралған. Бұл техникада электрлік дәнекерлеп қосқан сияқты талшықтардың ұштарын бірге ерітіп қосады. Тағы бір қарапайым әдіс механикалық күшпен байланыстыру. Уақытша немесе жартылай тұрақты байланыстар арнайы оптикалық талшықты қосқыштар арқылы жасалады. [58] Оптикалық талшықтарды жобалау және қолдану мәселелерімен айналысатын қолданбалы ғылым мен техника саласын талшықты оптика дейді. Бұл терминді талшықты оптиканың әкесі ретінде танылған үнді физигі Нариндер Сингх Капани айтқан.

1840-шы жылдардың басында Парижде Даниэль Колладон мен Жак Бабинет алғаш рет талшықты оптика принципінде жарықтандыру арқылы жарық таратты [59].

Аумақты жарық көздерімен жұқа пленкаларды жарықтандырғанда алынатын интерференция жұқа пленкалардың түстері деп аталады. Бұл құбылыс

сабын көпіршіктерінде, су бетіне жайылған мұнай пленкаларында, бұларды күн сәулесімен жарықтандырғанда байқауға болады. Осы құбылысты қарастыру интерферометрлерде, интерференциялық сүзгілерде (фильтрлерде) және басқа оптикалық құрылғыларда өтетін күрделірек процестерді түсінуге пайдасын тигізеді.

Жазық беттері параллель, қалыңдығы h мөлдір пластинаға толқын ұзындығы λ монохромат жарық түсетін болсын. Бұл жарық пластинка бетінен жарым-жартылай шағылады, жарым-жартылай оның ішіне енеді де екінші бетінен тағы шағылады. Нәтижесінде жүріс айырымы бар екі когерентті толқын пайда болады.

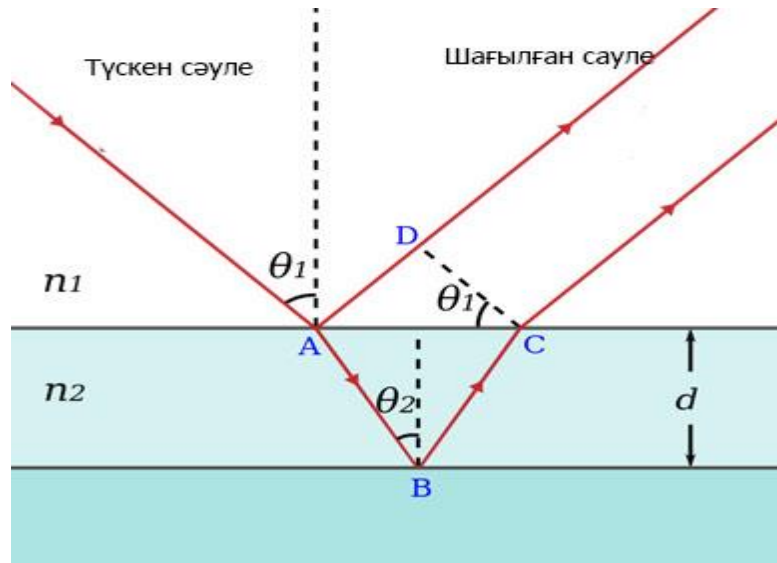
Жұқа пленкалық интерференция - табиғи құбылыс болып табылады, онда жұқа пленкалардың жоғарғы және төменгі шекараларында көрінетін жарық толқындары бір-бірімен қабаттасып көрнетін жарықты күшейтетін немесе азайтатын құбылыс. Пленканың қалыңдығы жарықтың толқын ұзындығының төрттен бірінің тақ санына тең болғанда, екі беттерден шағылысатын толқындар бір-бірін әлсіретеді толқынды көрсету мүмкін болмағандықтан, оның орнына толық трансмиссияланады. Пленканың қалыңдығы жарықтың жарты толқын ұзындығынан көп болғанда, екі толқындар бір-бірін күшейтеді, бұл шағылысуды арттырады және трансмиссияны азайтады. Осылайша, егер әртүрлі толқын ұзындығының диапазонынан тұратын ақ жарық жарық түсірсе, кейбір толқын ұзындығы күшейе түседі, ал кейбірі әлсірейді. Сабын көпіршіктері мен су бетіндегі май қабаттарынан пайда болған жұқа пленкадағы ақжарықтың шағылысуынан көрінетін көптеген түрлі түстер осы құбылысты түсіндіреді.

Жұқа пленка арқылы өтетін жарықтың шағылысуын және трансмиссиясын зерттеу пленканың қалыңдығы немесе пленкалық ортаның тиімді сындыру индексі туралы ақпаратты ашуға мүмкіндік береді. Жұқа пленкалардан дайындалған көптеген коммерциялық құралдар бар, мәселен шағылсуға қарсы пленкалық қаптамалар, айналар және оптикалық сүзгілер бар.

Жұқа пленка нанометр микрометр мөлшеріндегі қалыңдығы бар материал қабаты. Жарық пленканың бетінен шағылғанда оның үстінгі бетінен шағылуы немесе трансмиссияланады. Трансмиссияланған жарық төменгі бетке жетіп қайтадан шағылу арқылы кері трансмиссияланады. Френеля теңдеулері жарықтың қаншалықты интерфейс арқылы тасымалданатынын немесе көрсетілетінін сандық сипаттамамен қамтамасыз етеді. Жоғарғы және төменгі беттерден шағылып қайтқан жарық толқындары бірін әлсіретеді немесе бірін күшейтеді. Екі жарық толқындарының қабаттасуы немесе бірін бірі әлсірету дәрежесі олардың фазасындағы айырмашылыққа байланысты. Өз кезегінде бұл айырмашылық пленка қабатының қалыңдығына, пленкадағы сыну көрсеткішіне және пленкаға түскен жарықтың бастапқы толқындар жиілігінің бұрышына байланысты болады. Сонымен қатар, 180° немесе π радианды фазалық жылжуы шекараны екі жағындағы материалдардың сыну көрсеткіштеріне байланысты көрсетілу арқылы енгізілуі мүмкін. Бұл фазалық ауысым, егер жарықты беттің шағылыстыру индексі өтіп барып шағылған материалдың шағылыстру индексінен аз. Ол былай болады $n_1 < n_2$, жарық 1-материалдан өтіп 2-

материалға дейін жүреді, содан кейін фазалық өзгеріспен шағылып қайтады. Бұндай жарықтың шағылысуынан туындайтын жарық үлгісі жарық немесе қараңғы жолақтар болады, оқиға орнының жарық көзіне байланысты түрлі-түсті жолақтар ретінде көрінуі мүмкін.

Жұқа пленканың жоғарғы және төменгі шекараларындағы жарықтың сыну индекісін қарастырамыз. Жарықтың шағылысу жағдайын анықтау үшін көрсетілген жарықтың оптикалық жол айырмасын(ОЖА) есептеу керек. 1-суретте көрсетілген диаграммаға сай екі толқындар арасындағы ОЖА төмендегідей:



1-сурет. Жұқа пленкадағы жоғарғы және төменгі шекаралардан шағылатын жарықтың оптикалық жол ұзындығының айырмашылығы

$$\text{ОЖА} = n_2(\overline{AB} + \overline{DC}) - n_1(\overline{AD}) \quad (3.1)$$

Мұнда

$$\overline{AB} = \overline{BC} = \frac{d}{\cos(\theta_2)}$$

$$\overline{AD} = 2d \tan(\theta_2) \sin(\theta_1)$$

Снеллазаңын қолданамыз

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\text{ОЖА} = n_2 \left(\frac{2d}{\cos(\theta_2)} \right) - 2d \tan(\theta_2) n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\text{ОЖА} = 2n_2 d \left(\frac{1 - \sin^2(\theta_2)}{\cos(\theta_2)} \right)$$

$$\text{ОЖА} = 2n_2 d \cos(\theta_2)$$

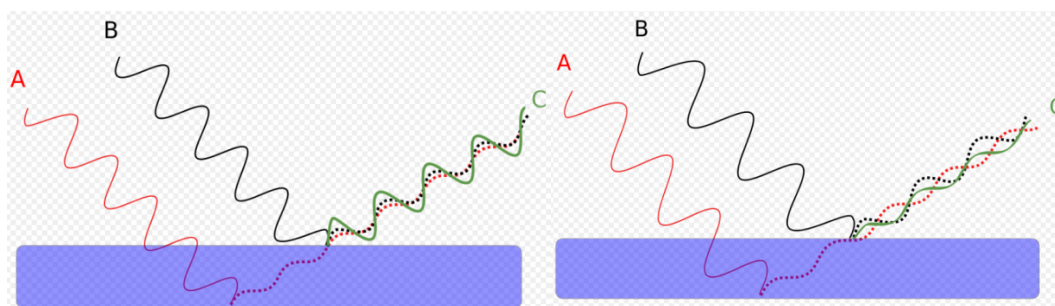
Егер оптикалық жол айырмасы жарықтың толқын ұзындығының бүтін санына тең болса интерференция құбылысы айқын болады яғни жарық күшейеді.

$$2n_2 d \cos(\theta_2) = m\lambda \quad (3.2)$$

Бұл құбылыс жарық шағылған кезінде пайда болатын фазалық ауысулардан кейін өзгеруі мүмкін.

Кең жолақты жарық көзі: Егер инциденттерге арналған жарық кең жолақты болса немесе күннен түскен жарық сияқты ақ болса, интерференциялық үлгілер түсті жолақтар ретінде пайда болады. Жарықтың әртүрлі толқын ұзындығы түрлі пленкалардың қалыңдығына байланысты шағылысады. Пленканың әртүрлі қалыңдықтағы жерлерінде әртүрлі түстерде пайда болады.

Өзара фазалық әрекеттесу: Бұл жарықтан пайда болған құбылыстардың көпшілігіне жауап беретін фазалық қатынастарды түсіндіруді. 2-суретте екі жарық сәулелері (А және В) көрсетілген. Әрбір сәуленің шағылған сызбасы салынған. сәулелердің көрінісінде А-ның төменгі беттен шағылуы, В-нің жоғарғы беттен шағылуы берілген. Бұл шағылысқан сәулелер нәтижесінде С сәулені алу үшін біріктіріледі. Егер шағылған сәулелер бірдей фазада болса (Бірінші суреттегідей) сәуле салыстырмалы түрде күшті. Егер екінші жағынан, көрсетілген сәулелердің фазасына қарама қарсы болса, нәтижесінде алынған сәуле азаяды (екінші суреттегідей).



2-сурет. Фазалардың конструктивті өзара әрекеттестігі және деструктивті фазалық өзара әрекеттесу

Екі көрсетілген сәулелердің фазалық қатынасы пленкадағы А сигналының толқын ұзындығын және қабықтың қалыңдығының арасындағы байланысты көрсетеді. Егер пленканың астыңғы бетіне шағылатын жалпы қашықтық сәулесі толқын ұзындығының толық санына тең болса, онда көрсетілген екі сәуле фазасында бірінші суретте бейнеленген жарық толқындары бірін бірі күшейтеді немесе конструктивті түрде араласады. Егер А сәулесінің пленкадан өтетін арақашықтық толқын ұзындығының толқын ұзындығынан көптігі болса, сәулелер деструктивті түрде араласады немесе әлсірейді (екінші суреттегідей). Осылайша, осы суретте көрсетілген пленка бірінші фигурадағы жарық сәулесінің толқын ұзындығында болғанда жарық күшейеді және екінші пішіндегідей болған жағдайда әлсірейді

Егер жарық толқынының ұзындығы кеміген сайын, n сыну көрсеткіші артатын болса, мұндай жарық дисперсиясын қалыпты дисперсия деп атайды (7.3-сурет), ал егер, керісінше, жарықтың толқын ұзындығы артқан сайын сыну

көрсеткіші де артатын болса, мұндай жарық дисперсиясын аномаль дисперсия деп атайды.

Әдетте, аномаль дисперсия, зат сәулелер бөлігін жұтқан кезде жұтылу аймағында және оған жақын жақтарда байқалады.

2.2.1 Оптикалық талшықты датчиктер

Оптикалық талшықтар ішкі сезімтал датчиктер ретінде пайдаланылады немесе қашықтықтан датчиктердер сигналдарын өңдейтін электрониканың сигналдарды беру құралы ретінде де пайдаланылады. Талшықтардың қашықтықтан сезгіштікті анықтауда қолдану өте көп таралған. Талшықтың өлшемінің кішкене болуына және қашықтағы жерде электр қуаты болмаған жағдайда, көптеген анықтаулар немесе өлшеулер талшықтың ұзындығындағы әрбір жарық толқындарының ауысуы арқылы мультиплекстеу, датчиктердегі әр жарық сезгіштік арқылы талшық бойымен жарық өтетін уақыттың кешігуіне байланысты анықтаулар да қолданылады. Талшықты-оптикалық датчиктер электромагниттік кедергілерге де иммунитетті болып табылады және жоғары кернеулі электр қуатқа төзімді жерлерде пайдаланғанда электр энергиясын өткізбейді. Талшықты-оптикалық датчиктер материалына сәйкес жоғары температураға да төзімді бола алады.

Ішкі сезімталдылыққа байланысты оптикалық датчиктер

Оптикалық талшықтың деформациялық түрленуі негізінде [60] температура, қысым және басқа да шамаларды өлшеу датчиктер ретінде пайдаланылады. Мұнда талшықтың өзгерісі арқылы жарықтың өтімділігі, фазасының ауысуы, поляризациялану, толқын ұзындығының өзгерісі немесе жарықтың жету уақыты шамаларын модуляциялау негізінде өлшенеді. Жарық өтімділігі өзгерісіне негізделген датчиктер өте қарапайым, себебі қарапайым жарық көзі және детектор болса жеткілікті. Оптикалық талшықтың ішкі сезгіштігіне негізделген датчиктер әсіресе үлкен қашықтыққа бөлінген сезімталдықты қамтамасыз етуде пайдалы ерекшелігі бар [61].

Оптикалық талшықтардың температураға байланысты өзгерістерден жарық спектрорының жоғалуына байланысты Раман шашырауын оптикалық талшықтағы Бриллюин күшейткішіне талдаулар жасау мен өлшеуге болады. Жарықтың поляризациясын кернеу немесе электр өрісінің функциясы ретінде өзгерту арқылы электрлік кернеуді арнайы оптикалық талшықтармен сызықты емес оптикалық әсерлермен анықтайды. Бұрыштық өлшеу датчиктері Саньяка эффектісіне негізделген. Оптикалық талшықтар сейсмикалық және соңғы қосымшаларға арналған гидрофондар ретінде де қолданылады. Бір модольды талшықты кабельге арналған жүзден астам сенсорлы гидрофондар жүйесі әзірленеді. Неміс компаниясы Sennheiser оптикалық талшықтарды пайдаланып лазерлік микрофон жасады. [62]

Талшықты оптикалық микрофон мен талшықты оптикаға негізделген құлақ аспаптары күшті электр немесе магнит өрісі бар жерлерде пайдалы, мәселен магниттік-резонанстық бейнелеу аппаратымен науқаста жұмыс

істейтін адамдарға сондай-ақ магниттік-резонанстық гидравликалық хирургия кезінде байланыс құалы ретінде пайдаланылған ыңғайлы.[63]

Мұнай ұңғымаларында шұңқырды өлшеу үшін температуралық және қысымға арналған оптикалық талшықты датчиктер әзірленді. [64,65] Талшықты-оптикалық датчиктер қоршаған орта үшін өте қолайлы, өйткені ол жартылай өткізгіштер өте жоғары температурада жұмыс істей алмайды (температуралық өзгерістен пайда болатын сезгіштікке байланысты).

Оптикалық талшықтар негізінде Boeing767-де және кейбір автомобиль модельдерде (навигация мақсатында) пайдаланылатын талшықты-оптикалық гироскоптар интерферометрге негізделіп жасалған. Олар сондай-ақ сутегінде пайдаланатын датчиктер жасау үшін де қолданылады. Талшықты-брагг торларын пайдаланып өте жоғары дәлдікпен бір уақытта бірге орналасқан температураны және деформацияны өлшеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктерде әзірленген. Бұл әсіресе шағын немесе күрделі құрылымдардан ақпарат алу кезінде пайдалы. [66]

Айнымалы тоқта және тұрақты тоқтағы кернеулердің орташа және жоғары жоғары жиілік (5 МГц-1 ГГц) электромагниттік өрістерде тиісті құрылымы бар талшықта туындаған сызықты емес әсерлер арқылы анықталуы мүмкін. Қолданылатын талшық Фарадей және Керр әсерлері сыртқы өрістің болуында елеулі фазалық өзгерістерге негізделіп жасалынады. [67] Тиісті сенсорлық дизайнмен талшықтың бұл түрі, түрлі электрлік және магниттік өлшемдерді және талшық материалының әртүрлі ішкі параметрлерін өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Электр қуатын поляриметриялық анықтау схемасында тиісті сигналды өңдеуге байланысты құрылымдық талшықты амперлік сенсорды пайдалану арқылы талшықта өлшеуге болады. Эксперименттер техниканы қолдауға арналған. [68]

Талшықты оптикалық датчиктер доғалық жарылыс кезінде энергияны азайту үшін тез өшіруге мүмкіндік беретін сандық қорғау релелелі ажыратқыш ретінде де қолданылады. [69]

Сыртқы сезімталдылыққа негізделген опткалық талшықты датчиктер; Сыртқы талшықты-оптикалық датчиктер оптикалық талшықты кабельді, әдетте мультимоды оптикалық бергіштен немесе оптикалық бергішке қосылған электронды датчиктерден модуляцияланған жарықты беру үшін пайдаланылады. Сыртқы сенсорлардың басты артықшылығы - олардың қол жетімсіз жерлерге жету мүмкіндігі. Мысалы, қозғалтқышта орналасқан радиациялы аймақтағы сәулелену пирометріне үшін талшықты пайдаланып ұшақтың реактивті қозғалтқыштарындағы температураны өлшеуге болады. Сыртқы датчиктер сонымен қатар электр трансформаторларының ішкі температурасын өлшеу үшін де пайдаланылуы мүмкін, себебі ондағы шеткі электромагниттік өрістер басқа да өлшеу әдістерін жасауға кедергі жасайды. Сыртқы талшықты-оптикалық датчиктер шудың әсерінен бұзылатын сигналдарды қорғауды қамтамасыз етеді. Өкінішке орай, көптеген дәстүрлі датчиктер электрлік сигналдар арқылы жұмыс істейді, ал оған талшықты пайдалану үшін оптикалық сигналға айналдыру қажет

болады. Мысалы, платиналы кедергілі термометрі температураның өзгеруіне байланысты кедергісі өзгереді. Сондықтан PRT электр қуатымен жабдықталуы керек. Модуляцияланған кернеу деңгейінде PRT шығуын оптикалық талшықтарға енгізілуі мүмкін әдеттегі түрлендіргіш арқылы. Бұл өлшеу процесін қиындатады және төмен кернеулі қуат кабельдерін түрлендіргішке бағыттау керек дегенді білдіреді.

Сыртқы оптикалық датчиктер дірілді, айнаруды, ығысуды, жылдамдықты, жеделдетуді, бұру күші мен температурасын өлшеу үшін қолданылады. [70]

Оптикалық талшық негізіндегі химиялық датчиктер және био-оптикалық датчиктер; Оптикалық талшықтағы жарықтың таралуы – жалпы ішкі шағылысу принципі мен таралу кезінде қабырғаға шағылысудың нөлдік жоғалуына негізделіп талшықтың ядросымен таралады, бұл оптикалық байланыс үшін өте маңызды, бірақ жарықтың қоршаған ортамен әсерлесуіне байланысты жарықтың толықтай таралуын азайады, сондықтан, жарықтың таралуын бұзудан қорғайтын жаңа оптикалық талшық құрылымдарын пайдалану қажет, осылайша жарықты қоршаған ортамен өзара әрекеттесуін қорғауға және оптикалық талшықты датчиктерді жасауға қажет. Жарықтың талшықтағы таралуын жақсарту үшін осы уақытқа дейін жылтырату, химиялық тұндыру, конукация, иілгіштікті жақсарту сондай-ақ фемтосекунд торлы жазықтары ұсынылды. Аталған талшықты-оптикалық құрылымдар жарық толқындарының жоғарылауын жарықтың қоршаған ортамен әсерлесуін бодырмауды әрекеттесуін қамтамасыз ету үшін тиімді болды. Алайда, талшықтар сезімталдығы төмен және нөлдік селективтілігі өте аз анализдердің түрлеріне ғана сезгіш болды, бұл олардың қосымшаларын дамытуда, әсіресе жоғары сезімталдық пен жоғары селективті талап ететін био-сенсорлар үшін айтарлықтай шекту болды. Осындай қиындықтарды еңсеру үшін қоршаған орта әсер ететін жағдайлар өзгерген кездегі жарық спекторының жұтылуы, жарықтың өткізгіштігіне және т.б. сияқты қасиеттерін өзгертпеуге қабілетті материалдарды қолдану тиімді.

Соңғы жылдардағы функционалдық материалдардың жылдам жетілуіне байланысты оптикалық талшықты химиялық сенсорлар мен биосенсорларды дайындау, соның ішінде граф, металдар мен металл оксидтері, көміртекті нанотрубалар, нанотехнологиямен жасалған трубалар, нано-бөлшектер, полимерлер, кванттық нүктелер және т.б. әртүрлі сезімталдылыққа ие материалдар бар. Жалпы алғанда, бұл материалдар қоршаған ортаға (мақсатты талдаушыларға) байланысты өздерінің пішінін, көлемін өзгермелі болатын материалдардан жасалынған, сондықтан олар ИК өзгерістеріне немесе сезімтал материалдардың жарықты өткізуіне байланысты түрленеді. Демек, қоршаған ортаның өзгеруіне сай өзгертін функционалды сезімталдылығы бар оптикалық талшықтардың материалдары жасалууда. Қазіргі уақытта түрлі талшықты-оптикалық химиялық датчиктер мен биодатчиктер ұсынылып отыр[71].

2.2.2 Фемтосекундты лазерлі индуцирленген оптикалық талшықты Брэгг торлары

ОТБТ құру үшін қуатты фемтосекундтық лазерлі көзді қолдану ең алғаш 2003 жылы көрсетілген [77]. фс-ИК лазер әсерінің нәтижесінде пайда болатын Δn индуцирленген торлар, бұл қарапайым Талшықты Брэгг торлары(ТБТ) аса жоғары температурада тұрақты, индуцирленген УК-лазер болып табылады. Жоғарыинтенсивті сызықтық емес көпфотонды процесс, бұл фемтосекундтық лазерлі индуцирленген индекстің өзгеруі кезінде пайда болады, бірнеше реттік процестің төменгі индекстің УК-фотонның жұтылуы өзгелерден ерекшеленеді, бұл ультракүлгін сәуленің әсерлесуімен байланысқан p_s немесе CW, бұл ТБТ бірінші ұрпағының технологиясында қолданылады. Бұл FsG процесінде ТБТ УК-лазерінің жазбасымен салыстырғанда қарапайым болып табылады, әсіресе, ультракүлгін жарық сезгіш талшықтар кремний диоксиді негізінде қолданудың қажеттілігін жою. ТБТ толқын каналының кез келген материалына орнатылуы мүмкін, бұл таза кремний диоксиді үшін, фторид, боросиликат, висмут оксиді, халькогенид және алюинсиликатты шыны, сонымен қатар, сапфирдің кристалдық толқын арнасы сияқты материалдар төменгі сигналды инфрақызыл сәуле үшін мөлдір болып табылады. фс-ИК немесе фс-сәуле көзін қолданған кезде, индекстің өзгеру процесінің сызықтық емес сипатқа ие болуы толқын арнасы арасындағы босаңсу температурасы ТБТ тұрақты болуын қалыптастырады. Мұндай торлар қоршаған ортаның қатаң жағдайына жоғары температуралы анықтауда таптырмас құрал.

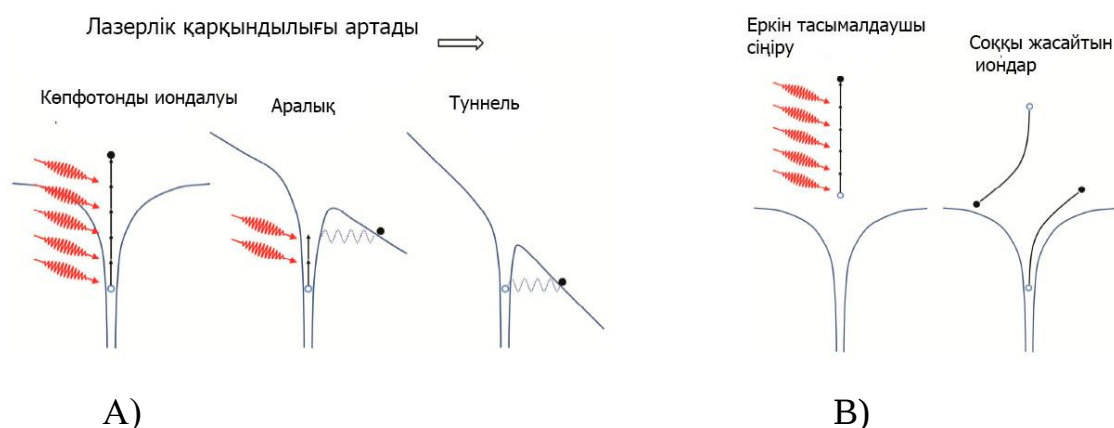
2.2.3 Фемтосекундтық лазердің индуцирлеу индексінің өзгеру механизмі

Шыңның аса жоғары интенсивтілігі, фокусталған фс-ИК лазерлік сәулеге түрленуі мүмкін, олар ретті толқын арнасын құруға жасалған көлемді шыныдағы индексті құбылтуы мүмкін [78]. Лазерлік сәуленің шыңдық интенсивтілігі $>10^{13}$ Вт/см² шыныдағы лазерлік импульс, кезіндегі жарықтың иницирленген сызықтық емес жұтылуына жеткілікті болып табылады. Бұл жұтылу фокальды көлемде пайда болған электронды плазманың жоғары локалданған энергиясын шегеруге әкеледі. Кейіннен электронды плазмамен лазерлі-қоздырылған энергия бірнеше пикосекундтан кейін көлемді материалдың торына көшеді, бұл материалдың тұрақты модификациясына әкеледі. Бұл модификация материалдың тығыз түрінде, ақаудың қалыптасуы, локалды балқу, нано-өлшемдердің қалыптасуы немесе микробалдырлардың пайда болуы мүмкін. Қалыптасқан модификация типі лазерлік импульстің интенсивтілігі мен лазерлік сәуленің жағдайына байланысты болады.

2.2.4 Еркін электронды плазманың пайда болуы

Мөлдір диэлектриктер төмен интенсивтілікпен түскен жарықты жұтпайды, яғни, фотондардың жеке энергиясы тыйым салынған зонаның көлденең енінен өтуге жеткіліксіз және олар сызықтық түрде диэлектрикпен жұтылуы мүмкін. Интенсивтіліктің жеткілікті болуын зерттеу саласында көптеген фотондар бірізгі валентті зонада электрондармен жұтылуы мүмкін, бұл оны өткізгіштік зонасына ауысуына әкеледі, егер жұтылған фотондар энергиясы тыйым салынған зона ұзындығынан көп болған жағдайда ғана. (2.1a-суретті

қараңыз). Аса жоғары интенсивтілік кезінде валенттік зона мен өткізгіштеік зона арасында потенциалды барьер тудыруы мүмкін, бұл туннельдеу арқылы сызықтық емес ионизациялануға әкеледі [79,80]. Енді электрондар өткізгіштік зонасында еркін жұту тасымалдауыштары арқылы түскен лазерлік жарықты қосымша жұта алады (2.1b суретті қараңыз). Қоршаған материалдағы байланысқан электрондар одан кейін жылдам еркін электрондардың иондық соқтығысуына ұшырайды, олар тасымалдауыштардың еркін жұтылуына және оданда тығыз байланысқан электрондарға иондық соқтығысуларына алып келеді. Бұл лазер интенсивтілігіне сызықтық байланысқан қайталанатын процесс лазерлік жол жеткілікті интенсивті болған кезге дейін жалғасады, бұл электрондық тасқынның түрленуіне әкеледі.



(а) еркін электрондарды түрлендіретін көп фотонды және туннельді ионизация, ал (б) тасқынды ионизацияға әкелетін сәулені жұтатын және иондалатын қоршаған материалға соқтығысу.

2.1-сурет. Жоғары интенсивті импульс кезіндегі еркін плазманың қалыптасу схемасы

Тасқынды ионизация үшін өткізгіштік зонасында электрондардың саны жеткілікті болуы қажет. Лазерлік импульстің ұзақтығының салыстырмалы ұзақтығы кезінде (>10 пикосеконд), бұл қозушы электрондар көбінде ақаулардың немесе соқтығысудың кездейсоқ араласуының жағдайларында пайда болады, олар термиялық қоздырылғандар болып табылады. Бұл кездейсоқ процесс материалдың модификациясы үшін анықталмаған флюенстарға жол ашады (энергия/бірлік аудан), ол квадраттық түбірдің лазерлік импульс ұзақтығына тәуелді болып табылады [79]. Лазерлік импульстар үшін пикосекундтар қысқа, тасқынды ионизация үшін қозушы электрондар кездейсоқ жылудың әсерінен емес, тура сызықтық емес ионизация процесінің нәтижесінде түрленеді. Бұл материал модификациясын детерминирленген бастапқы флюенсіне әкеледі. Электрондардың өткізгіштік зонасында торға энергия ауысқан кезбен салыстырғанда аса тез қызады. Өткізгіштік зонасындағы электрондардың плазмалық бөлшегі түскен лазерлік сәуле бөлшегімен сәйкес келгенге дейін, еркін электрондардың тығыздығы тасқынды ионизация процесі кезінде арта түседі, одан плазмаға түскен жарықты қатты жұтады [80].

Электронды плазма қатты жұтылатын нүкте еркін электрондар үшін плазманың шектік тығыздығы деп аталады, ол ең жақын инфрақызыл лазерлік сәуле үшін 10^{14}ВТ/см^2 құрайды. Түскен лазерлік жарық лазерлік импульс кезінде бұрынғыдай қатты жұтыла береді. Лазер энергиясының маңызды бөлігі плазманың аса жоғары тығыз кезінде байқалады. Оптикалық бұзылу плазманың шектік тығыздыққа жеткен кезінде байқалады деп жобаланады, бұл шыны үшін шамамен 10^{14}ВТ/см^2 интенсивтілігі кезінде орындалады.

Лазерлік импульстің ұзақтығы үшін пикосекунд жұтылған лазер энергиясы торға ауысқанға дейін жеткіліксіз уақыт болып табылады. Маңызды ауысу лазерлік импульс тоқтағаннан кейін ғана жүзеге асады. Оның орнына, энергияның сақталуы материалдың жылу диффузиясының уақытымен салыстырғанда, өте тез масштабта орындалады. Егер лазерлік сәуле материал бетіне немесе тұрақты құрылымдық өзгеріске бағытталған болса, егер лазерлік сәуле көлемге бағытталған болса бұл материалдың абляциясына әкеледі. Бұл наносекунд тұратын ұзақ импульстар үшін орындалмайды, яғни лазер плазмаға энергия беруін жалғастырып жатқанда энергияның торға ауысуы процесі орындалады. Одан кейін жоғары интенсивті лазерлік аумақтың шегінде торлар апатты түрде бұзылады және классикалық лазерлік шығын пайда болады.

2.2.5 Индексті өзгертудің индуцирленген режимі

Мөлдір диэлектриктердің фемтосекундтық лазерлік модификациясы еркін электрондардағы плазманың жарықтың сызықтық емес жұтылуы кезеңімен орындалады деп санаған жақсы. Алайда, электрондар энергиясының торға ауысуы орындаған сәттен бастап, материалдың модификациялану мехонизмі толық түсінікті болмайды. Лазермен қалыптасқан, негізгі үш типті материал модификациясы идентификацияланды: (1) Сыну көрсеткішінің баяу өзгеруі, яғни легирленген Ge талшықтарында I типті индекстің индуцирленген УК-лазерлік өзгеруі сияқты аналогты өзгерістері [81], (2) өзіндік қалыптасқан наноқұрылымдардың [82,83] қосарлы сәуленің сыну модификациясының формасы (3) материалдың ішіндегі индуцирленген жарықтан пайда болатын микро-жарылыстардың әсерінен материалдың бұзылу/бостық [84]. Аса маңызды параметрлер бұл импульстің ұзақтығы, импульс энергиясы, импульс өрісі, импульстің қайталану жиілігі, бір орында пайда болған импульс саны, лазерлік сәуленің бағытталу жағдайына талаптар (яғни, тығыз немесе әлсіз бағыт) және лазердің ұзындығы [85–88]. Импульс ұзақтығы, импульс энергиясы мен лазерлік фокальды дақтың ауданына тәуелді шыңдық импульстің интенсивтілігі, лазерлік жазба процедуасының нәтижесін нақты айтуда тек бір ғана параметр ретінде пайдаланыла алмайды.

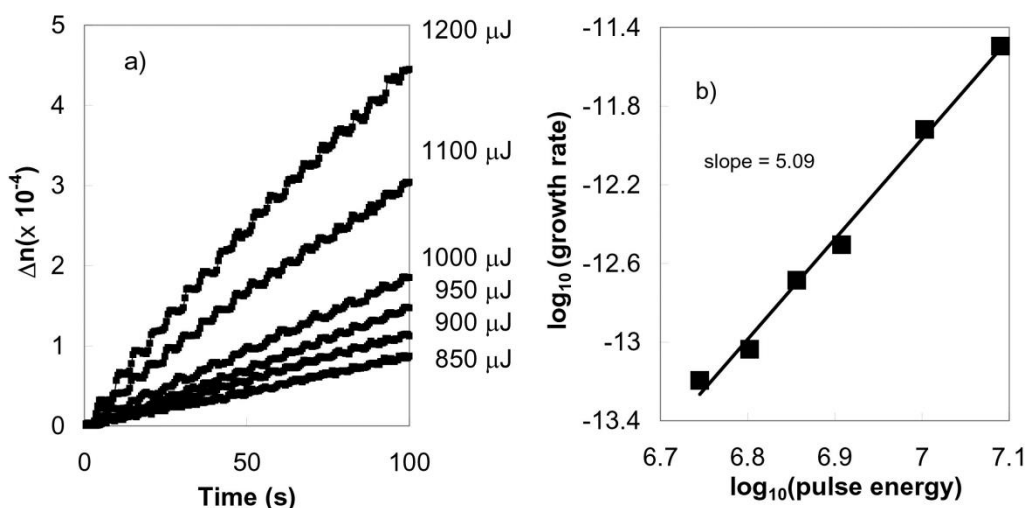
I типтің сыну көрсеткішінің өзгеруі немесе тегістелуі

800 нм фемтосекундтық импульс көлемді кремний диоксидінде индуцирленген, сыну көрсеткішінің баяу өзгереді, 900°C температурадан жоғары кезде суыну толығымен жойылады. Кремний диоксидін микро Романов спектроскопиясында зерттеу барысында, яғни жоғары фс-ИҚ сәулелену кезінде, индекстің баяу өзгеруі кремний құрылымындағы 3 және 4-сақианалардың

концентрациясының жоғарылауынан пайда болатын материалдың тығыздалуының әсері екендігін көрсетті [89]. Өзіндік экситонды ақаулардың болуы да индекстің баяу өзгеруімен байданысты, сонымен қатар, 475 нм лазерлік экспозиция $\sim 5 \times 10^{13}$ Вт/см² интенсивтілік кезіндегі көк эмиссияның әсері екендігі анықталды [90]. ИҚ-лазердің легирленген Ge көлемді кварцты шынымен шағылысу кезінде ауаның жетіспеушілік ақауын құру (GeE', SiE') және ауаның көпір емес орталықтарын (NBOHC) құруы туралы айтылды. Дәл осындай дефектінің пайда болуы стандартты ТБТ жазбасымен ТФс-лазерлері үшін де маңызды болып табылады.

Оптикалық талшықтағы, легирленген Ge фазалық маскада және 800 нм ИҚсәулеленудің көптеген импульсті сәулеленуінің ТБТ жазбасы талшықтағы I типті сыну көрсеткішінің баяу өзгерісін түрлендіре алады. Индекстің өзгеру шамасы торлардың жазбасы үшін қолданылған лазердің бесінші дәрежелі интенсивтілігінде өзгереді, бұл 5-фотондардың жұтылу процесін көрсетеді [91]. Бұл қуатты масштабтаудың бесінші тәуелділігі лазердің интенсивтілігі мен индекстің индуцирленген өзгерістері 2.2-суретте көрсетілген. Легирленген бұл Ge кремний диоксидінің легирленген деңгейі үшін тыйым салынған зонаның ұзындығы телекоммуникациялық талшықпен ұқсас, ол ~ 7.1 эВ тең. Бұл тыйым салынған зона 800 нм бір фотонның энергиясынан 1,55 эВ көп. Екінші жағынан, 800 нм бес фотонның бірізгілікте жұтылуы жалпы 7,75 эВ энергияны құрайды, бұл 7,1 эВ легирленген кварцты зонаны өтуге жеткілікті энергия болып табылады. I-IR және I-UV типті торлар термиялық қызуда дәл осындай сипатқа ие, яғни бұл дефект механизмінің ұқсастығы және индекстің индуцирленген өзгерісінің тығыздалуы диоксид кремнийде ТБТ I-IR типінде және легирленген Ge пайда болуы мүмкін.

Жарық орталығының тығыздалуы және қалыптасуы, фемтосекундық лазерлік әсермен байланысқан индекстің баяу өзгерісін ықпал етуі ықтимал; бірақ, индекстің өзгеруіне әрбір процестің салыстырмалы түрде ықпал етуі шыны құрамына тәуелді болып табылады. Стандартты телекоммуникационды оптикалық талшықтың, легирленген Ge сутекті нагрузка әсері, мысалы, I типті режимде ТБТ қалыптасуында 3 есеге бастапқы интенсивтілікті төмендетеді. Бұл нәтиже, талшықтағы УК-сәулелің негізінде ТБТ жазуға қолдануға, легирленген Ge, H₂-жүктелуі және Ge құрамы жоғары ядро үшін жарықсезгіштікті жоғарылату әдісі жоғары интенсивті fs-IR ИҚ лазерлік жүйе ретінде қолдануға болатындығын көрсетеді.



(a) Δn уақыт пен импульс энергиясына байланысты индексті модуляцияның өсуі. (b) Δn энергия функциясы ретінде өсу ырғағының масштабты сипаты

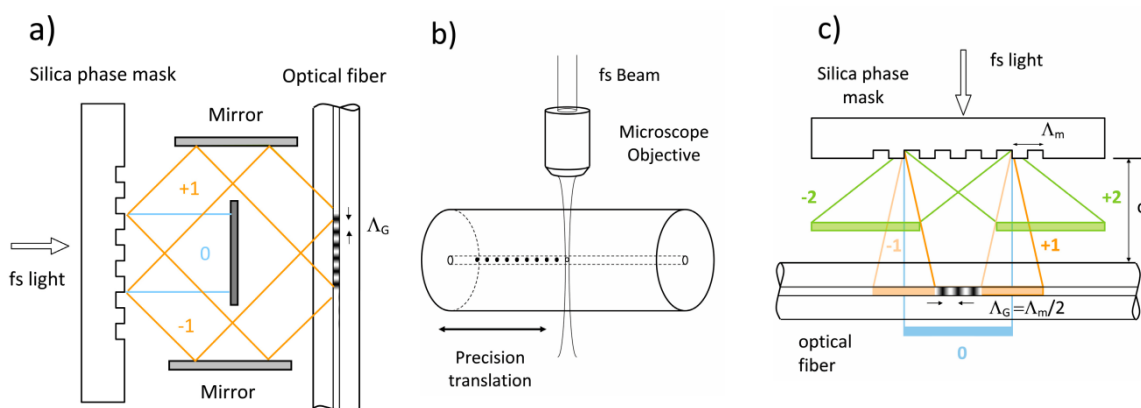
2.2-сурет. уақыт пен импульс энергиясына байланысты индексті модуляция [91]

Сәуленің қосарлы-сыну индексінің өзгеруі (II тип) Диэлектриктік ойыққа әкелетін лазерлі-материалдың әсері балқу температурасына жақын тұратын индекстік өзгеруіне әкеледі. Импульстің ұзақтығы >10 , диэлектрлік ойық материалдың елеулі бүлінуіне және лазердің зақымдалуына байланысты болады. <1 пикосекунд импульстар үшін, лазермен индуцирленген диэлектрлік ойық жоғары қосарлысу бар сыну көрсеткішінің өзгеруіне әкелуі мүмкін. Бұл қосарлысу, шын мәнінде, форманың қосарлысынуы, өзіндік қалыптасатын периодты нанографацияның пайда болуының нәтижесі болып табылады. Нанографтың бағыты жазылған лазердің поляризациясына перпендикуляр және де бірнеше импульстің жұтылу нәтижесі екендігін көрсетеді. фс инфрақызыл ипульсті, сонымен қатар фс-тың көрінетін импульсті пайдалана отырып наноөлшемді құрылымның қалыптасуы туралы айтылғанымен [92], бірақ фс-UV УК көзді пайдалану туралы айтылмаған.ТБТ фс-UV УК негізінде термотөзімді торды жасай көрсетілмеген. ТБТ фс-UV УК тек 1 типті режимде ғана тіркелген болатын.

Белгілі бір бағыттағы фемтосекундты импульстің шыңдық интенсивтілігі 10^{14}Вт/см^2 шегінен асқандығы байқалған, шектелген микро резонаныстар нәтижесінде көлемді шыны ішінде микро бұзылуларды тудырады. Фокальды көлемдегі түрленген қысым материалдағы Юнг модулінің шегінен шығады, бұл электрондар өз энергияларын иондарға бергеннен кейін соқтығу толқындарын тудырады. Бұл процестің уақытша интервалы 10пс құрайды. Массаның сақталуын ескере отырып, соқтығу толқыны сұйытылған материал немесе микро шығы аумағынан тығыздығы аса жоғары материалмен қоршалған, жоғары сыну көрсеткішіне ие аумаққа шығады.

2.2.6 Оптикалық талшық лазерлер негізіндегі Брэгг торлары қабаттасудың фемтосекундтық әдістері

Массалық интерферометрлер: оптикалық талшықты Брэгг торлары(ОТБТ) УК-сәулеленуінің негізіндегі жазбасын құру кезіндегідей, фс-ИҚ лазерлік көзін пайдалана отырып Брэгг торы жазбасы үшін үш негізгі әдіс туарлы айтылған. Бірінші көрсетілген амал көлемді кремний қоспаларында индекстің периодты түрде өзгеруі үшін көлемді интерферометрді қолданды. Бұл әдісті талшықтағы торларды дайындау үшін қолдануға болмайды, бірақ ол жабық фемтосекундты сәуленің құлау бұрышына байланысты торлардың әртүрлі периодын жасауға қабілеттілігінің болуымен ерекшеленеді. Бірақ, кедергі келтіруші екі сәуленің ұзындығы импульсқа кедергі тудыруы үшін және интерференционды бейне пайда болуы үшін кеңістікте иіліп таралатын фемтосекундты импульспен келісілген болуы тиіс. Мысалы, 30 фс электромагниттік өрістің кеңістіктік бұлты бар болғаны 10 мкк. құрайды. Сәйкесінше, кедергі келтіретін екі сәуленің жолдарының ұзындығы 10 мкм. дейінгі дәлдікпен болуы керек. Тәжірибе жүзінде көлемді интерферометрде оған қол жеткізу өте қиын, әсіресе, өндірістік ортада. Тальбот интерферометрі (2.3а-суретті қараңыз) көлемді интерферометрлік түрленген түрі болып табылады, бұл жерде фазалық маскасы осы теңдіктің кейбір шегін әлсірете отырып сәулені ажыратушы ретінде әсер етеді. Ол фемтосекундты УК ТБТ орналастыруда және көрінетін көздер үшін сәтті пайдаланылады [93].



а) Тальбот интерферометрі, (b) нүктеден нүктеге дейін және (c) фазалық маска. Бағыттар Λ_G қорытқы торлардың периодын көрсетеді. Суреттегі кәріптас ± 1 реттің таралуын көрсетеді, жасыл ± 2 , көк нөлдік ретті көрсетеді.

2.3-сурет. фс-лазерлі ОТБТ жазбасы үшін қолданылатын негізгі әдістердің схемасы: [93].

«Нүкте-нүкте» жазбасы: ОТБТ фемтосекундты лазерлі жазбасы үшін екінші әдіс, «нүкте-нүкте» (PbP) әдісі қолданылады, мұндағы ИҚ-ИҚ лазерінің жеке импульстары жоғары сандық апертуралы микроскоп объективін пайдалана отырып, талшық ядросына бағытталған (жоғары АТ) (2.3б-суретті қараңыз). Әрбір импульс сайын сыну көрсеткішінің локалды өзгерістері пайда болады, бұл сәулеленген дақта бастықтың пайда болуына әкеледі. Бұл локалданған бостар немесе нүктелер ТБТ жазықтығы түрінде оптикалық талшықтың ішіндегі таралуы режимінде байқалады. Сәуленің ауысу жолдары немесе жоғары шегі бар механикалық ауысу баспалдағын пайдаланатын оптикалық талшықтарында, тор

нүктелері кезекті қадаммен пайда болады және қайталанады. Martinez et al. 800 нм кезінде дақтың өлшемі 300 нм жетеді, осы арқылы бір модульды талшығында 1,075 мкм. қадамға ие екінші ретті Брэгг торын жазуға болады. Келесі құрылым термиялық берік және II типті УК-торлармен қатар II типті режимдегі фс-ИҚ-лазерде және фазалық маскада жазылған торлардың түрі болып табылады. [94].

Фазалық маска: ОТБТ ультра кулгн сәуле үшін құралған фазалық маскаға өндіріс көзқарасымен келетін болсақ, ол идеал болып табылады, себебі, кедергі келтіруші екі сәуле ұзындықтарының жолдары (± 1 ретті) автоматты түрде келісіледі. Бұл жоғарыда айтылған көлемді интерферометр әдісіне қарағанда теңдіктегі шекті елеулі төмендетеді. Кеңістіктік когеренттілігі төмен лазерлік көзді қарастырғанда, теңестргіштегі төмендетілген шек торды жасау үшін қолданылатын интерферентті бейнені құру аса маңызды болып табылады. Мысалы, эксимерлі лазердің дәстүрлі көзін қолдану кезінде оның ұзындық жолдары кеңістіктік когерентті жолмен ~ 100 мкм, эксимер көзімен келісілген болуы қажет. Жол ұзындығының сәйкесінше (30 мкм 100 фс импульс), лзаерлік көз фемтосекундтық импульс ұзақтығын қарастыру кезінде қажет.

Фемтосекундты лазерлі көзді, фазалық масканы пайдалана отырып ОТБТ шығарудың ең алғашқы кезі біздің топқа 2003 жылы белгілі болды. Кремний диоксидінен УК-лазермен жасалған арналған стандартты маскаға дизайн жағынан ұқсас болды, бірақ ол ± 1 реттегі 800 нм инфрақызыл лазерлік сәуленің максималды түсуі үшін өрнектелген болды. фс-ИҚ сәулесі маскаға қалыпты түсуі кезінде түрленетін фазалық масканың жолының ұзындығы кеңістіктікте иілетін фемтосекундтық импульстардың өлшемімен автоматты түрде сәйкес келеді. Алынған интерференцияның синусоидалық өрісі талшықта ОТБТ модельденген құрылымын жасады, ол сызықтық емес индуцирленген индекстің өзгеру процесінің салдарынан синусоидалық емес болды. Негізгі Брэгг резонансының шегінен жоғары ретті фильтр реакциясы синуюидалы емес модельденген торларды құрайды. Аса жоғары реттегі Брэгго резонансы теңдікпен сипатталған

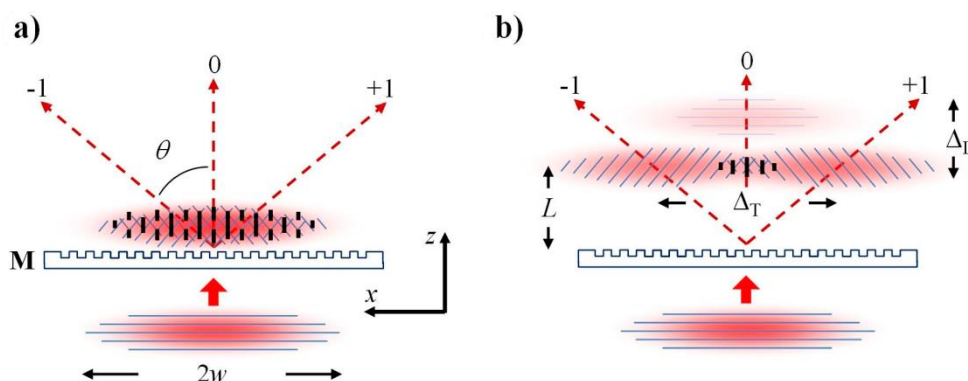
$$m\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_G \quad (2.3)$$

Мұндағы m – гармониялық реттің номері. Аса жоғары реттегі Брэгг резонансын қызықтыратын толқында құру өзіндік артықшылықтарға ие болуы мүмкін. Аса жоғары реттегі резонансты тудыратын фазалық маска, мысалы, 1550 нм телекоммуникационды байланыстарда қолданылатын С-өрістер, Λ_G тордың қадамына ие болады және ол тұтас сан болып табылады, Брэгговск резонансының негізгі шамасы Λ_G 535 нм қысқа шамадан көбірек. Λ_G Брэгг торының негізгі резонансының шамасы көптеген оптикалық микроскоптардың рұқсат етілген шегімен сәйкес келеді. Аса жоғары реттегі сәулелер кезегі оптикалық микроскоппен оңай көрінеді. Аса жоғары реттегі резонансты торларды пайдалунудағы кемшілік индекс модуляциясының тақтайшасында негізгі Фурье компоненті асып кетеді, бұл жоғары реттің құрылымына тәуелді болып табылады. Мысалы, телекоммуникационды диапазонда нақты бейнелі қабілетке ие жоғары ретті рельефті құру үшін, елеулі Брэгг резонансы ИҚ ортасында фундаментальды резонанс құрылымында пайа болады.

Масканың бойлық және көлденең бірізділігі

Фс импульсін немесе үздіксіз толқынындағы УК сәуленің фемтосекундты импульсімен салыстырғанда, олар фазалық маскаға әртүрлі әсер етеді. Түскен фемтосекундты импульстің шоғы маскада дифракцияланған кезде алынған ультратез дифракцияланған сәулелер масканың бетіне әртүрлі бұрыштармен таралады. Дифракцияланған импульстің бетте таралу арақашықтығы дифракция ретіне байланысты болып табылады, сондықтан әртүрлі байқалады, олар 2.4-суретте көрсетілгендей одан қалыпты маскаға проекцияланады. Дифракцияланған сәуленің фемтосекундты иілу импульсі L берілген қашықтыққа әртүрлі уақытта қалыпты маскаға жетеді. Мысалы, $\Lambda_m = 3.213$ мкм және импульс 125 фс деп қарастырайық, мұндағы Λ_m - ± 1 реттегі масканың биіктігі, түрленген маска 14.4° қалыпта θ дифракциялану бұрышы. Кеңістіктік бөлулер 0, ± 1 , ± 2 ретте 100 фс импульс үшін талшықты маскада $L > 1.3$ мм қашықтықта орындалады. L ең аз мәні (яғни, маска жанында) көптеген немесе барлық дифракцияланған реттердің жабылуына әкеледі. Бұл жабылулар периодты Λ_m . масканың биіктігіне тең күрделі интерференционды өріс шаблонының пайда болуына әкеледі. Бұл периодты бейне маскадан белгілі бір қашықтықта π - қозғалысқа ұшырайды, бұл $Z_T = 2a^2/\lambda$ арқылы анықталатын Тальбот ұзындығы ретінде белгілі, мұндағы λ жарықтанушы толқын ұзындығы, а-маска қадамы. Алушы ТБТ Тальбот ұзындығы мен масканың шегінде $\Lambda_G = \Lambda_m$ периодқа ие болады. L үлкен мәнінде тек бір ғана дифракцияланған реттік жұп араласады, мысалы, 1 ретті жұп бойлық дифракцияланған рет эффектiсiнiң әсерiнен. Бұл таза қосарлысәулелi интерференционды жолақтың пайда болуына әкеледі [95]. Талшықтағы индекстің өзгеруінің индуцирленген процесі қатты сызықтық емес, сондықтан, талшықтағы индекстің өздігінен өзгеруін тудыру үшін және толқын арнасындағы тордың шаблонына өзгертпеу үшін 0 ретті интенсивтілік тым аз болып табылады. Бойлық сипаттағы эффектiнi пайдалану фазалық маскадағы фемтосекундтық импульстардың талшықта көрінетін таза қосарлысәулелi интеференционды бейнені құру үшін 0 реттің басылуын қажет етпеуімен ерекшеленеді. Реттегі бойлық қозғалыстың эффектiсiн қодану тек қана 1 реттің интерференциясына әкеледі, бұл тор периодын $\Lambda_G = \Lambda_m/2$ өзгеруіне әкеледі.

Ескере кететіні, бойлық қозғалыс басқа реттен дифракцияланған реттік жұптарды бөлу кезінде, көлденең араласуы реттелген жұптардың жабылуының азаюына әкеледі. Мысалы, 1550 нм телекоммуникационды жолақта фундаментальды Брэгг резонансы бар торды құруға арналған фазалық маска, стандартты телекоммуникационды талшықта ~ 1.07 мкм қадамға ие болады, бұл 535 нм талшықта ТБТ қадамының пайда болуына әкеледі, егер кедергілер тек ± 1 ретте болса. 800 нм фемтосекундтық көзді қолданған кезде дифракция бұрышы $\theta \pm 1$, ал дифракцияланған фазалық масканың бұрышы елеулі үлкен болады ($\sim 49^\circ$), бұл дифракцияланған сәуленің жабылуын елеулі азайтуы мүмкін, әсіресе, егер маскаға түскен сәуленің диаметрі кіші болған жағдайда.



(a) (М) фазалық масканың аумағында пайда болған күрделі тальбосипаттас интерференционды бейне, бұл L қашықтық M аса үлкен емес жағдайда. (b) Көлденең (Δ_T) және бойлық (Δ_L) соқтығысулар L шамасының артуына сәйкес нақтылануы. Импульстің фазалық фронты көк сызықтармен бейнеленген.

2.4-сурет. Фазалық маскадан кейінгі 0 және 1 ретті дифракция ғана тудыратын ультра сәуле импульстердің интерференциясы.

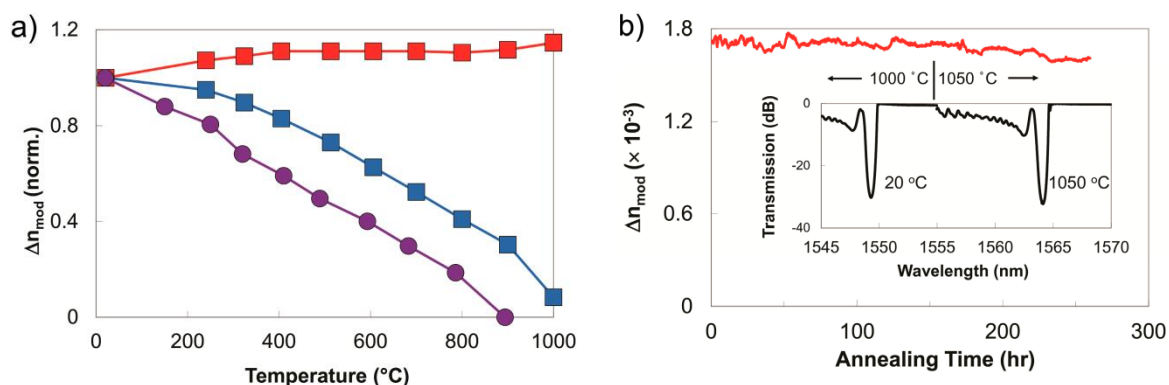
Бірнеше π -фазалы қозғалыстар, дискретизирленген торлар, антисимметриялық торлар және т.б күрделі құрылымды құруға арналған фазалық маска амалымен салыстырғанда Н-Н әдісі өз табиғаты бойынша универсал болып табылады, лазерлік импульстің қайталану жиілігін, қадамдық жылдамдығын және сәуленің бағытталу жағдайын өзгерте отырып чирптелген құрылымды да оңай өзгертуге болады. Микробалдырлардың пайда болуы нәтижесінде алынған құрылымдар міндетті түрде термиялық төзімді болып табылады. Н-Н әдісінің фазалық маска амалымен салыстырғандағы кемшілігі өндірістік көзқараспен алғанда бұл құрылымның өндіріле алуы болып табылады. Фазалық маска амалы күрделі құрылымды торлардың аналогын өндіруге мүмкіндік береді, бұл бірегей және термиялық тұрақты болып табылады, бірақ әрбір құрылым үшін арнайы фазалық маска қажет болып табылады. Фазалық маска амалын 1 типті режимде қолдана отырып торларды енгізу жеңіл, әсіресе, талшықтардан полимерлі қорғаныш жабындары жазу барысында. Мұндай өтпелі торлар жоғары механикалық деформацияны өлшеу кезінде маңызды болып табылады.[96]

2.2.7 Оптикалық талшықты Брэгг торларының жоғары температураны анықтауда қолданылу

Жоғары температуралық тұрақты ТБТ фемтосекундтық лазерды пайдаланып дайындалады немесе фазалық маска әдісі арқылы дайындалады, бұл электрстанцияларында, газ немесе аэро турбиналарда, жағу жүйелерінде және т.с.с. орын алатын қатаң жағдайларда қолдануға жарамды болатын торлардың қалыптасуына алып келеді. РbР әдісі ТБТ жазу үшін қолданылатын кезде II типті индекс өзгерісі үшін қарқындылық шегі бір импульстің көмегімен индекстің жеткілікті өзгерісін тудыру үшін міндетті түрде өтеді. Алынған микрожолақты

құрылым стандартты телекоммуникациялық талшықтарда 1000°C дейін термиялық тұрақты болып табылатын тор индексінің немесе «жазықтығының» ығысуына алып келеді.

Фазалық маска әдісін қолданған жағдайда II типті термиялық тұрақты торлар көп импульсті экспозиция пайдаланылып орындалады. Фурье түрлендірілуі 200 фс ішінде шектеулі фемтосекундты импульспен алмастырылып көптеген импульстер пайдаланылған кезде II типті индекстік термиялық тұрақты өзгеруімен байланысты нанографирлеудің орындалуы ықтимал. Импульстің уақыт бойынша алмасуынан туындайтын пик қарқындылығының төмендеуін талшықты фазалық маскаға жақын орналастырып, осылайша бір қатар ығысу эффектінің алдын ала отырып төмендетуге болады. Алынған бөгеттердің кешенді өрісі екі шоғырдың интерференциясымен байланысты синусоидалы интерференциялық бейнеге қарағанда жоғары пик қарқындылықтарына ие болады. Ge-легирленген телекоммуникациялық оптикалық талшықтарда, сондай-ақ УК емес жарыққа сезімтал ФКД (құрамында фтор болатын кремний диоксиді) талшықтарда жазылған фемтосекундтық лазер (ИК) ТБТ ұзақ уақыттық термиялық тұрақтылығы мен шағылу қабілеттері зерттелінген [64]. Δn үлкен болатын жоғары ретті резонанстар T_i регенерачирптелген күшейткішті пайдаланып I және II типті талшықтардың типтерінде, сондай-ақ оларға сәйкес режимдерде жазылған: II типті режим үшін 100 фс бастап 500 фс дейінгі шектелген импульстерден трансформацияланған энергиясы 1 мДж кәріптас. Стандартты УК-лазерлі ТБТ қосарланған аргон-ионды лазермен дайындалған. Температурасы 1000°C дейін жететін құрылғыларда изохронды күйдіру қисықтары 2.5a-суретте келтірілген, ол жерде құрылғы температурасы бір сағат ішінде әр температураға тұрақтандыруға мүмкіндік берді. Ультракүлгін және фс-лазердің әсері нәтижесінде туындайтын I типті екі тор да УК-лазермен индукцияланған ТБТ жағдайы үшін бақыланатын толық ұнтақталумен бірге күйдіріледі. II типті ТБТ үшін Δn ұлғаюы бақыланды, бұл тордың шағылдыру қабілетінің қалыпты деңгейде артуына сәйкес келді. Бұл ұлғаю фемтосекундты лазерлік жазу уақытында I және II типтің индекстерінің бір уақытта өзгеру нәтижесі болып табылуы мүмкін. Күрделі интерференциялық кескіннің пиктері II типті талшықта құрылым құру үшін жеткілікті қарқынды болады, алайда I типті индекстің өзгеруі де интерференциялық кескін пиктерінде II тип пайда болуы үшін қарқындылық өте төмен болатын жерлерде генерирленеді. Торды күйдіру процесінің барысында II типті индекстің тұрақты өзгерісі тұрақты болып қалады, ал I типті индекстің жойылатын өзгерісі Δn одан да жоғары қарқындылығына алып келеді.



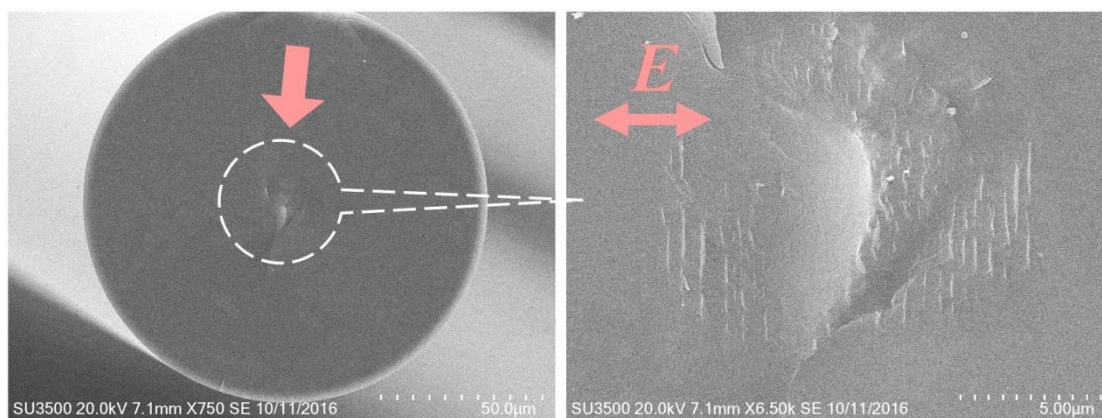
(а) әр температурада 1 сағат уақыт бойы ұсталған II-IR типті (қызыл), I-IR типті (көк) және I-UV типті (күлгін) торларды қысқа уақытта күйдіру; (Қосымша) (б) уақытқа тәуелді термиялық тұрақты тор (қызыл түсті) үшін оның индекстік модуляциясы (Δn_{mod}) ретінде өрнектелген тордың шағылдыру қабілеті.

2.5-сурет. Температураға тәуелді тор спектрі. [97]

II типті процесс талшықты өзекше бойынша индекстің өзгеруінде градиент тудырады, сондықтан елеулі өзгерістер талшықтардың ядро/қабықша интерфейсінде жүреді. Бұл градиент Брэгг резонансымен салыстырғанда қысқа толқын ұзындықтарында бақыланатын өткізу спектрінде призмалық және қабықшалы мода режимінде байланыс жоғалуын генерирлейді (2.5b-сурет). II типтің фс- ИҚ торларымен байланысты қабықша режимінің жоғалуы I типтің IR торларының жоғалуынан ерекшеленеді, бұл жерде соңғы жағдайда индекстің өзгеруі Ge-легирленген ядро үшін, сондай-ақ телекоммуникациялық талшықтардың таза кремний қабықшалары үшін біркелкі әсер етуі мүмкін, бұл қабықшалардың жолақтан тыс жоғалуына ие болмайтын өткізу спектрлеріне алып келеді. II типтің жоғары температуралық тұрақты сипаттамалары 2.5b-суретте көрсетілген, ол жерде температура 1000 $^{\circ}\text{C}$ кезінде 150 сағат бойы ұсталған. Барлық сынау барысында тордың шағылдыру қабелітінің айтарлықтай төмендеуі бақыланған жоқ, бұл кезде тор $\Delta n = 1,7 \times 10^{-3}$ деңгейді ұстап тұрды. Одан кейін ТБТ температурасын жоғарылатып, 1050 $^{\circ}\text{C}$ деңгейінде 100 сағат бойы ұстаған, бұл кезде Δn шамасы $1,7 \times 10^{-3}$ деңгейінен $1,6 \times 10^{-3}$ дейін төмендеген. Алғашында бөлме температурасында алынған және 100 сағаттан кейін температуралары 1050 $^{\circ}\text{C}$ жеткен спектрлер 5b суреттің қосымшасында көрсетілген. Эксперимент соңында λ_B 0,2 нм бастап одан да ұзын толқын ұзындықтарындағы дрейф анықталған. Жоғары температурада талшықты алдын ала күйдіру қалдық кернеуді әлсіретеді, ол бірнеше сағат уақыт бойы II типті FB-IR ТБТ 1200 $^{\circ}\text{C}$ дейінгі жоғары температуралық тұрақтылығына алып келеді [98].

PbP бір импульсті тормен байланысты маңызды мәселе индекстің индукцияланған өзгерісі микрожолақтардың пайда болу нәтижесі болып табылады. Жақын уақытта көп импульсті сәулелену режимінде фазалық

маскамен жазылған II типті ТБТ қараңғы өрістің оптикалық микроскопиясын пайдаланып өндеген кезде көрінетін жарықтың айтарлықтай мөлшерін шашырататын наноөлшемді құрылымдардан тұратындығы көрсетілген. Стандартты телекоммуникациялық талшықта, Ge-легирленген талшықта жазылған II типті наномасштабталған ТБТ морфологиясын анықтау үшін II типті ТБТ талшық осіне перпендикуляр ыдыратады және 200 Å алтын немесе палладиймен қапталады, одан кейін сканирлеуші электронды микроскоп көмегімен зерттелінеді. 2.6-суретте талшықтың өзекшесінде бақыланатын наноөлшемді құрылымның сканирленген электронды микрофотосуреті көрсетілген. Микрожолақтар сияқты наноөлшемді құрылымдар шашырауда жоғары жоғалуға алып келеді, бұл жалпы датчиктердің таралған матрицасын жасау үшін торлардың бір-бірімен байланысуын қиындатады. Зерттеулерді жүргізу барысында II типті (энергия мен импульс ұзақтығы) титрлік жазба үшін фазалық маска әдісін және экспозиция параметрлерін пайдаланған кезде төмен жиілікте импульстердің қайталанатындығы (яғни 1-5 Гц) байқалды, бұл тор эволюциясын айтарлықтай жеңілдетеді, II типті тордың қалыптасуы импульстері жазыла отырып, I типті импульстің чирптелген құрылымының алғашқы түзілуінен және одан кейін жойылуынан бұрын орындалады [68]. Егер жазу процесі I рельеф пигі қаныққан кезде аяқталса, жойылу да келесі импульстерден басталады, сонда температуралық өндеуден кейінгі өндеу қабықшалары біріктірілік қалыптасқан II типті қарапайым тордың қалыптасуына алып келеді, бірақ жоғалулар өте төмен болады. Осындай көптеген термиялық тұрақты торларды датчиктердің таралған массивтеріне біріктіруге болады.



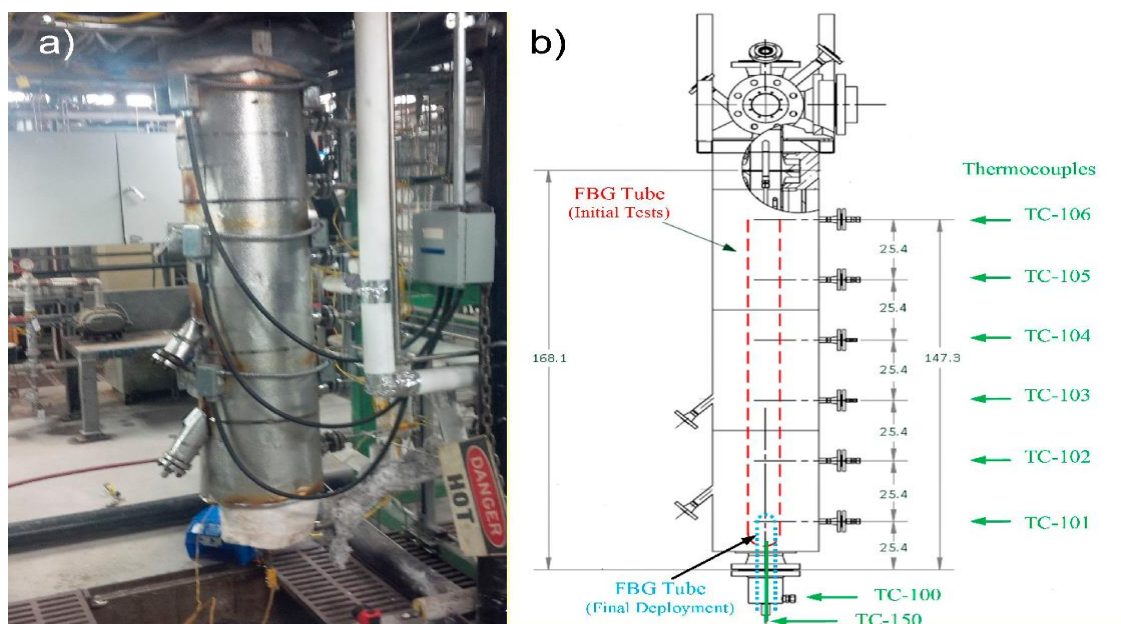
Сол жақтағы суретте II-ИҚ типті тормен оптикалық талшықтың көлденең қимасы көрсетілген. Оң жақтағы сурет сол жақтағы суреттегі талшықтың модификацияланған бөлігінің ұлғайтылған түрі болып табылады. Нанографтар 150 фс импульстердің алмасуы, $NA = 0,2$ линза және биіктігі 3,21 мкм маска пайдаланылып алынған. Импульс энергиясы 900 мкДж құраған[99].

2.6-сурет. SEM пайдаланылып көрсетілген бір бағытты талшықты II типті ТБТ нанографиртік табиғаты.

2.2.8 Жанар май сұйылтылған қабатты сұйықтығы бар жану камерасының

оптикалық талшық негізінде қадағалау технологиясы

Қазіргі уақытта парникті газдардың шығарылуын төмендету мақсатында жалған сұйылтылған қабатта оттекті-отын қабаттын жағу, химиялық айналыммен жағу және газ ағынын газдандыру сияқты электрстанциялардың алдыңғы қатарлы технологиялары әзірленуде. Алайда осы технологиялардың жұмысы мен тиімділігі жоғары температура, қысым және коррозия жағдайларында жарамсыз болатын қарапайым датчиктер мен басқару элементтерімен шектеледі. Осы сияқты газ турбиналы қозғалтқыштарды әзірлеу үшін жағу мен жану қалдығы газын дәл есептеу маңызды болып табылады, себебі жоғары тиімділік пен ауаға шығарылатын қалдықтарға қойылатын қатал талаптар орнатылған шекте жұмыс істеуге алып келеді. II типті кремний диоксиді негізіндегі ТБТ фемтосекундты лазерлік матрицалар фазалық маска әдісін пайдаланып дайындалған және электроэнергия мен тасымалдау үшін пайдаланылатын жану жүйелері қатарына таралған[100,101].



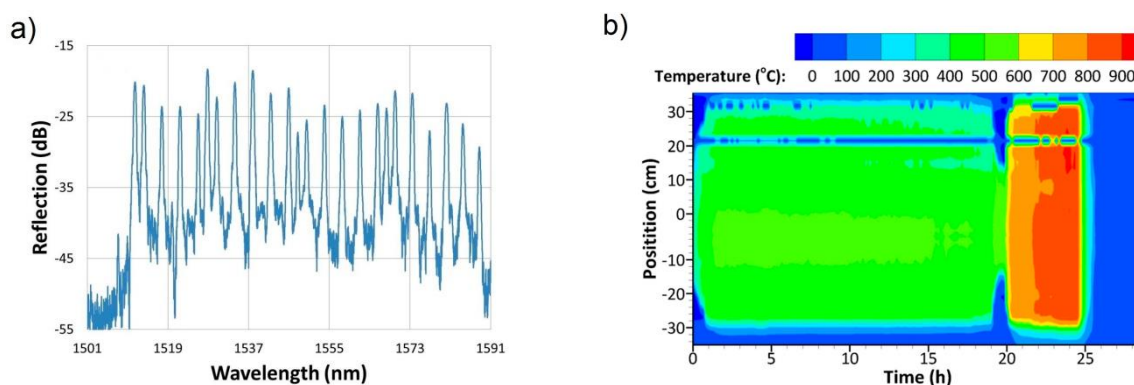
ТБТ мен термоқосақтың ішкі орналасқан жерлерінің (а) фотосы және (b) суретте бір талшықты ТБТ матрицасының шағылу спектрі көрсетілген.[102]

2.7-сурет. Жалған сұйылтылған қабатты жану камерасының төменгі бөлігі (оқшаулануымен бірге).

Камерада таралуының мысалы ретінде ТБТ стандартты талшықта II типті екінші қатардағы 14 ТБТ тұратын жалған сұйылтылған қабаты бар датчиктер матрицасын 2.7b-суретте қызыл үзік сызықпен көрсетілгендей жану камерасының ортасында орналасқан сыртқы диаметрі $\frac{1}{4}$ дюйм болатын 310 таттанбайтын болаттан жасалған түтікше арқылы берген. Бір түтікте PS_C талшығында жазылған жалғыз тор орнатылған. Сонымен қатар осы сияқты 7b суреттегі көк үзік сызықта орналасқан түтікте жалпы саны 132 болатын II типті ТБТ фс-ИҚ-лазерлі элементтен тұратын жеті массив жайылған. Сонымен қатар термоқосақтар тек реактордың ішкі қабырғасының ішінде жайылатын сегіз порт

көрсетілген. Жалпы, осы сынаулар үшін арналған торлар камераның қалыпты жану жұмыс уақыты кезінде күйдірілген. Осы сынаулар барысында шағылу спектрлерін, Брэг резонанстары мен датчик температурасын бақылау спектрлерін тіркеу үшін 4-каналды ТБТ-сұранысты нақты уақыт режимінде SM125 график түрінде көрсетілді (Micron Optics, Atlanta, GA, USA).[102]

2.7-суретте жану камерасының бір жылу айналымы барысындағы орналасу мен уақытқа тәуелді жалған сұйылтылған қабаты бар камера температурасының сызбасы келтірілген. 1025 ° C дейін бірнеше термиялық айналым бес ай уақыт бойы орындалған. Нүктелік термоқосақ мәліметтерімен жақсы сәйкестік бақыланады, бірақ жылу кескіндеріндегі қосымша нақты мәліметтер ТБТ датчиктердің матрицаларының таралуын пайдалану есебінен алынады. Температураның таралуын термоқосақтың өлшеу тәсілімен анықтаумен салыстырғанда осы оптогалшықты жаймалау датчик кабелін басқару, орнату оңайлығы, тиімділік пен жылулық әсер ету жылдамдығы бойынша жоғары орынға шықты.



(а) Жану камерасының бір жылу айналымынан кейін бір талшықты тордың бөлме температурасындағы шағылу спектрлері b) 10 мин аралығында орналастыруға рұқсат етілетін бір жылулық айналым бөлігіндегі орналасқан орны мен уақытқа тәуелді жалған сұйылтылған қабатты жану камерасының температурасы. Датчиктердің арасындағы арақашықтық 2 см болатын 3 талшықты массивтердің мәліметтері көрсетілген.

2.8-сурет. жану камерасын қадағалау нәтижесі[102].

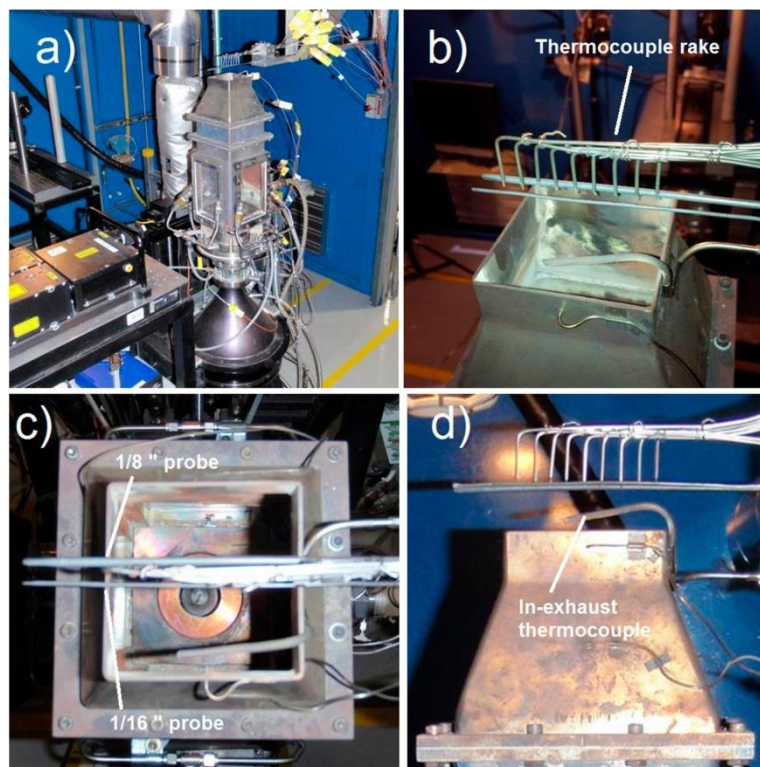
2.2.9 Талшықты оптикалық датчик негізіндегі газ турбиналарының симуляторының мониторингі

ТБТ датчиктерінің термотұрақты матрицаларын пайдаланып газ турбиналарына мониторинг жүргізу турбинадағы жанғыш газдың жұмыс температураларын дәл өлшеуге мүмкіндік береді, бұл қауіпсіз, сенімді, тиімді және үнемді жұмыс үшін қажетті болып табылатын басқарудың критикалық параметрлері болады. Турбина қалақшаларының қатты қызып кетуі және айтарлықтай зақымдалуы біркелкі жанбаудан туындауы мүмкін; алайда газ турбинасында қалақшалардың температурасын дәл өлшеу өте қиын процесс. Дегенменде құбыр желісіндегі турбинадағы немесе жану камерасындағы газ

температурасын өлшеу жылулық модельдер үшін өнімділік көрсеткіштері, шекаралық шарттардың потенциалды кіріс параметрлері сияқты маңызды ақпаратты қамтамасыз ете алады. Осы мақсатта газ турбиалы жану камерасының имитаторы оттекті огтынды жалған сұйылтылған қабаты бар жану камерасы үшін пайдаланылған сияқты ТБТ чирптелген торларды пайдаланып бақыланады. Чирптелген торлар 316 таттанбайтын болаттан жасалған стандартты құбырлардан дайындалған екі температура датчигіне орналастырылған. Бір зондтың диаметрі 1/16 дюйм, ал екіншісінікі – 1/8 дюйм болды. Термотұрақты құбыр бір-біріне қатысты 2,5 мм арақашықтықта шахмат тәртібімен орналасқан әр құбырдағы екі талшықты массивтерді (барлығы 42 ТБТs) бекіту үшін пайдаланылған. Әр зондты орналастырғаннан кейін олардың әрқайсысы 1100 ° С дейін бірнеше айналымды пайдаланып құбырлы пеште күйдірілген.

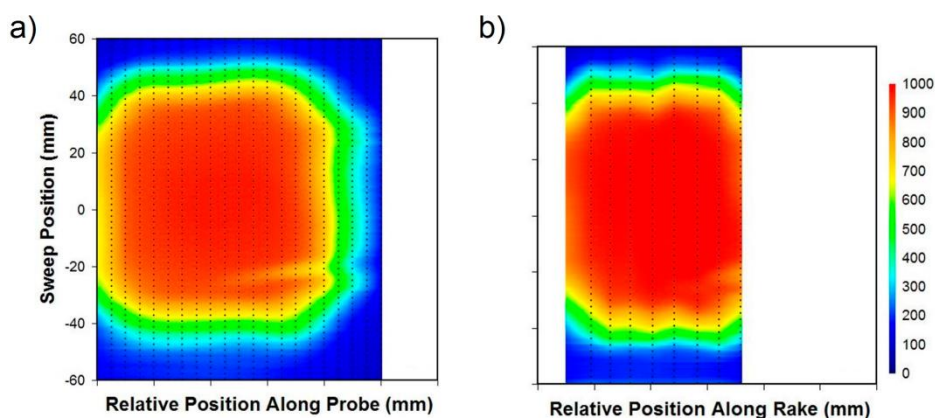
Алғашында жанып шыққан газдардың температуралары өлшенді. Эксперименттің осы бөлігі үшін қолданылған қондырғының сұлбасы 9 суретте келтірілген, ол жерде газ турбиасының жану камерасының имитаторы, сондай-ақ ТБТ датчиктер мен ашық термоқосақтардың бөліктері көрсетілген. Шығып тұрған шүмектің сыртқы шетінің ауданы 83 мм, қалыңдығы 2 мм. ТБТ зонд датчиктері газ шығарылатын құбыр арқылы осьтік бағытта орналасқан, бүйір жағынан олар 8,8 мм бөлінген. Олардың арасына тоғыз ашық термоқосақтар орталарына орналастырылған және 9,5 мм бөлініп осьтік бағытта таралған. Эксперимент барысында жану камерасының имитаторы датчик зондының орны шығып тұрған шүмек бойынша -60 мм бастап +60 мм дейін өзгертіндей датчиктерге қатысты ауыстырылған. Осы сынаулар үшін 1кГц жиілікте Брэгг резонанстарын бақылау үшін 16-каналды TBT Micron Optics SI255 Hyperion пайдаланылған.

2.10-суретте 1/16 ТБТ датчик зондынан алынған мәліметтер мен термоқосақ датчигінен тартатын апертура бойынша 0,125 мм/с тұрақты жылдамдықпен жинақталған мәліметтер салыстырылған. Ашық термоқосақ (суретте 9 белгіленген) 2.10a-суретте төмен жақта оң жақ бұрышта көрсетілген. Осы нәтижелер термоқосақты пайдаланып алынған нәтижелермен жақсы сәйкес келеді (10b сурет). ТБТ тығыздығы жоғары болатындықтан, ТБТ контурлары тегіс болатындығы белгілі. Температура 5-10% төмендетілген кейбір ТБТ жағдайларында бұл калибрлеу мен қаптама мәселелерімен байланысты болуы мүмкін. Температураның толқын ұзындықтарының калибрлеу қисықтары қапталмаған ТБТ үшін орнатылғандығын [100] ескере отырып, қаптаманың жылуөткізгіштігінен жылу беру эффектілері қосылмаған. Сондықтан осы айырмашылықтар қайтадан калибрлеу және жылулық майлауды төмендету үшін қаптама конструкциясын жақсарту арқылы түзетілген.



А) Жанған газ шығатын аумағы бұрыштық жабылған (b) газ турбины жану камерасының имитаторының суреті; (c) жанған газ шығатын аумақтың үстінен қарағандағы түрі және (d) термоқосақтар орнатылған газ шығатын аумақтың жанынан қарағандағы түрі және әр суретте белгіленген ТБТ датчиктері

2.9-сурет. Талшықты датчиктің зонттауы.[100]

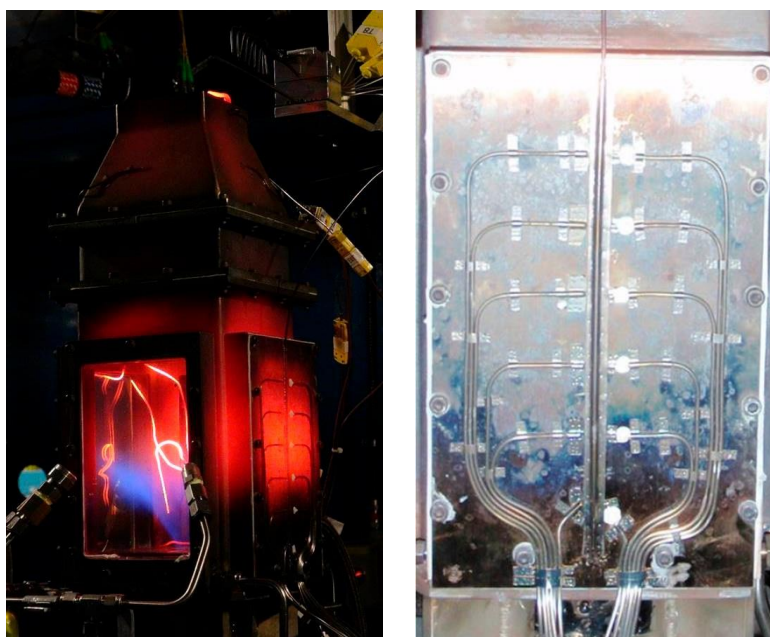


(a) ТБТ датчик массивтерін және (b) термоқосақ тармақтарын пайдаланып газ турбины имитаторының жанған газ шығатын жүйесінің температурасын өлшеу.

2.10-сурет. Датчиктердің орналасқан орындары вертикаль үзілісті сызықтармен белгіленген.[100]

Жанған газдардың температураларын өлшегеннен кейін жану камерасы имитаторындағы балқытылған кварцтың терезлерінің біреуі 10-суретте

көрсетілген бүйірлік қабырғаны өлшеу панелімен алмастырылған. Панель алты жабық термоқосақтармен (сол жақтан) және алты ашық (оң жақтан) термоқосақтармен жабдықталған, олар бүйір жағынан 3/8 дюймге бөлініп, вертикаль түрде 1 дюйм арақашықтықта орналастырылған. Ұштары ашық термоқосақтар керамика байланыстырушы зат пайдаланылып жалғанған, ал қалған зондтар мен сымдар панельге престелген нихром жолақтармен ұсталып тұрған. Жанған газдың температурасын өлшеу үшін пайдаланылатын 1/16 ТБТ датчик термоқосақты екі тармақтарының арасына орнатылады. Жану камерасының имитаторы температураның вертикаль градиентін басқару үшін суытатын ауаның әр түрлі мөлшерімен температура диапазонында айналымды түрде орны ауыстырылып отырды. Бүйірлі қабырғаларды өлшеу шамамен бір сағат уақытта жүргізілді. 2.11-суретте бүйірлік қабырғаның температура градиентінің таралған температуралық зондтау (DTS) тәуелділігінің графигі көрсетілген. ТБТ датчик матрицалары мен ұштары ашық термоқосақтармен алынған нәтижелер бір-бірімен өзара ұқсас. 2.11-суретте сондай-ақ мұқият талдау үшін DTS графиктен алынған кейбір қисық үлгілері келтірілген.



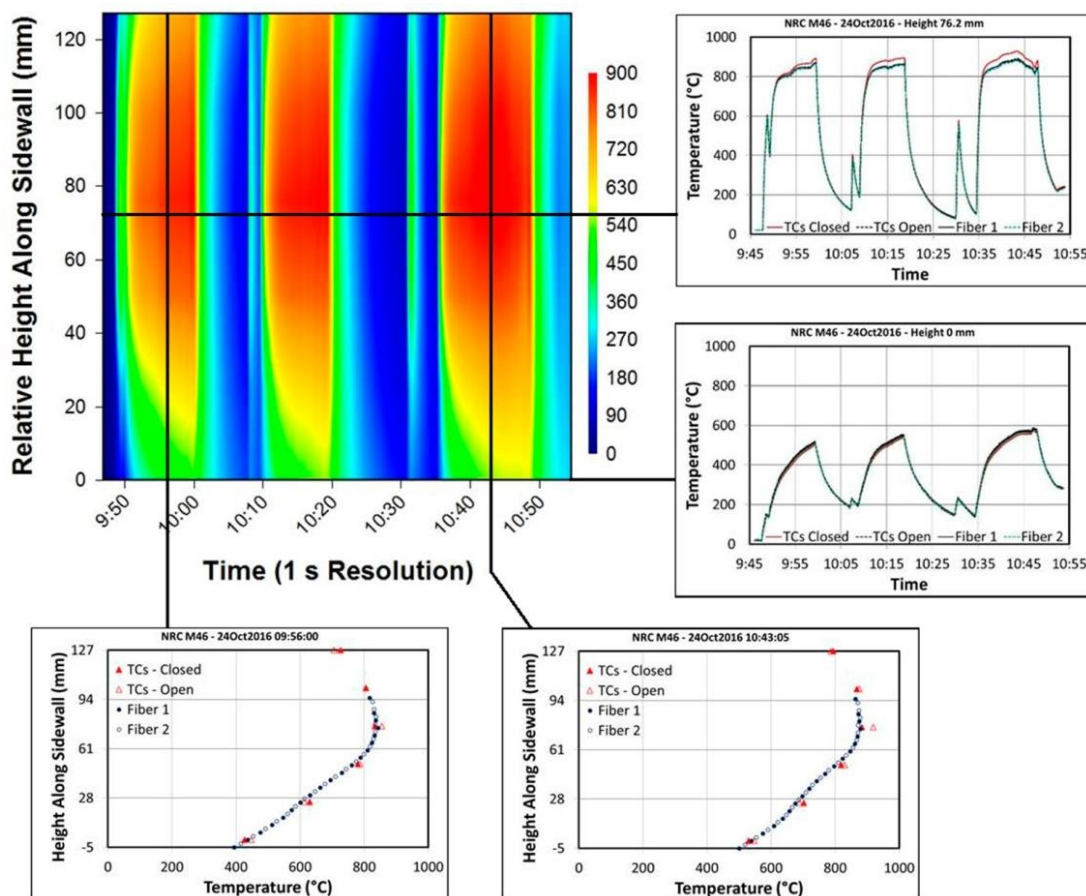
(а) Бүйір қабырғаны өлшеу панелімен, термоқосақпен және 1/16 ТБТ датчиктің құбырлы зондымен жұмыс істейтін газ турбинының жанғыш камерасының имитаторы; (b) бөлме температурасы кезінде панельдің жанынан ашылған түрі. [100]

2.11-сурет. ТБТ датчик матрицалары мен ұштары ашық термоқосақтармен алынған нәтижелер

2.2.10 Оптикалық талшықты таяқшадағы 2 талшықты Брэгг торларының қолданылуы

Кремний диоксиді негізінде жасалған кез келген жоғары температуралы оптоалшықты датчик үшін маңызды түсінік сенсорлы қаптама болып табылады.

Шамамен 1000°C температура кезінде ауада болатын кремнийдің қос тотығының стандартты қапталған бір модальды талшықтары олардың механикалық бүтіндігіне зақым келтіреді. Талшықтар 1000°C температурада жүздеген сағаттар бойы зақымдалмай тұрады, алайда өте жоғары температура кезінде тотықтырғыш ортаға орналастырған кезде механикалық бұзылады және морт сынғыштыққа ие болады. Осындай әсерден кейін талшықта пайда болатын кез келген зақымдалу оның бұзылуына алып келеді. Егер талшық ауады өте асқын жоғары температураға дейін қыздырылса, оның қаптама конструкциясына да осы морт сынғыштықтан қиындықтар туындайды. Жоғары температура кезінде оттегінің әсерінен талшықты қорғау жоғары температураға төзімді болып табылатын өте тиімді қаптаманы қолданған кезде ғана мүмкін болады. Қаптаманы қолдану арқылы талшықты қорғау тәсілі талшықтың ұзақ мерзімге жарамдылығын арттыру үшін таптырмасы тәсіл болады. Жоғары температуралар үшін шамамен ~700°C максималды температураға есептелген алтын жабынды металл қаптамалар қарастырылған. Алайда олар 1000°C шамадағы температураларға жарамсыз болады [103]. Таттанбайтын болаттан немесе қыштан күйдіріліп жасалған құбыр қаптама ретінде пайдаланылады, алайда талшықты датчикті құрамды құрылымдарға біріктіретін немесе шектелген кеңістікке орналастыратын жағдайда олар да тиімсіз болады.

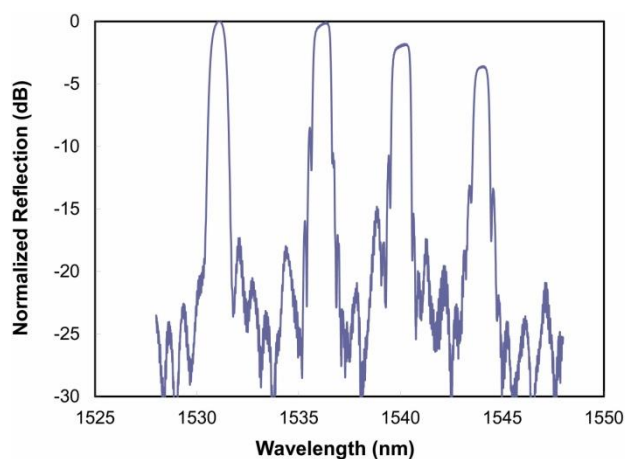


2.12-сурет. Уақыт пен кеңістіктің әр түрлі нүктелерінде бүйір қабырғалардың температураларын өлшеудің нәтижелерін салыстыруға арналған графиктер.[103]

II типті чирптелген тор Фс-ИК лазер фазалық маска жиынтығы

пайдаланылып талшықты таяқ ядросында жасалған. Талшық каналы диаметрі 8 мкм бір модальды оптоалшық болған, алайда қабықшасының диаметрі 400 мкм болған. Талшықты таяғы бар Брэгг торының механикалық беріктілігі 1020°C температура кезінде 150 сағат бойы ауада құбырлы пеште ұзақ күйдіргеннен кейін бағаланған[104].

150 сағ бойы бөлме температурасында күйдіргеннен кейін датчик матрицаларының спектрлері 2-13-суретте көрсетілген. Ұзақ уақыт күйдіргеннен кейін өлшемі 400 мкм болатын талшықты талшық өңдеу үшін жеткілікті механикалық беріктілікті қамтамасыз етті. Соның салдарынан ТБТ датчиктердің матрицасы максимум ~ 39 МПа кернеумен сынаудан өткізілген. Алғашқы талшық өндірушілермен 690 МПа кернеумен тексерілген. Талшықты таяқтың сыртқы диаметрі үлкен болатындықтан ол диаметрі 125 мкм болатын стандартты SMF-талшыққа қарағанда қатты болып табылады, дегенмен ол 10 см аз майысу радиусын қамтамасыз ете алады, бұл оны көптеген жерлерде зондтау мақсатында қолдануға мүмкіндік береді.



2.13-сурет. 400 мкм бір модальды талшықта жазылған II типті 4-элементті ТБТ датчиктердің массивінің шағылу спектрлері.[105]

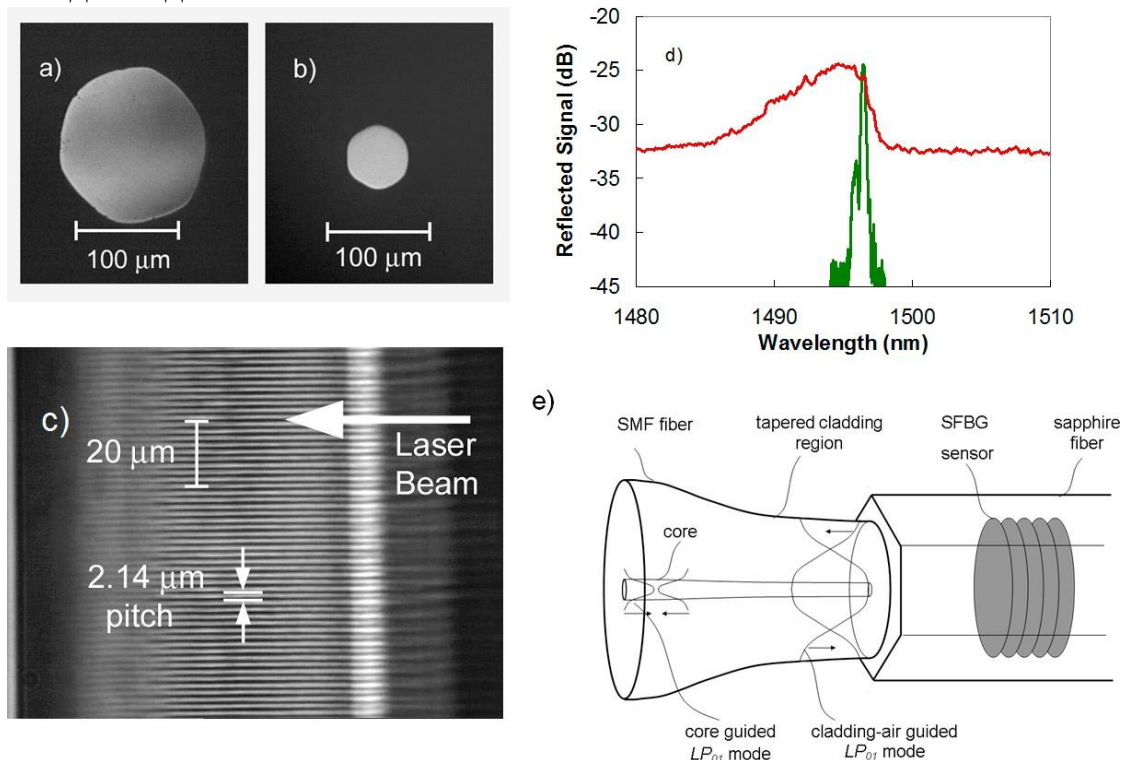
2.2.11 Микроқұрылымданған талшықтардағы II типті ТБТ

Стандартты силикаты талшықтарда 1100°C мен 1200°C арасындағы температурада талшықты Брэгг торлары ұзақ уақыт күйдіру стандартты оптоалшықтардың өзекшесінде легирлеуші қоспаның тасымалдауын тудыруы мүмкін, бұл талшықтың үнемі өзгеруіне, осының салдары ретінде Брэгг резонансының үзіліссіз ығысуына алып келеді. Фотонды-кристалл талшықтар [76] немесе микроқұрылымданған талшықтар сияқты бір қабатты кремний диоксидінің оптоалшықты фемтосекундты лазерлі индукцияланған ТБТ дайындау кезінде ядроның диффузиясы мәселесі туындамайды. Нақты іс жүзінде PbP-фемтосекундты лазер торлар негізгі талшықтың бетіне бекітіліп аблятивті процесс арқылы алынады. 11 миллиметрлік аспалы өзекше 1300°C дейін салыстырмалы түрде тұрақты болатын қорытынды Брэгг тор реакциясының үлкен өткізу жолағын жасай отырып телекоммуникациялық C-диапазонда бірнеше режимді қамтамасыз етеді.[106]

2.2.12 Сапфирлы талшық Брэгг торлары [107]

Кремний диоксиді негізіндегі оптогалшықтар $>1300^{\circ}\text{C}$ болатын температуралар үшін датчик ретінде қолданылмайды. Шынылану температурасы шамамен $\sim 2030^{\circ}\text{C}$ болатын көп кристаллды сапфир талшықтар жоғары температуралы зондтау үшін пайдаланылатын өте тиімді оптогалшық болып табылады. Алайда С-осьті сапфир кристалының жалғыз өзекшесі түрінде жасалған сапфир талшықтарда қабықша қабаты болмайды, сол себепті олар көп модалы және майыстырушы жоғалу мен экономикалық жағынан тиімді болатын талшық диаметрлері үшін режимдерге түрлендіруге сезімтал болады. Осындай талшықтардың үлгілері 2.14a және 2.14b-суреттерде көрсетілген.

Қазіргі уақытта жасалынатын сапфир талшықты датчиктер негізінен температураға байланысты өзгертін кең жолақты интерферометрлік сигнал тудыратын талшықтың ішінде құрылатын Фабри-Перо құрылымы болып табылады. Бұл құрылғыларды нүктелік датчик ретінде пайдалануға болады, бірақ таралған зондтау үшін, яғни талшықтың бойында әр түрлі жерлерде өлшеу үшін тиімді пайдалана алмаймыз.



(a) 125 мкм (b) диаметрлері 60 мкм сапфирталшықтардың көлденең қималары; диаметрi 150 мкм талшыққа енгізілген чирптелген құрылым (c); көп модалы шағылудағы сәйкес реакция қызыл жолақпен көрсетілген (d); (e) көрсетілген бір модалы өрісті кеңейткішті пайдаланған кезде (d) жасыл жолақпен көрсетілген бір модалы шағылу спектрі алынады
2.14-сурет. Сапфирты талшықты Брэгг торларының шағылу спектрі[108].

Фазалық маска тәсілі сапфир талшықта жоғары ретті ТБТ үшін тиімді пайдаланылды. Кремний диоксиді негізіндегі талшықтардың өзекшелерінде көрсетілген сияқты РbР әдісін пайдаланып, тор жазықтығын жазуға болады, алайда ол үшін өте көп жұмыс атқару қажет, әсіресе тор жазықтығының бір модалы стандартты талшықтың 8-миллиметрлік ядросын ғана емес, сондай-ақ

көп модалы (әдетте диаметрі 150 мкм) сапфир талшықтың қимасымен ғана емес барлық көлденең қималарды бүлдіруге тура келетіндігін ескерсек, бұл өте ауқымды жұмыс болады.

Көлемді Брэгг торлары фазалық маска тәсілін сапфир талшықтың көптеген көлденең қималарына оңай қолдануға болады. Жақын арада диаметрлері 125 мкм болатын сапфир талшықтарда екінші ретті (1,776 мкм қадам) ТБТ жазба үшін PbP әдісі өте тиімді түрде қолданылып, көрсетілген. Тордың шағылдыру қабілеті фазалық маска тәсілін пайдаланған кезде қол жеткізген шамадан біршама төмен болғандығымен, PbP әдісі ТБТ таралған массивін оңай дайындау үшін біршама артықшылықтарға ие[108].

Сапфирты талшықты Брэгг торларының шағылу спектрі бір модалы талшықта ТБТ-мен бірдей болатын сияқты ұзындықтан бірнеше есе артық болатын кең спектрлік көп модалы өткізу жолағы болып табылады. Кең спектрлік өткізу жолағы бір модалы талшық сияқты температура мен деформацияға сезімтал болмайды. Көп модалы тармақтарды талдаған кезде бесінші ретті SFB датчиктен ақ жарық көзінен жарық алынған кездегі көп модалы шағылу спектрі 14d-суретте қызыл жолақпен көрсетілген. Өткізу жолағының спектрлік шағылуы тормен көрсетілетін әр түрлі мыңдаған режимдердің суперпозициясы болып табылады. Спектрлік орташаланған және сандық әдістер температураға тәуелді ЖТБТ өлшеу сезімталдылығын жақсарту үшін пайдаланылған. Алайда стандартты талшықта ТБТ датчигінің сезімталдылығы сияқты тар жолақты бір режимді жауапты жасау есебінен температура өзгерісі мен деформацияға сезімталдылығы айтарлықтай жақсарады. Осындай бір режимді реакция ТБТ қарапайым сұраныстарымен өнделеді. Көп режимді СТБТ осындай бір режимді жауап алу үшін құрылғыны талшықпен ұсталатын негізгі таралу режимін қоздыру арқылы зерттеу керек. Диаметрі сапфир талшықтың диаметріне шамалас болатын гаусс модасына диаметрі 10 мкм жалғыз моданы қосып кеңейту үшін адиабаталық талшық конусын пайдалану есебінен осыған қол жеткізуге болады (2.14e-суретте көрсетілгендей). Одан кейін сапфир талшықтың іргелі басқарылатын режимі бір модалы шағылу спектрін қалыптастыра отырып, қозады (2.14d-суреттегі жасыл жолақ). Бір модалы реакция кезінде сыну көрсеткішімен сапфир талшығын дәл тиімді өлшеуге болады. жұмыста диаметрі 1,747 мкм болатын фазалық маска 1525,496 нм кезінде сапфир талшықта екінші ретті Брэгг резонансын қалыптастырады. Алынатын n_{eff} сапфир талшық үшін 1,746 тең. 1850 °C дейінгі жоғары температура кезінде СТБТ беріктілігінің төмендеуі бақыланбайды. Фс-VIS (400 нм) импульстері мен Talbot интерферометрін пайдалана отырып, үш элементті СТБТ-матрица көрсетілген, ол жерде ТБТ негізгі Брэгг резонансына жазылған. Алайда бұл осы жұмыста көрсетілмегендігімен, осындай іргелі Брэгг резонанс торлары жоғарыда айтылғанға қарағанда жоғары шағылдыру қабілетіне ие болуы керек. SFBG датчигінің талшық ұшында Фабри-Перо эталондарына негізделетін басқа сапфир талшықты датчиктеріне қарағанда бірқатар артықшылықтары бар. Фабри-Пероның сапфир датчиктеріне қарағанда үзілісті резонансты толқын ұзындығымен SFBG-датчиктерді 2000°C температураға

дейін датчиктердің таралған оптикалық массивтері ретінде пайдалануға болады.

2.3 Жоғары иондаушы радиациялық орта

Ядролық салаларда электронды датчиктер мен түрлендіргіштерді пайдалана алмаймыз, себебі оларды ауыр радиоактивті орталарға орналастыруға болмайды, әсіресе қарқынды иондаушы сәулелену жоғары температурлармен, химиялық ластанумен және электрмагниттік бөгеттердің жоғары деңгейімен бірге болған кезде ол мүлде мүмкін болмайды. Оның материалдары нейтронды атқылау нәтижесінде бұзушы эффектілерден зақымдалуы мүмкін. Мысалы, қарқынды сәулелену әсер еткен кезде термоқосақты құрайтын екі металл әр түрлі элементтерге түрленіп кетеді, бұл термоқосақтың істен шығып, жарамсыз болуына алып келеді.

Легирленген Ge орнатылған ТБТ датчиктерінің УК лазерлермен оптогалшықтары ұзақ уақыт бойы төмен ағынды ядролық орталарға қолдануға жарамды болады. Алайда жоғары ағынды орталарда ұзақ уақыттан кейін радиациялық-индукцияланған бәсеңдеу қарқындылығы артады. Ge легирленген I типті талшықтарда ТБТ УК-жазбасы RIA байланысты ақауларды қалыптастыру механизмдеріне негізделген. Егер олардың біреуі сәулеленуден қатаятын радиациялық-индукцияға төзімді қатты кремнезем немесе кремний диоксиді сияқты заттардан талшық жасаса, мұндай талшық УК сәулелену процесі арқылы Брэгг торының түзілуіне де төзімді болады. Сондықтан УК лазермен ТБТ жазудың дәстүрлі әдістері тиімсіз. I типті, сондай-ақ II типті ТБТ фс-ИҚ фазалық маска тәсілдерін пайдалана отырып, F-легирленген радиациялық төзімді талшық оңай жазылады. Осы эксперименттерде 100 кГр γ -сәулелену мөлшерінен кейін тор беріктілігі мен резонансты толқын ұзындықтарының аз шамада өзгеруі бақыланды. Басқа эксперименттерде 1 МГц дейінгі жоғары деңгейдегі мөлшерлер Брэгг толқын ұзындығының -60 мкм ығысуына алып келді. Сондай-ақ PSC радиациялық төзімді талшыққа жазылған фс-ИҚ ТБТ бұрынғыдай $2,83 \times 10^{19} \text{ n}_{\text{fast}}/\text{cm}^2$ нейтронды сәулеленудің флюенстерінің әсерінен кейін де температура датчигі ретінде қолдануға болатындығы көрсетілді[109].

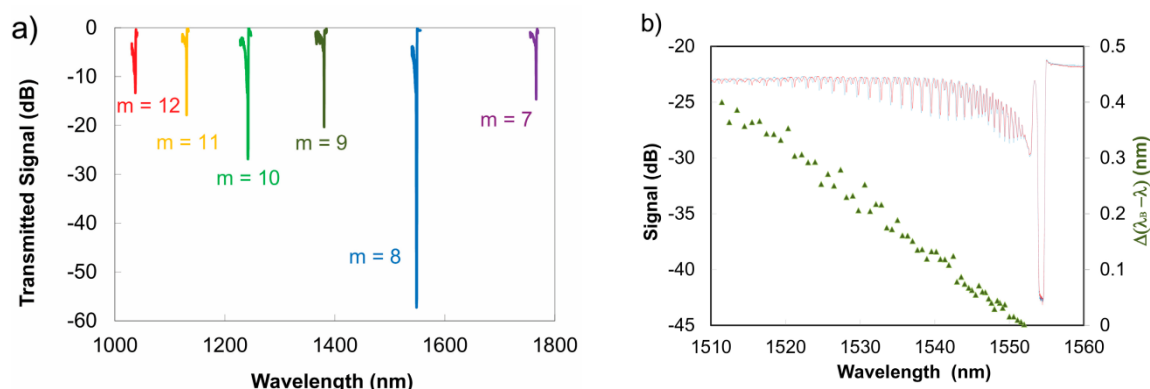
2.3.1 Өте қолайсыз жағдайларда көп параметрлік оптикалық талшықты датчиктермен зондтау

ОТБТ датчигінде пайдаланылатын алғашқы өлшенетін шама λ_B құрайды, оған Λ_G тор периодтылығын жылулық кеңейту немесе деформациялау арқылы өзгеруі, немесе термооптикалық және деформациялық оптикалық коэффициенттердің салдарынан n_{eff} өзгеруі әсер етеді. Стандартты оптикалық талшықта көбінесе бір ТБТ осы екі эффектті ажырату қиын болады, себебі екі эффект те бір уақытта λ_B әсер ете алады. Осы эффектілерді ажырату үшін басқа ТБТ бірінші ТБТ тікелей жақын, бірақ эффектілердің біреуінен оқшауланып орналастырылады. Ол тиімді болғанымен, бір жердегі әр түрлі параметрлердің шынайы өлшеу нәтижесі болмайды және көбінесе зондтаудың күрделі конфигурациясын талап етеді. Көп параметрлі зондтау үшін көп талшықты тәсілге баламалар негізінен деформация мен температураны анықтау үшін

ұсынылған. Олар талшықтың бір бөлігіне қосылған ТБТ-ынан тұрады, бірақ олардың тоқын ұзындығы әртүрлі болады, диаметрлері әртүрлі талшықта орналастырылған ТБТ-дан тұрады, қаныққан УК-лазерлердің әсері нәтижесінде туындайтын жоғары ретті ТБТ жауаптары, екі сәуле сынатын талшықтарда ТБТ [110] және т.с.с. осы әр түрлі әдістердің жан-жақты шолу[111] болып табылады.

1300°C төмен температуралар үшін көп параметрлі зондтау кезінде кремний диоксиді негізіндегі ІІ типті жоғары жиілікті ТБТ пайдалануға болады. Жоғарыда (3) теңдеуде көрсетілгендей, Δn торының синусоидалы емес профилі осы толқын толқын арнасы үшін бөлек таралатын жоғарғы ретті Брэгг резонанстарын тудырады [46]. Егер мысалы толқын ұзындығы қысқа талшықты алсақ, онда іргелі λ_B 1550 болу үшін қажетті ΛG мәні 535,5 нм құрайды. Қадамы талшықта іргелі Брэгг резонансын жасау үшін қажетті қадамнан 8 есе жоғары болатын $\Lambda G = 4,144$ мкм болатын ІІ типті ТБТ fb-IR жазбасы талшық бір модаль болған кезде 1 бастап 1,8 мкм дейінгі толқын ұзындықтағы терезеде бақылауға болатын жоғарғы ретті 6 резонанс тудырады (15а-суретті қараңыз). (3) теңдеуге сәйкес осы резонанстың m реттік нөмірлері 7 бастап 12 дейінгі мәндерге сәйкес келеді. Термооптикалық және деформациялық шашыраудың оптикалық коэффициенттерінің өзгеруінен n_{eff} өзгеруі, сәйкесінше λ_B өзгеруі осы толқын арнасының әр түрлі толқын ұзындықтары үшін әр түрлі болады. Осылайша, бір чирптелген құрылымды пайдалана отырып деформация мен температураға сезімталдылықты жоғарғы ретті резонансқа мониторинг жүргізу арқылы жоюға болады.

Көп параметрлік торды өлшеу сондай-ақ оптикалық талшықтағы Брэгг торлары оске қатысты тор жазықтықтарының аз мөлшерде көлбеуленуімен (10°) жазылған кезде түрленетін басқарылатын ядро режимі мен қабықша режимдерінің арасында таралудағы айырмашылықты пайдалану арқылы жүзеге асырылуы мүмкін.



(а) 4,28 мкм фазалық маскамен 980 нм бір модаль оптоталшықты талшықта жазылған ІІ-IR типті тордың жіберу спектрі; (b) 475°C температура кезінде құрылымданбаған толқын ұзындығына жазылған 500 В кернеу әсер еткен кезде HE1 режиміндегі m қабықшаның толқын ұзындығының салыстырмалы индукцияланған ығысулары[112].

2.15-сурет. 1мкм бастап 1,8 мкм дейінгі толқын ұзындықтағы терезеде

бақылауға болатын жоғарғы ретті 6 резонанс

Осындай көлбеу ТБТ өзекшеге бағдарланбай, қысымның әсерінен бағытталатын қаптау режимдерінің күшті резонанстарын тудырады. Көлбеу ТБТ жіберу спектрінде бақыланатын үлкен жоғалуларды тудырады, бірақ бұл жоғалуларға қоршаған ортаның әсері күшті болады. Активті аумақ режимінде де, сонымен бірге резонанс режимінде де толқын ұзындықтарының ығысулары температураға бірдей әсер етеді, алайда деформация қабықша режимдеріне ядро режимімен салыстырғанда әр түрлі әсер етеді. Одан кейін бір көлбеуленген ТБТ қосарланған параметрмен деформацияға тәуелді температура өлшейтін осьтік датчигі ретінде пайдалануға болады. сипатталған I типті ТБТ УК-лазер негізіндегі әдісті пайдаланып дайындалған және сәйкесінше 300°C жоғары температурада тиімді болмайды. Фс-ИҚ-лазерді және фазалық маска тәсілін пайдаланып көлбеу ТБТ дайындау 800°C дейін жұмыс істейтін екі параметрлік деформациялық және температуралық датчикті дайындау үшін пайдаланылған. Көлбеу чирптелген құрылымды қалыптастырудың орнына II типті Фс-ИҚ ТБТ қабықшаның резонансты модасының күшті байланысымен талшықтың өзекше немесе қабықша бөлігінің шекарасында жасалынуы мүмкін. Сондай-ақ бұл құрылымдарды жоғары температура кезінде көп параметрлік температура мен деформация датчиктері ретінде пайдалануға болады. II типті көп параметрлі сенсор үлгісі 15b суретте көрсетілген.

1300°C жоғары температуралар үшін кремний қос оксиді негізіндегі мультипараметрлік датчиктерді жасау мүмкін емес. Оның орнына сапфир негізінде жасалған ТБТ көп параметрлік зондтау үшін ең оңтайлы таңдау болып табылады. 1000°C жоғары температуралар кезінде ТБТ көп модальды сигналдарын бәсеңдете алатын қара дененің жылулық сәулеленуінің айтарлықтай жоғары деңгейлері туындайды. Қара дененің сәулеленуінен сигнал-шу деңгейінің осылай төмендеуін жоғарыда сипатталғандай сапфирты ТБТ талдау арқылы жоюға болады. Тордың қорытынды бір режимді реакциясы сигнал-шу деңгейінің жақсаруынан айтарлықтай күшейеді. Алғашында зақым келтіретін қара дененің радиация сигналы енді артықшылықты қамтамасыз етеді. Температураға тәуелді болатын температура берілуі ретіндегі қара дененің сәулелену спектрінің белгілі температуралық тәуелділігін пайдалана отырып, сапфир ТБТ күшті бір модальды Брэгг резонансындағы ығысулар деформациядан туындайтын толқын ұзындықтарының ығысуынан бөлуге болады. Осылайша, екі параметрлік температуралық деформация датчигінің сипаттамасын келтіре аламыз [113].

2.3.2 Талшықты оптикалық датчиктердің жоғары қысма қолданылуы

Стандартты Ge-легирленген кремний талшықта телекоммуникациялық жолақта орнатылған ТБТ 70 МПа дейін гидростатикалық қысым әсер еткен кезде -3мкм/МПа толқын ұзындығының теріс ығысуы туындайтындығы анықталды. ТБТ қысым әсеріне реакциясы ТБТ көміртекті талшықтан жасалған композитті қабатты құрылымнан тұратын трансдукция элементін қосу арқылы жақсартылған. Бөлме температурасында және 70 МПа дейінгі қысымда өлшеген

кезде қысымға сезімталдылық 3 есеге жақсартылған.

Гидростатикалық қысымның өзгерісі поляризацияға тәуелді болатын деформация коэффициенттерінің өзгеруіне алып келетін толқын арнасының асимметриялы геометриясы әзірленген. Толқын арнасының осы конструкциясын пайдалана отырып, ТБТ негізінде екі параметрлік талшықты-оптикалық температура мен қысым датчигін дайындауға болады. Мысалы, УК-лазермен индукцияланған ТБТ бүйірінде саңылауы бар оптикалық талшыққа жазылған, одан кейін ол температура мен қысымды бір уақытта өлшеу үшін пайдаланылған. Талшықты қабықшада бүйірлік ауа саңылауларының болуы бір ТБТ поляризациясына λ_B екі тәуелділікті жасай отырып, талшықтың күшті екі сәуле шағылдыруына алып келді. Бүйірлік саңылауларды қысымның артуы бойынша поляризациялық тәуелді λ_B толқын ұзындықтарының өзгеруі бақыланды. Дегенменде температураның өзгеруі екі резонанстың да толқын ұзындықтарының бірдей ығысуын тудырады. Брэгг резонанстардың 8,4 сағ таралуы ТБТ түсірілетін қысымның әр МПа үшін бақылған. Пайдаланылатын тор І типті УК-тор болғандықтан, оны 300° С жоғары температура кезінде көп параметрлік қысым, температура датчигі ретінде пайдалануға болмайды.[114]

Бүйірлік саңылауы бар толқын арнасының осы сияқты герметриясында ІІ типті ТБТ Фс-ИҚ пайдаланылып көп параметрлік қысым мен температура датчигі жасалды. Алынған датчик 800°С дейін температурада және 16,5 МПа қысымда жақсы жұмыс істейді. Осы тәсіл ІІ типті индекс өзгерісінің нанобұзатын құрылымдарымен байланысты құрылымды екі сәуле сынатын емес чирптелген реакцияның екі сәуле сынатын индукцияланған толқын арнасына негізделген. Соңғы уақытта бүйірлік саңылауы бар талшықтармен салыстырғанда екі сәулелі сынудың үш еселенген шамасына ие болатын кешенді микроқұрылымданған фотонды-кристалл талшық экстремалды қысымға мониторинг жасау үшін І типті ТБТ фс-УК температура құрамдастырылған датчигін жасау үшін пайдаланылған (140 МПа және 290°С дейінгі шамада) [115]. Жаңа фотон-кристалл талшықтың жоғары екі сәуле сынуы Брэгг резонансының поляризация күйінің қысыммен индукцияланған толқындық таралуын тудырды.

2.4 Жоғары деңгейлі өлшеулер үшін оптикалық талшықты Брэгг торларын пайдалану

Оптикалық талшықтың көмегімен деформацияның жоғарғы деңгейлерін өлшеу мүмкіндігі жоғары энергетикалық және аэроғарыш жүйелеріне құрылымдық мониторинг жүргізу үшін маңызды болып табылады. ТБТ негізіндегі датчиктер УК-лазер негізінде ТБТ жазудың қарапайым әдісінің сипаттарына байланысты осы мақсатта қолдану үшін қажетті ~50000 дейінгі микродеңгейлерге ($\mu\epsilon$) жете алмайды. Көптеген оптикалық талшықтар ТБТ жазғанға дейін жою қажет болатын УК-жұтатын қорғаныс полимер жабындары болады. Жабынды жою және оны қайтадан қолдану көптеген жұмыстардың орындалуын талап етеді, сондай-ақ арнайы қауіпсіздік шараларын қолданбаса, талшықтың механикалық беріктігін айтарлықтай әлсіретеді. Егер жолақты және қайталанатын процестердің алдын алған жөн. УК-лазер негізіндегі ТБТ жазуды

орындау үшін ультракүлгін сәулеленуден арнайы жабындар көрсетілген [116].

Қорғаныш полимерді орнатқанға дейін тікелей итеретін мұнарадағы қуатты лазерлерден жалғыз импульстармен торлардың жазбалары деформацияның жоғары деңгейлеріне шыдай алатын ТБТ датчиктердің массивтерін жазудың тиімді әдісі болып табылады. Мұнаралары торлардың сызбасын салу (DTG) әдетте Тальбото интерферометрі сияқты көлемді интерферометрлік әсерді пайдалануға мүмкіндік беретін ұзақ кеңістікті когеренттілікке ие сызықты тарайтылған эксимер лазерлік жүйе сияқты ұзақтығы наносекундтық импульсті ультракүлгін лазер көзін пайдаланып жазылады. DTG шектелуі бір импульстік сипаттың салдарынан егер арнайы жарыққа сезімтал талшықтар пайдаланылмаса, төмен ($<10\%$) шағылдырушы эффектке ие болады. Сондай-ақ критикалық маңызды мұнараның инфрақұрылымы қажет болады. Фемтосекундты лазерлі әсерге негізделген ТТС жазу әдісі икемді болып табылады, себебі ол талшықтардың ультракүлгін жарыққа сезімтал типтерімен шектелмейді, көптеген полимер жабындар инфрақызыл түс үшін мөлдір болады және шағылдыру қабілеті үлкен болуы мүмкін, бұл қабатты талшықтарды пайдалануды жеңілдетеді.

ФС-ИҚ-лазерлік сәулеленуді пайдаланып ТТС-жазба алғаш рет PbP әдісін пайдаланып көрсетілген, бұл кезде ТБТ негізінде термиялық тұрақты микроталшықтар алынған. PbP әдісінде пайдаланылатын НА жоғары болатын микроскоп нысаны талшық өзекшесінің торындағы индукция үшін қажетті экспозиция қарқындылығының үлкен дифференциялын жасаған, бірақ бұл кезде ИҚ-өткізгіш полимер жабынды өзгертпейді. Алайда бір импульсті микроталшықтың қалыптасуы үшін PbP индексінің өзгеру механизмі талшықтың механикалық серпімділігін айтарлықтай төмендеткен, бұл бастапқы бүтін талшықтардың шамамен $1/3$ құрайтын бұзылуларға алып келді [117].

ТБТ фемтосекундтық лазерлік ТТС жазбалары сондай-ақ фазалық масканы пайдаланып дайындалуы мүмкін. Құрамында сутегі болатын БМТ-28 талшықтардан жасалған акрилат жабындар мен Ge-легирленген майыстыруға сезімталдылығы жоғары талшықтармен акрилат және полиимиджабындар арқылы I типті ТБТ ФС-ИҚ инфрақызыл лазер мен фазалық маска әдісін пайдалана отырып тікелей жазу туралы айтылады. Фазалық әдісті пайдаланып ТТС ТБТ жазбаны жүзеге асыру PbP әдісімен салыстырғанда микроскоп объектісін емес фокустық арақашықтығы ұзын линзаларды пайдалануға негізделген. Объективтің бұл геометриясы линзалар мен бүтін талшықтарды фокустайтын шектелген түзету мен фазалық масканы орналастырудың бағдарлануын әлсірету үшін қажет. Фокустық арақашықтықтары қысқа цилиндр линзалар Рэлейдің қысқа диапазондарына ие, сондықтан талшық өзекшесі мен жабын бетінің арасындағы қарқындылықтарында үлкен айырмашылықтар туындауы мүмкін. Алайда күшті жинайтын линзалар біздің күткенімізден ірі чирптелген құрылымдарды жасайтын геометриялық абберрацияларды ұлғайтады. Егер индекстің өзгерісін өзекшеде мүмкіндігінше беттен алыс оқшаулау қажет болса, бұл қиындық тудыратын мәселе болады. Талшықтың өзекшесінде жақсы шоғырландырылған шоғыр жасау үшін, бірақ бұл кезде өзекше мен қабықшаны

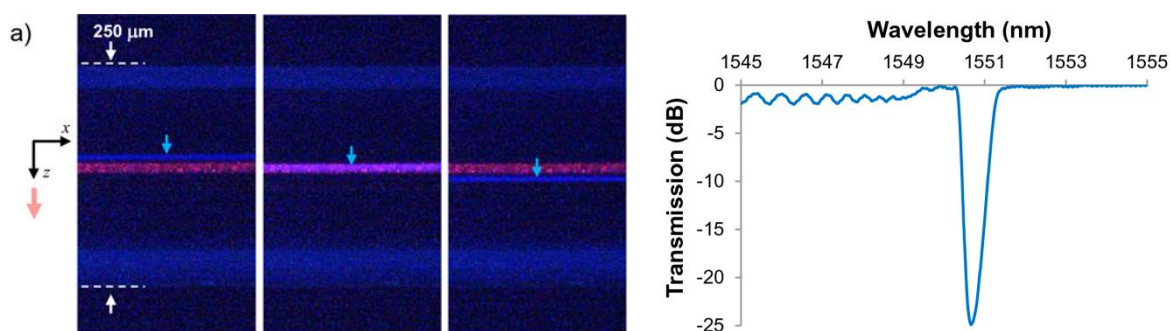
жауып тұратын қорғаныс жабынның арасында қарқындылықтардың айырмашылығы үлкен болса, геометриялық абберрацияларсыз объектив қажет. Геометриялық абберрация мен фазалық масканы төмендететін фокустаушы линзаны пайдалана отырып, I типті ТБТ FSI ТТС жазбалары Ge-легирленген және PSC оптикалық талшықтарынан жасалған акрилат және полиимид жабындар арқылы өте тиімді жазылды. I типті туындаған ТБТ ТТС алғашқы талшықтың механикалық беріктілігіне ұқсас механикалық беріктілікке ие және 60000με дейінгі деформацияны өлшей алады.

Эмпирикалық тұрғыдан I типті Фс-ИҚ ТБТ ТТС-жазбасы келесілердің есебінен жақсартылады: (i) бірнеше линзалары бар жүйе немесе адаптацияланған цилиндрлік емес линза сияқты талшықты жабын мен талшықты өзекшенің арасында қарқындылықта үлкен айырмашылық тудыратын тығыз фокустандырушы оптиканы пайдалану, осылайша импульстің талап етілетін энергиясы төмендейді; (ii) талшықта негізгі Брэгг резонансын тудырады, бірақ сондай-ақ нольдік деңгейде жақсы бәсеңдетуге ие болатын фазалық масканы пайдалану және (iii) фемтосекундтық импульс көзінің импульс ұзақтығын төмендету (120 фс 35 фс дейін) [118].

Тығыз фокустаушы оптиканы пайдалану талшықты жабында емес талшық өзекшесінде сәулелерді шоғырландыруды қамтамасыз ету үшін дәл тегістеу әдісін пайдалануды талап етеді. Біз жоғарыда фазалық маска арқылы бүйірлік жарықтандыруды пайдаланып, Брэгг чирптелген жазбы кезінде оптикалық талшықтың ішінде инфрақызыл фемтосекундты лазер импульстарының қарқындылықтарының таралуын визуализациялау үшін пайдаланылған бейсызық фотолюминисцентті визуализация әдісін сипаттаған болатынбыз. Жазбаның лазерлік өрісін тікелей визуализациялауға алып келетін, оптикалық талшықтың ішінде бейсызық фотолюминисценцияны индукциялайтын бұл әдіс талшық өзекшесінің маңайында лазерлік фокустың сипаттамасын (i) және нақты іс жүзіндегі жазба процесімен салыстырғанда энергиясы бірнеше есе төмен импульстарды пайдаланған кезде салыстырмалы лазерлік фокус көмегімен талшықты түзетуді оңтайландыруды жеңілдетеді. 16 суретте осы әдістің жабыны акрилаттан жасалған БТМ-28 талшықтың өзекшесінде фемтосекундты лазер сызықтың фокусын түзету үшін пайдаланылатын мысалы көрсетілген. 800мкм сәулелену үшін оңтайландырылған, бірақ нольдік реттегі жіберілісті бәсеңдету үшін арнайы қабықшасы мен фокустық арақашықтыңы 12 мм болатын цилиндрлік емес линзасы бар өлшемі 1,07 мкм болатын фазалық масканы пайдалана отырып, маскадан ± 1 тәртіпте бөгейтін сызықты фокус талшықтың өзекшесі мен қабықшада бейсызық фотолюминисценцияны түрлендіреді. Өлшенетін тордың индукциясы үшін қажетті энергияның шамамен жартысына тең болатын импульстік энергиялар пайдаланылды. Талшықтардың өзекшелері ядродан релейлік шашырау арқылы шығатын қызыл жарықты жіберу арқылы жарықтандырылған. Талшықтың ішіндегі фемтосекундты лазерлік сызықтың фокусының орналасқан орнына тәуелді фотолюминисценцияның толқын ұзындығы мен қарқындылығы өзгереді. Кремний қабықшада, мысалы оттекті кемтіктің көпірлік емес центрлерімен және оттегі жетіспеушілігінің

ақауларымен байланысты ~ 460 нм кезінде көк фотолюминисценция бақыланды. Алайда сәулені Ge-легирленген өзекшемен түзеткен кезде GeO ақауынан 400 нм күштірек фотолюминисценция бақыланады. Сызық фокусын орналастыру арқылы осы люминисценцияны барынша арттырудың арқасында, сондай-ақ маскамен объектив пен талшықтың көлбеуін реттеу арқылы ТБТ жазбасы үшін оңтайлы түзетуге қол жеткізіледі[119].

Бұл тәсіл әмбебеп тәсіл және сәулені шоғырландыру немесе жоғары окшауланған деформациялық немесе акустикалық өлшеулер үшін полиимид талшықты жабыны бар өте қысқа ТТС-торлар сияқты (ұзындығы ~ 100 мкм) тордың күрделі құрылымдарын тұрғызу үшін фазалық маска тәртібін көлденең ығыстыруға мүмкіндік береді. Импульс энергиясын өзгерте отырып, индексті модуляциясы 2×10^{-3} дейін II типті ТБТ ТТС оңай дайындалады, бұл кезде шашыраудың жоғалуы 0,1дБ төмен және полимер жабынның көрінетін зақымдалуы болмайды. Кейбір салаларда қолдану үшін, мысалы мұнайгаз саласында кем дегенде қорғаныс полимер жабын есептелген температураға дейін термиялық тұрақты болатын ТТС-торды жазу мүмкіндігіне ие болған дұрыс. Полиимид үшін ол шамамен 400°C жуық болады.



(a) Акрилатпен бір модальды талшық 28 арқылы лазерлік фокусты фемтосекундты фокустау, ол бейсызық және қараңғы-өрістік микроскопия көмегімен жеңілдетіледі. Талшықтың өзекшесі $\lambda_2 = 637$ нм қызыл жарықпен байланысты релелік шашыраумен кескінделеді. Сол жақтағы сурет өзекшенің алдындағы көк фотолюминисценцияны көрсетеді, ортаңғы суретте сызықты фокус өзекшені жауып тұратын кездегі ұлғайтылған фотолюминисценция көрсетілген, ал оң жақтағы суретте – өзекшеден тыс шоғарланатын лазерлік сызықтың фотолюминисценциясы көрсетілген. (b) өзекше бойынша түзетілген фотолюминисценция сызығының фокусымен жазылған ТТС өткізу спектрі (16 а суреттегі ортаңғы кескін)

2.16-сурет. Акрилатпен қапталған бір модальды талшық .[120]

2.5 Энергетикалық материалдардағы соққылық толқынды анықтау үшін арналған чирптелген талшықты Брэгг

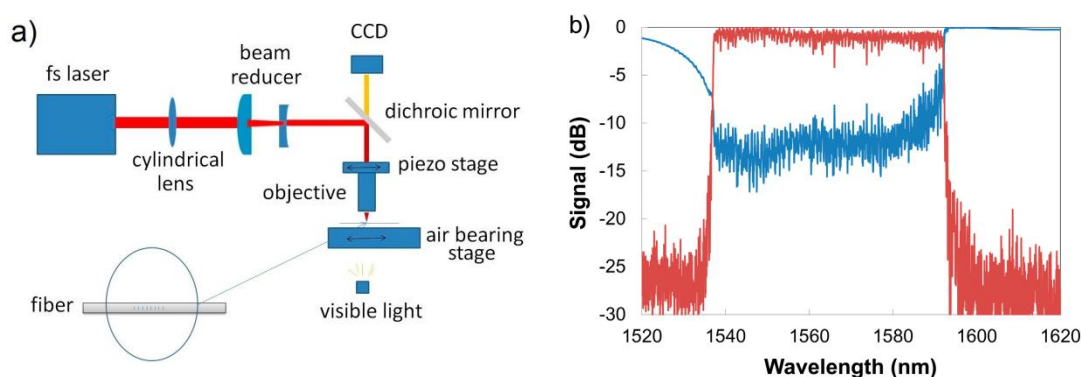
Чирптелген талшықты Брэгг торы талшық ұзындығының шамасында тор қадамының айналымды периодтылығына ие болады. Тордың осы атрибуты қашықтықтан жұмыс істейтін оптикалық талшықтардың тораптарында

туындайтын оптикалық сигналдардың хроматикалық дисперсиясын түзету үшін телекоммуникациялық салада тиімді түрде пайдаланылған. Қабылдау тұрғысынан қарастырғанда мұндай құрылымдар жоғары кеңістікті мүмкіндіктегі үзіліссіз өзгерістермен жұмыс істей алады, мысалы композиттік ламинатта деформация немесе сызаттың пайда болуы немесе фотонды жарық толқынды сызбаның жиынтығында температура мен деформацияның таралуы. ОТБТК қолайсыз орталар үшін талдаудың жоғары жылдамдықты жүйелерімен бірге соққылық толқынның және энергетикалық материалдар немесе жарылғыш заттарда детонацияның таралуының үзіліссіз кеңістіктік өзгерістерінде сенімді тәсіл болып табылады. Соққылық толқын өлшенетін таралу арақашықтығы ОТБТК ұзындығымен шектеледі. Коммерциялық қолжетімді ОТБТК ұзындықтары оларды орнату үшін пайдаланылатын фазалық масканың ұзындығымен шектеледі. Фазалық маскалар әдетте стандартты фотолитографиялық процестердің көмегімен жасалынады, сондықтан ~150 мм ұзындықпен шектелінеді[121].

PbP әдісін пайдаланып жазылған фемтосекундты лазерлік ТБТ фазалық масканың бұл шектеулерімен шектелмейді. Іс жүзінде PbP әдісін пайдалана отырып, шоғыр талшықтың бойымен жылжыған кезде лазер импульстерінің қайталану жиілігін сызықты түрде өзгертіп, тікелей чирптелген құрылымды дайындауға болады. Алайда бұл жерде мәселе микрожолақтардың түзілу процесі шашыраудың үлкен жоғалуларын ~1- 2 дБ/см тудыратындығында болып табылады. 100 мм тор үшін бұл құрылғы шағылдыру режимінде жұмыс істеген кезде > 20 дБ толық төмендеуіне алып келеді, ол соққылық толқын жылдамдығын өлшеген кезде орын алады. Соңғы уақытта талшық өзекшесінің бір осінің бойымен фокустық дағын сканирлеу әдісі шашырау жоғалуы төмен болатын PbP чирптелген торды жасайды. Импульстердің пайдаланылатын энергиялары сәулелену импульстарының арасында қандай да бір жабынды қамтамасыз ету үшін оңтайландырылған сканирлеу және өзекшесіні тегістеу жылдамдығымен наноөлшемді немесе микроталшықтардың (I типті режим) қалыптасуы үшін қажетті шектен төмен болды. Осы әдісті пайдалана отырып, жолақ ені 10 мкм және жалпы ұзындығы 19,5 см болған кезде орташа шағылдыру қабілеті 40% болатын чирптелген тор жасалды [122].

Осыған баламалы тәсілде PbP процесінде сыну көрсеткіші өзгерген кезде ассиметриялығы өте жоғары болатын, микроскоп объективімен коаксиалды координаттық орналасуға ие болатын сәуле траекториясында цилиндр линзаның фокустық ұзындығын енгізу арқылы микроскоптың объективімен ассиметриялық аумақ жасалады (2.17-суретті қараңыз). Цилиндрлік линзаның осі талшық осіне перпендикуляр бағдарланған, сондықтан оның ені цилиндр пішіннен жалпақ жолақ немесе жазықтыққа дейін өзгереді. Сондай-ақ цилиндрлік телескопты пайдаланып астигматикалық сәулені қалыптастыруда осы тәсілдің өзгертілетіндігін айта кету керек. Одан кейін лазерден әр импульс тор жазықтығын қалыптастырады. I типті чирптелген торлар регенеративті күшейтілген Ti 800мкм 120 фс импульстерді пайдаланып жасалынған: энергиясы 1,6 мкм/Дж болатын сапфирден. Цилиндр линза лазерлік сәуленің диаметрін

кішірейткеннен кейін микроскоп объективінің диаметрі кішірейту үшін 50X/0,6, Nikon Instruments, Melville, NY) бір дөңес линзадан және бір жазық-ойық линзадан тұратын шоғыр кішірейтіліп телескоп орналастырылған (Америка Құрама Штаттары). (SMF-28) талшық ± 10 нм орналасу дәлдігімен қозғалатын ауа сатысына монтаждalған (Aerotech). Лазердің қайталану жылдамдығы 250 Гц деңгейде орнатылған және талшық 132 мкм/с жылдамдықпен ауыстырылады, бұл 0,528 мкм 1-ретті тордың негізгі периодына алып келеді. Чирптелген тор лазердің қайталану жиілігі 0,02 Гц қадаммен 250 Гц бастап 248,7 Гц дейін елеусіз өзгеру арқылы жасалды. Осылайша, ұзындығы 26 см чирптелген ТБТ стандартты телекоммуникациялық талшықта дайындалған (мысалы, SMF-28), оның чирп жылдамдығы 2 нм/см, жолақ ені 3 дБ 55 нм, шағылдыру коэффициенті жолақтың 60% және шашыраудың жалпы жоғалуы 0,5 дБ кем болды. Сәйкестендірілетін I типті индекс жазықтығында SMF-талшықтың өзекшесі диаметрі шамамен 11 мкм, қалыңдығы 300 нм кем оптикалық микрометрдің көмегімен өлшенді. Жіберу және шағылдыру спектрлері 17b суретте келтірілген. 2.17-суретте көрсетілген шағылдыру спектрлері тегіс болмайды. Бұл орналасу қателігі ± 10 нм болатын ауа сатысындағы торда туындайтын фазалық қателіктермен байланысты. Егер тордың беріктілігі жақсартылса, шағылдырудың жалпақ спектріне қол жеткізіледі. Оған Ge мөлшері көп талшықты өзекшенің болуы есебінен немесе H₂ немесе D₂ жүктеу арқылы қол жеткізуге болады [123].



(a) Жалпақжазықтықты орнатудың сызбалық көрінісі; (b) Жалпақ жазықтық әдісімен дайындалған бір 28 модольды талшық, талшық қиa ұзындығы 26 см чирптелген тордың жіберілуі (көк) және шағылу спектрлері (қызыл түсті) [123].

2.17-сурет. Жалпақ жазықтықта орналастырылған талшық

Екінші бөлім бойынша қорытынды

Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленумен талшықты Брэгг торларының көмегімен қоршаған ортаны қатаң зондауда өндірісі саласындағы соңғы жасалған жұмыстар мен қолданылуларға, сондай-ақ лазер мен материалдардың арасындағы өзара фемтосекундтық әрекеттесу теориясының кейбір алғышарттары қарастырылды. Фазалық маска немесе «нүктеден кейін нүкте» әдісін пайдаланып фемтосекундты инфрақызыл және көрінетін лазерлермен кремний диоксиді негізіндегі оптикалық талшықтарда жасалынған Брэгг торына

сәйкес әсер ету шарттары талданған. Талшықты Брэгг торлары мен талшықтардың ерекше геометриясын пайдаланып, жарықтың әртүрлі параметрлерін ескеруге мүмкіндік береді. Таза кремний диоксиді, радиацияға төзімді фторидты легирленген диоксиді немесе микрокернауленген таза кремний диоксидімен фотонды-кристалл талшығы және шыны талшықтардан жасалған датчиктер мұнай және газ саласында сутегінің өтуінен, радиациялық иондалуынан аз зақымдалады, оларды сондықтан ядролық өнеркәсіпте пайдалануға болады. Температура 1300°C-дан жоғары болғандасапфир оптикалық талшыққағыБрэгг торларының көмегімен анықталады. Сапфир ТБТ құрылғылар реактивті қозғалтқыштар, көмірді газдандыру реакторларында және электр энергиясын өндіруде, табиғи газ турбиналарында жанудың қатаң шарттары үшін жарамды болып табылады.

Кристалды талшыққа негізделген ылғалдылықты анықтауға арналған талшықтық датчиктердің көптеген түрлері ұсынылған. Оптикалық талшықты температураны өлшеу әдістеріне қолдану көрсетілген. Оптикалық талшықты Брэгг торлы шағылыстыру негізіндегі сезімталдықтар және Фабри-Перот интерферометрлері, біртекті оптикалық талшықтар басылымдарда талқыланған.

3 ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫ БІР УАҚЫТТА ӨЛШЕЙТІН ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТЫ ДАТЧИКТЫ ТАЛДАУ

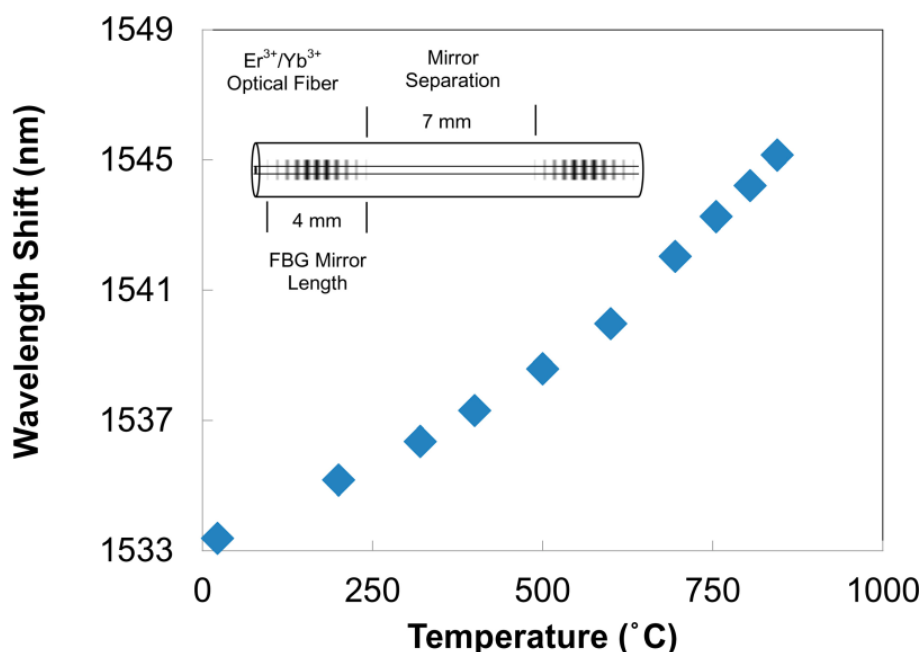
3.1 Температураны Фс-ТБТ негізіндегі талшықты лазердің көмегімен бақылау

Жоғарыда келтірілген датчиктер қосымшалар пассивті тәсілмен қашықтықтан мониторинг жүргізілетін тор құрылымына сүйенеді. Фс-ИҚ ТБТ талшықты лазерлік конструкция негізіндегі белсенді сенсорлы құрылғыларды жасау үшін сирек жер сілтілік элементтермен легирленген активті талшықтарға жатқызуға болады. Белсенді талшық үшін ішкі өзекше болатын фс-ИҚ ТБТ талшықты лазерде резонаторлы айна ретінде қолданылуы мүмкін немесе Брэгг шағылдырғышынан таралған конфигурациясы (БШТК) немесе кері таралған байланыс БШТК ретінде қолдануға болады. БШТК жағдайында талшықты лазердің қуысы берілген физикалық бөлінген және λ_B жабылған екі ТБТ-ынан тұрады. Соңғы ШТК жағдайда торлы құрылымда ф-фазалық ығысуды енгізу жалғыз тордың талшықты лазердің резонаторы ретінде әрекет етуіне алып келеді. Осы лазерлік талшықты конфигурациялардан нәтижесінде алынған лазерлік сәулеленулер Брэгг торларына қарағанда тар спектрлік өткізу жолақтарына ие болады. ТБТ негізіндегі талшықты лазерлер акустикалық датчик ретінде пайдаланылған немесе нақтырақ айтсақ, жақсартылған спектрлік мүмкіндіктері мен сигналдың шуылға қатынасының жоғары болуына байланысты гидрофонды және магнитті өрістік датчиктер ретінде пайдаланылған. Интерферометрлік бақылау кезінде талшықты лазер негізіндегі осы датчиктер $10 \text{ fε}/\sqrt{G\zeta}$ жуық болатын деформациялық мүмкіндікке жетті [134]. DBR конфигурациясын пайдалана отырып, ТБТ-резонатор айнасы метрлермен бөлінеді, бұл лазерлік жолақ ұзындығы бойынша деформация өзгерісін біріктіруге мүмкіндік береді. Талшықты лазер негізіндегі осы белсенді датчиктер тек қана I типті ТБТ көмегімен жүзеге асырылады. Жоғары температура немесе жоғары оптикалық қуат жағдайы үшін I типті FBG қатаң шарттарға төзімсіз болады. Термиялық тұрақты регенерацияланған торлар жоғары температурада жұмыс істей алатын талшықты лазердің қуысын жасау үшін пайдаланылған. Регенерацияланған торлардың әдетте шағылдыру қабілеті төмен болады және сәйкесінше талшықты лазердің резонаторының кейбір конфигурацияларына сәйкес келмейді [125].

Белсенді легирленген кремний талшықтарда жазылған II типті FB-IR FBG 600 бастап 1000 °C дейінгі диапазондағы жоғары температура кезінде жұмыс істей алатын ішкі резонаторлы айна ретінде қолдануға өте тиімді нұсқа болып табылады. PbP әдісін пайдаланып жазылған FBG 600° C дейін жұмыс істей алатын ұзындығы 3 см лазерлік жолақты жасау үшін пайдаланылған [125].

Фазалық маска тәсілін пайдалана отырып өте қысқа лазерлік резонаторлар (~7мм) II типті fs-IR FBG жоғары шағылдыру қабілетін пайдалана отырып Er-Yb (975 нм болған кезде жоғалу 475 дБ/м; және 1535 нм болған кезде жоғалу 26 дБ/м) күшті легирленген белсенді талшықта жасалған [137]. Қуаты 500 мВт болатын 980 нм лазерлік диодпен жүктеген кезде лазерлік резонаторлар

генерацияның 10%-дық тиімдігіне ие болды және 850°C температураға дейін сыналды. Лазерлік жолақтың бос спектрлік диапазоны ~ 200 мкм болды, ал резонатор жолағының ені 670 мкм болды. Бұл кездейсоқ режимнің пайда болуына алып келді. 3.1-суретте көрсетілгендей, лазер сәулеленуінің толқын ұзындығы температураға тәуелді ығысады. Талшық қуысының ұзындығының бойымен қыздырған кезде әркім жерлер резонатордың шағылу толқындарын бір-бірінен 850 °C температураға алшақтатады. Шағылдыру қабілеті жоғары шағылдырғышы немесе DFB конфигурациясы бар айна температуралық градиенттің жағымсыз әсерін болдырмау үшін қолайлы болып табылады.



3.1-сурет. Фс-FBG болатын талшықты лазер қуысының толқын ұзындығының өзгеруі. Қосымшада: талшықты-оптикалық резонатор сызбасы [125].

3.1.1 Оптикалық талшықты Брэгг торларын пайдалану технологиясы

Оптикалық талшықты Брэгг құрылғысын пайдаланатын талшықты-оптикалық талшық арнасында ядросына орнатылған оптикалық фильтр болып табылады. Ол спецификалық Брэгг резонансты жарық толқынының ұзындығын көрсетеді λ_B , ол Λ_G тор жиілігінің Δn индуцирленген лазер модуляциясының сыну көрсеткішіне тәуелді, ол толқын арналық ядроның аумағында чирптелген құрылымды құрайды. ТБТ барлық оптикалық жарық толқынының ұзындығын өткізетін жолақтағы фильтр ретінде қызмет көрсетеді және ол онымен резонансқа түспейді, тек қана Δn Брэгг ядросының талаптарын қанағаттандыратындарды ғана көрсетеді:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_G \quad (3.1)$$

мұндағы n_{eff} – бақыланатын зондты жарық режимін басқаратын, талшықты торлар арқылы таралатын тиімді сыну көрсеткіші. n_{eff} және λ_G қоршаған ортаға қоршаған оптикалық толқын арнасына сезгіштігі, ТБТ тетік ретінде қолдануға болатын негізгі қасиеті болып табылады. Талшықты сығу немесе талшықты ұзарту сияқты сыртқы механикалық эффектілер, λ_G тікелей өзгертеді, ал деформациялық-оптикалық эффект n_{eff} өзгертеді. Бұл екі өзгерістер де торға тензотетік ретінде жұмыс істеуге мүмкіндік беру арқылы λ_B ерекшеленеді. Бұл шамамен, термооптикалық эффект арқылы шынының сыну көрсеткішінің температуралық өзгеруіне және талшықтың жылу коэффициентінің ұлғаюы ТБТ температуралық тетік сияқты жұмыс істеуіне мүмкіндік береді. λ_B мәнінің $\Delta\lambda_B$ мәніне ауысуы ΔT температураның ε деформацияның өзгеруі келесі шешімді береді [1]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = P_e \varepsilon + [P_e(a_s - a_f) + \zeta]\Delta \quad (3.2)$$

Мұндағы P_e – деформация коэффициенті, талшықпен және талшықты өзімен байланысты a_s және a_f кез келген материалдың жылулық ұлғаю коэффициенті, сәйкесінше, ζ – термооптикалық коэффициент. Оптикалық талшықты Брэгг торлары квазитаратылған тетігін құру үшін әртүрлі λ_G оптикалық талшық сызығының әртүрлі орындарында жазылуы мүмкін. Осыдан кейін әрбір опткалық талшықты Брэгг толқындары әртүрлі λ_B ие болады және сондықтан бөлшектелген сенсорлы торға мультиплексирлене алады, бұл жерде оптикалық талшықтың ұзындығына дейінгі әртүрлі орындарда әртүрлі кедергілер мен температуралар өлшенуі мүмкін. Телекоммуникациялық толқын ұзындығы λ_B деформация болмаған жағдайда температурамен ~ 10 мкм / °С жылдамдықта араласады. λ_B тұрақты температурада ~ 1 нм 1000 микробеттің қойылған деформациясында араласады (мк ε)[67].

Оптикалық талшықтың Брэгг торларының дәстүрлі тетігі, ережеге сәйкес, кремний диоксидінің негізінде талшықтағы өзектеріне легирленген Ge қосылады, олар қуатты ультракүлгін лазерлерде жарықсезгіш болып табылады [66]. Δn беретін индекстің өзгеруі, процесстің нәтижесі болып табылады, бұл бір УК-фотон шынымен жұтылғанда және оттегі тапшылығының ақаулы орталығын қоздырады (ОТО). Бұл ақаулы орталар ~ 244 нм кезінде жұтылу жолағына ие болады [68]. Сонымен қатар, шыны матрицасының тығыздалуы лазерлік әсерлесу кезіндегі деффектінің пайда болу процесі кезінде байқалады және индекстің жалпы өзгеруіне әсер етеді, әсіресе, индекстің ($>5 \times 10^{-4}$) үлкен өзгерісі кезінде [69]. Бұл сыну көрсеткішінің өзгеруі оң болып табылады және I типті индекстің өзгеруі ретінде ескеріледі. I индекстің индекс ұзақтығы температураға тәуелді болып табылады. Бұл сөну дәрежесінің дәрежелік заңның салдарынан, яғни торлардың қалыптасуы кезіндегі пайда болатын ұсталған озған күйлердің термиялық депопуляциясынан шығады [72]. Жоғары температурада жылу жұтылуының тасымалдауыштары ұсақ қақпандарда олардың негізгі күйінен кетуге және қайтып келуіне мүмкіндік береді, бұл индекстің төмендеуіне әкеліп соғады. Осыған сәйкес, қалған тасымалдауыштар аса тұрақты күймен байланысқан, бұл негізгі күйден әлсіз болуы мүмкін, егер аса

жоғары температурада қолданылатын болса. Аса тұрақсыз тасымалдауыштар аса төмен температурада ыдырайтындықтан, тұрақсыз тасымалдауыштарын жою үшін және олардың сипатталған қабілеттеріне ұзақ уақытты тұрақтылықты алу үшін I типті торлар өзінің есептік жұмыс температурасынан жоғары температурада босаңсиды.

I типті УК лазерлі торлар тетікке 300 °C төмен шаманы азаматтық құрылымдарда, ұшақ, теңіз кемелерінде, мұнай өнімдерінде және т.б. салаларында «Ақылды пленка» сенсорлы тақтасы ретінде температура мен кедергілерді осы құрылымда Брэгговскті қолдану тамаша болып табылады. Аса экстремальды температурада (>450°C) I типті байланысқан тордың сыну көрсеткішінің өзгеруі, бұл температурадан жоғары болған жағдайда сезгіш элемент ретінде сәйкес келмейтін торға өзгертеді, өшіріледі.

ТБТ (Фс) қуатты фемтосекундтық ұзақтық көзін ұзақ кезеңмен қолдана отырып сипаттау, мысалы, инфрақызыл регенеративті күшейтілген Ті: сапфирлік лазерді 800 нм, ps импульстің дәстүрлі ұзақтығына қарағанда немесе CW негізіндегі УК лазер әдісінен бірнеше артықшылықтары бар. Біріншіден, фазалық маска амалына негізделген (Фс) торларын тіркеу әдісі, ТБТ-УК өндіруінде кәсіпорында қолданылатын ұқсас әдіс болып табылады; бірақ, фемтосекундтық әдіс кез келген оптикалық толқын арнасында қолданылуы мүмкін және УК-фотосезгіштікпен ғана шектелмейді. Инфрақызыл фемтосекундтық көз қолданылған (Фс-ИК) кезде, лазер кез келген материалды модифицирлей ете алады, төмен сигнал деңгейінің инфрақызыл сәулеленуі үшін мөлдір [73]. Бұл мүмкіндік әсіресе, оптикалық талшықтардың полимерлік жабынжарының қорғанышының ТБТ жазу үшін, ол көрінетін және ультракүлгін жарықты жиі жұтады. Жиіліктің еселенуінің арқасында немесе жоғарықуатты фемтосекундтық көздің 800 нм шығыстың еселенуінен, ТБТ жазуы фотосезгіш емес талшықтарда көрсетіледі, сонымен қатар, фемтосекундтық ультракүлгінді (Фс-УК) қолдана отырып және көрінетін фемтосекундтық импульсі 267 және 400 нм сәйкес келеді [74]. ТБТ тетігі кейіннен басқа да оптикалық материалдардан жасап шығарылуы мүмкін, яғни аса тұрақты, көміртек диоксидінің кремний диоксидіне қарағанда, нақты қатаң жағдайларда. Екіншіден, нақты қатаң жағдайлардың әсерін қолдануда және лазердің нақты толқын ұзындығын ТБТ жазуға болады, бұл материалдың шыны температурасының термотұрақтылығы болып табылады. Бұл термотұрақты торлар жоғары температуралық зондталуға сәйкес келеді.

Тетіктер үшін ОТБТ фемтосекундтық лазерлік жазба тақырыбында көптеген жұмыстары жүргізілді [75], қатаң ортадағы біздің фемтосекундтық ОТБТ үлгіні қоса алғанда [76]. Бұл диссертациялық жұмыста ОТБТ фемтосекундтық лазерлік қатаң тетігінің бұрынғы үлгісін жазба әдісі үлгісін көрсете отырып жаңартамыз, олар жазба әдісіне қолданылады және ОТБТ fs-IR жоғары температураны қолданудың жетістігі болып табылады. Фемтосекундтық лазерлі ТБТ ерекше қасиеттері көрсетіледі, олар әртүрлі әдістермен өндіріледі, сонымен қатар, оларды қатаң жағдайларда әртүрлі зонтық қосымшалар үшін қолдануға болады. Регенерленген Брэгговск торлары ТБТ термиялық тұрақты

құрылымының бірі болып табылады, ол фемтосекундтық тордың жоғары температурадағы тұрақты альтернативі ретінде қолданылуы мүмкін.

3.2 Фабри -Перо резонаторы(интерференция)

Фабри-Перот резонаторы негізгі оптикалық резонатор болып табылады. Ол параллельді бір-біріне қарама қарсы екі айналардан тұрады, олардың арасында резонанстық тудыратын оптикалық толқындар пайда болуы мүмкін, әдетте айнаның біреуі осы бағыттағы лазерлі жарықты жақсы өткізеді.

1899 жылы француз физиктері Чарльз Фабри мен Альфред Перо алғаш рет екі бөліктен тұратын күмбез шыныдан жасалған пластиналарды бір-біріне қатар қойып (Fabry-Perot стандарты) интерферометр ретінде қолдануға кеңес берді. Мұндай интерферометр спектрлік өлшеулердің шешілуін едәуір арттыруға мүмкіндік берді. Оптикалық энергияны сақтауға қабілетті резонатор ретінде Фабри -Перо эталонының жаңа өмірі 1958 жылдан кейін бір мезгілде Прохоров [1] және Шавлов, Таунеспен бірге [2] оптикалық кванттық генератор-лазерлеріне пайдалануды ұсынды. 1987 жылға дейін созылған патенттік сот талқылауы Гордон Гулд [3] басымдығын мойындады. Ол бір жыл бұрын ашық резонаторлық тізбекті ұсынды (Гулд сондай-ақ алдымен лазер терминін ұсынды). 1960 жылы 16 мамырда Мейман әлемдегі бірінші лазерді жарқын шаммен жарықтандырған.

Фабри-Перот резонаторының спектрлік реакциясы, оған шығарылған жарықтың және резонатордың айналасындағы жарықтың арасындағы интерференцияға негізделген. Құрылымдық интерференция шағылған екі лазер фазалас болса, резонатор ішіндегі жарықтың резонанстық жақсаруына алып келеді. Егер екі сауленің фазасы қарама қарсы болса, іске қосылған жарық әлсіреп белгілі бір бөлігі резонатордың ішіне сақталады. Сақталған, айнадан өтетін жарық көрсетілетін жарық қарағанда спектралды түрде өзгертілген.

3.2.1 Резонатордың жоғалуы, жарықтан тыс жарықтың пайда болуы, резонанстық жиіліктер және спектральды сызық пішіндері

l Фабри-Перот резонаторының екі айнасының геометриялық ұзындығы, n толтырылған ортаның бір текті сындыру индекісі. Жарық сәулеленудің қалыпты жағдайында резонаторда қилысқан жерде резонанс пайда болады. резонатордың жарықтың жылдамдығы $c = C_0/n$. c_0 - вакуумдағы жарық жылдамдығы, $\Delta\nu_{FSR}$ - еркін спектральды диапазон. Жол жүру уақыты t_{RT} мынадай болады.

$$t_{RT} = \frac{1}{\Delta\nu_{FSR}} = \frac{2l}{c} \quad (3.2)$$

r_i электр өрісінің шағылыстыруы қарқындылығы, R_i i айнаның шағылыстыру шамасы

$$r_i^2 = R_i \quad (3.3)$$

Егер басқа резонаторлық шығындар жоқ болса, фотонды ыдырау уақыты τ_c резонатордан кейін беріледі [6].

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{-\ln(R_1 R_2)}{t_{RT}} \quad (3.4)$$

Бір айнадан екіншісіне таралу кезінде жарықта пайда болған бір өтпелі фазалық жылжуды сандық бағалау, $\phi(v)$ жиіліктегі фазалық ауысым деп аталады.

$$2\phi(\nu) = 2\pi\nu t_{RT} \quad (3.5)$$

Резонанстар жарықтың бір айналым сапарынан кейін жиілікте конструктивті интерференция пайда болады. q әрбір резонатордың режим индексі, $q \in [-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty]$ аралықтағы бүтін сан, бұл ν_q резонанстар жиілігімен және k_q толқындармен байланысты.

$$\nu_q = q\Delta\nu_{FSR} \Rightarrow k_q = \frac{2\pi q\Delta\nu_{FSR}}{c} \quad (3.6)$$

Модальдық индекс пен толқындардың қарама қарсы $\pm q$ мен $\pm k$ екі режимді мәндері бар. Тиісінше қарама қарсы бағыттарды физикалық түрде білдіретін жиіліктің бір абсолюттік $|\nu_q|$ мәнінде жүреді. Белгілі бір E_q жиілікте ыдырайтын электр өрісі гармоникалық тербелістің бастапқы $E_{q,s}$ амплитудасымен ыдырау уақытының тұрақты $2\tau_c$ мәнімен ұсынылған.

Фазорлық белгілерде оны келесідей көрсетуге болады

$$E_q(t) = E_{q,s} e^{i2\pi\nu_q t} e^{-\frac{t}{2\tau_c}} \quad (3.7)$$

Уақыт бойынша электр өрісін Фурье түрлендірумен түрлендіріп бірлік жиілік аралықтағы электр өрісін мына түрде жазамыз.

$$\tilde{E}_q(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_q(t) e^{-i2\pi\nu t} dt = E_{q,s} \frac{1}{(2\tau_c)^{-1} + i2\pi(\nu - \nu_q)} \quad (3.8)$$

Берілген әбір режимдегі жиілік диапазонына сәйкес қалыпты спектральдық сызық пішіні.

(Spectral line shape) Спектрлік сызықтың пішіні дегеніміз атом, молекула немесе иондағы энергия өзгеруіне сәйкес келетін спектроскопияда байқалатын ерекшелік нысанын айтады.

$$\tilde{\gamma}_q(\nu) = \frac{1}{\tau_c} \frac{1}{(2\tau_c)^{-2} + 4\pi^2(\nu - \nu_q)^2} \quad (3.9)$$

Жиілік интегралы бірлік. $\Delta\nu_c$ Лоренцскалық спектральды сызық пішінінің жартысының барынша толық ені (full-width-at-half-maximum FWHM) енгізіңіз.

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{2\pi\tau_c} \Rightarrow \tilde{\gamma}_q(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\nu_c/2}{\left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2 + (\nu - \nu_q)^2} \quad (3.10)$$

Бірліктің шыңына дейін калибрленген Лоренцев сызығын аламыз:

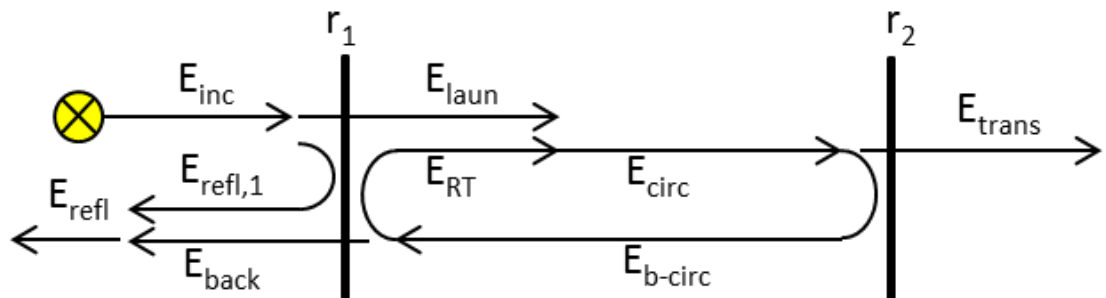
$$\gamma_{q,L}(\nu) = \frac{\pi}{2} \Delta\nu_c \tilde{\gamma}_q(\nu) = \frac{\left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Delta\nu_c}{2}\right)^2 + (\nu - \nu_q)^2} \quad (3.11)$$

Жоғарыда көрсетілген Фурье түрлендіргішін резонаторы q индекстің режимі барлық режимдер үшін қайталаған кезде, резонатордың толық режим спектрін алуға болады.

Сызықтық және еркін спектрдің диапазоны жиілікке тәуелсіз, ал толқын ұзындығы кеңістігінде $\Delta\nu_c$ сызықтық-спектр дұрыс анықталмайды және $\Delta\nu_{FSR}$ еркін спектральды диапазон толқын ұзындығына тәуелді болады, ν_q резонанстық жиілік ауқымы жиілікте пропорционалды болғандықтан, Фабри-Перот резонаторының спектрлік реакциясы табиғи түрде талданып, жиілік кеңістігінде көрсетіледі [127].

3.2.2 Джордж Айидің талдауы (Generic Airy distribution) ішкі резонансты күшейту коэффициенті

Фабри-Перот резонаторының 1-айнадағы электр өрісіне жауап беруі бірнеше Generic Airy талдауларымен сипатталады (математик және астроном Джордж Бидделл Айидің есімі аталды), ол жарықтың қарқындылыққа байланысты іске қосылған немесе инциденттерге қатысты резонатордың ішінде немесе сыртында әртүрлі позицияларда алға немесе артқа таралу бағытында жарық интенсивтілігін анықтайды. Фабри-Перот резонаторының шағылдыру айналмалы өріс әдісін пайдалану арқылы оңай алынады. Бұл тәсіл тұрақты күйді қабылдайды және әр түрлі электр өрістерін бір-біріне байланыстырады («Фабри-Перот резонаторындағы электр өрісі» суретін қараңыз). [128]



3.2-сурет. Фабри-Перот резонаторындағы электр өрісі

r_1 және r_2 электр өрісін шағылыстыратын айналар болып табылады, E_{circ} өріс көрсету үлгісі резонаторға енгізілген E_{laun} өріске байланысты болуы мүмкін. E_{inc} 1-айнаға келіп түскен электр өрісі, $E_{refl,1}$ 1-айнадан шағылатын өріс. E_{laun} 1-айнадан өтетін өріс, E_{circ} және E_{b-circ} резонатордың ішінде, тиісінше, алға және артқа таралу бағытында айналатын өрістер. E_{RT} резонатор ішіне бір раундтан кейін таралатындар, E_{trans} 2-айнадан өтіп таралатындар. E_{back} 1-айнадан қайта өтіп таралатын өріс $E_{refl,1}$ кері бағытта таралатын жалпы өріс, интерференция 1-айнаның сол жақ және оң жағында $E_{refl,1}$ және E_{back} өрістерінің интерференция E_{refl} арқылы және E_{laun} мен E_{RT} қосылыстарында пайда болатын интерференциялық өріс E_{circ} көрінеді.

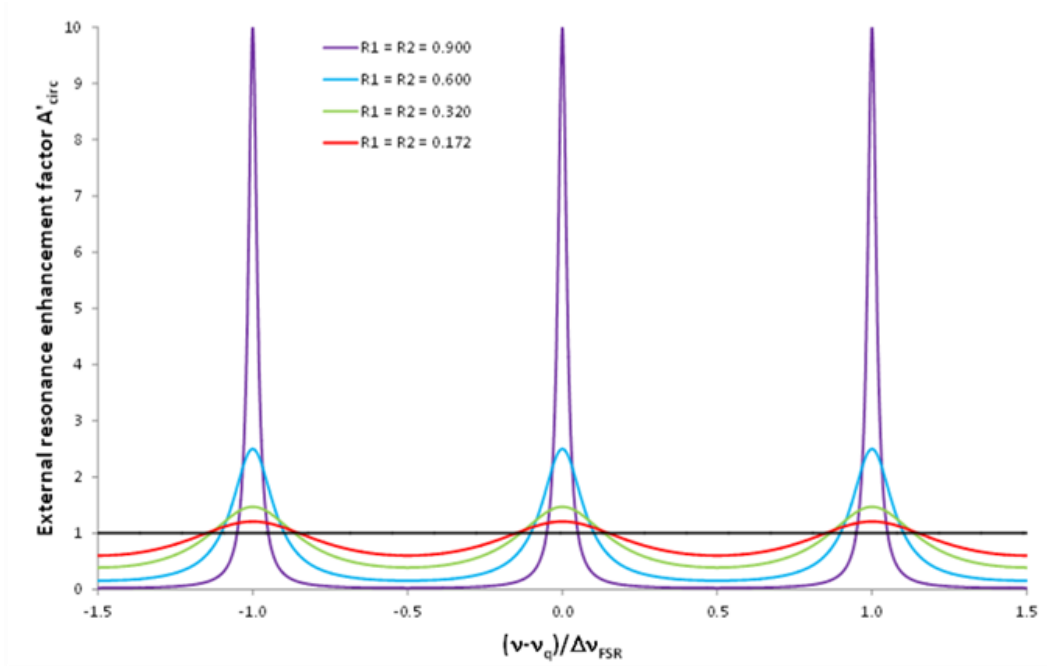
$$E_{circ} = E_{laun} + E_{RT} = E_{laun} + r_1 r_2 e^{-2i\phi} E_{circ} \Rightarrow \frac{E_{circ}}{E_{laun}} = \frac{1}{1 - r_1 r_2 e^{-2i\phi}} \quad (3.12)$$

Резонатор ішіндегі жарықпен көрсетілетін физикалық үдерістерді қарастыратын жалпы Airy таралуы, содан кейін резонаторда қарқындылыққа қатысты айналмалы қарқындылық ретінде пайда болады.

$$A_{circ} = \frac{I_{circ}}{I_{laun}} = \frac{|E_{circ}|^2}{|E_{laun}|^2} = \frac{1}{|1 - r_1 r_2 e^{-2i\phi}|^2} = \frac{1}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\phi)} \quad (3.13)$$

A_{circ} резонаторы ішіне енгізілген жарықтың ішкі резонансы күшейтуді қамтамасыз етуге спектралды түрде тәуелді екенін білдіреді. (Фабри-Перот резонаторындағы резонансты күшейту суретін қараңыз). $\mathcal{V}_q$ резонанстық жиіліктер, нөлге тең, $\sin(\phi)$ ішкі резонансты күшейту коэффициенті

$$A_{circ}(\nu_q) = \frac{1}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \quad (3.14)$$



3.3-сурет. Фабри-петро интерферометрінің резонанстық күшейтілуі. (жоғарғы жағы) спектрлік тәуелді ішкі резонансты күшейту, жалпы Airy таратуын теңестіреді. Айнадан өткен жарықпен шағылған жарық бірігіп резонансты тудырады [128].

Air-дың түрлендірулері; Ішкі резонанстық күшейткіштен кейін, Airy-тің жалпы үлестірімі орнатылды, барлық Airy үлестірулерін қарапайым масштабтау факторларымен шығаруға болады. Резонаторға енгізілген қарқындылық айнадағы 1 интенсивтілік жағдайының берілетін фракциясына тең болғандықтан[128]

$$I_{laun} = (1 - R_1)I_{inc} \quad (3.15)$$

ал 2 айнадан көрінетін 2 айна арқылы берілетін жарық 1 айна арқылы тасымалданып жарық резонатор ішіндегі айналатын қарқындылықпен берілетін және көрсетілетін фракциялары.

$$I_{trans} = (1 - R_1)I_{circ} \quad (3.16)$$

$$I_{b-circ} = R_2 I_{circ} \quad (3.17)$$

$$I_{back} = (1 - R_1)I_{b-circ} \quad (3.18)$$

Тиісінше, іске қосылған I_{laun} интенсивтілігіне қарай Airy басқа үлестірімі, $\hat{A}$ саулеленудің I_{inc} қарқындылығына қатысты

«Эмит» индексі резонатордың екі жағында шығарылатын қарқындылық сомасын қарастыратын Airy-дің бөлінуін білдіреді.

Артқа қарай таралатын электр өрістерістеріндегі интерференция Airy қарқындылықты өлшенетін әдісіне әкеледі.

$$\hat{A}_{refl} = \frac{I_{refl}}{I_{inc}} = \frac{|E_{refl}|^2}{|E_{inc}|^2} = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\emptyset)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2(\emptyset)} \quad (3.19)$$

Фабри-петро резонаторында конструктивті және деструктивті кедергі болғанына қарамастан, барлық жиіліктерде энергия сақталады:

$$\dot{A}_{trans} + \dot{A}_{refl} = \frac{I_{trans} + I_{refl}}{I_{inc}} \quad (3.20)$$

3.3 Температурамен ылғалдылықты бір уақытта анықтауға арналған датчикті талдау

Жоғардағы қарастырылған мәліметтерге сүйене отырып температура мен ылғалдылықты өлшейтін датчиктің жұмысын қарастыру. Қарастырылған датчиктің жұмыс принципі екі негізгі сезімталдыққа негізделген: Фабри-петро интерферометрі әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімтал агрозалық шағылысуы және температура өзгерісіне тәуелді талшықтың деформациялық өзгеріс фазасы негізінде оптикалық талшықты Брэгг торларының (ОТБТ) белгілі бір спектрлерді кері шағылысу эффектісіне негізделген.

3.3.1 Оптикалық талшықтың Брэгг торлының температураға байланысының кері шағылуы

Брэгг толқынының ұзындығы (λ_B) деп аталады, бұл Брэгг шартын қанағаттандыратын толқын ұзындығының ортасында орналасқан тар жарық спектрін орындайтын саңылау сүзгісі ретінде алынған[3].

λ_B шамасы осы тор аралықтарынан кері шағылатын температураға сезімтал жолақтар, ол келесідей болуы мүмкін Λ

$$\lambda_B = 2 \cdot \Lambda \cdot n_{eff} \quad (3.21)$$

Мұнда Λ – тордың периодтық кезеңі, n_{eff} - оптикалық талшықты сындыру индексі. Бұл екі параметр деформацияға байланысты температураның функциясы болып табылады. Сондықтан талшықты Брэгг торлы (ТБТ) сенсорлары температуралық деформацияларды анықтау үшін танымалдылыққа ие. ΔT температурадағы ε деформациядан туындаған Брэгг толқын ұзындығы $\Delta \lambda_{BT}$ келесі теңдеу арқылы көрінеді.

$$\Delta \lambda_{BT} = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dt} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T_{FBG} \quad (3.22)$$

Мұндағы $\Delta T_{FBG} = (T_H - T_0)$, T_H жоғарылаған температура градусы.

Температураның өзгеруіне байланысты Брегг торларының толқын ұзындығының өзгерісі төмендегідей:

$$\frac{\Delta \lambda_{BT}}{\lambda_B} = (1 - P_e) \cdot \varepsilon + [(1 - P_e) \cdot a + \xi] \cdot \Delta T \quad (3.23)$$

P_e , a , ξ , фотоэластикалы тұрақты, жылу кеңейту коэффициенті және тиісінше оптикалық талшықтың термо-оптикалық коэффициенті.

Көрсетілген температурадағы БТ λ_{B0} деп берілген, жылудан кеңею коэффициенті $a_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT}$ және ТБТ-ның термо-оптикалық коэффициенті $a_n = \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{dn_{eff}}{dT}$ берілген. Оптикалық талшықтыты Брэгг торларының температураға сезімталдығын S_{FBG} төмендегідей анықтаймыз.

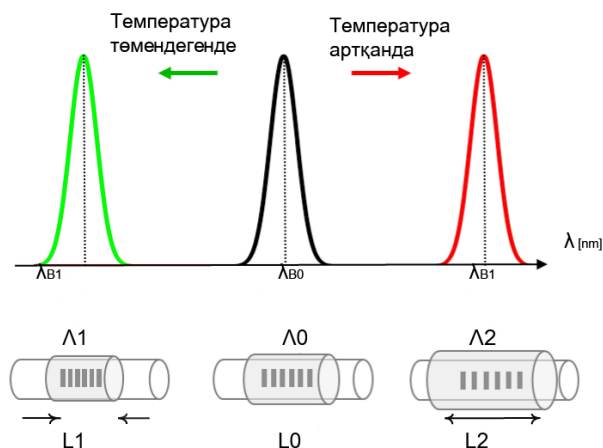
$$S_{FBG} = \frac{\Delta\lambda_{BT}}{\Delta T_{FBG}} = \lambda_{BO}(a_\Lambda + a_n) \quad (3.24)$$

Осылайша, Брэггтың орталық толқындарының ұзындығы келесідей анықталады:

$$\lambda_{BT} = \lambda_{BO} + S_{FBG}\Delta T_{FBG} \quad (3.25)$$

немесе

$$\lambda_{BT} = \lambda_{BO} + \Delta\lambda_{BT} \quad (3.26)$$



3.4-сурет. Температураға сәйкес ТБТ толқын ұзындығының өзгеру көрінісі, L артқан сайын кері шағылу толқынның ұзындығы артады.

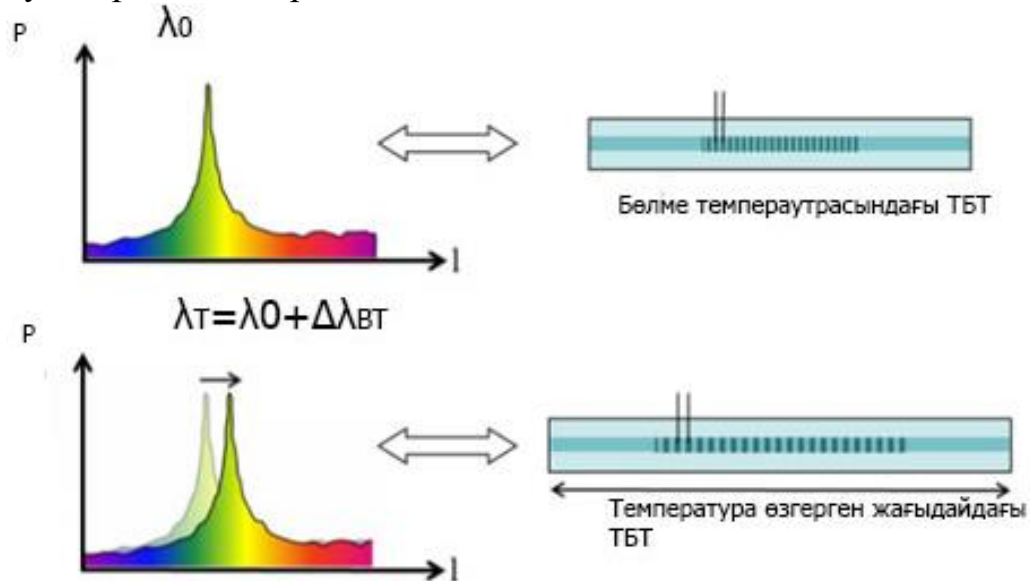
Температураны бақылауға қатысты (1) және (2) теңдеулерінде көрсетілгендей параметрге сезімтал акрилатпен қапталған коммерциялық Брэгг торлы оптикалық талшықты сенсоры арқылы орындалады.

3.1-кесте. Жұмыста пайдаланылатын тұрақтылар

Атаулары	Таңбалануы	Мәні
Брэгг толқыны	λ_{BO}	1550nm
Бөлме температурасы	T_0	25 $^{\circ}\text{C}$
Термо-оптикалық коэффициенті	a_n	$8.6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Жылу кеңейту коэффициенті	a_Λ	$0.55 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Тиімді сыну көрсеткіші	n_{eff}	1.482
Брэгг торларының периоды	Λ	0.5229 μm
Тиімді оптикалық кернеу тұрақтысы	p_c	0.22

Сондықтан, жарық Брэгг торларынан өткенде шамалы әлсіреу немесе сигналдың өзгеруі мүмкін. Алайда ол Брэгг шартын қанағаттандыратын толқын ұзындығына ғана әсер етеді және оны кері бағытта шағылыстырады. Брэгг толқындардың толқын ұзындығының дәлдігін ала орнату және сақтау мүмкіндігі Брэгг торларының талшықтардың маңызды ерекшелігі мен артықшылығы. Түскен жарықтың толқын ұзындығы Брэгг торларының белгіленген шағылыстыру компонентінің қатынасын қанағаттандырады (2-теңдеуде

көрсетілгендей). Шағылысқан компоненттің толқын ұзындығы температураға байланысты функция ретінде өзгереді, 2-суретті қараңыз. Бұл тәуелділік, FBG толқын ұзындығының көрсетілген температурға байланысты деформацияны анықтауға мүмкіндік беретіні жақсы белгілі.



3.5-сурет. Температураға байланысты функциялды өзгертін оптикалық талшықтың Брэгг торларынан кері бағытқа шағылған толқындардың фазалық өзгерісі

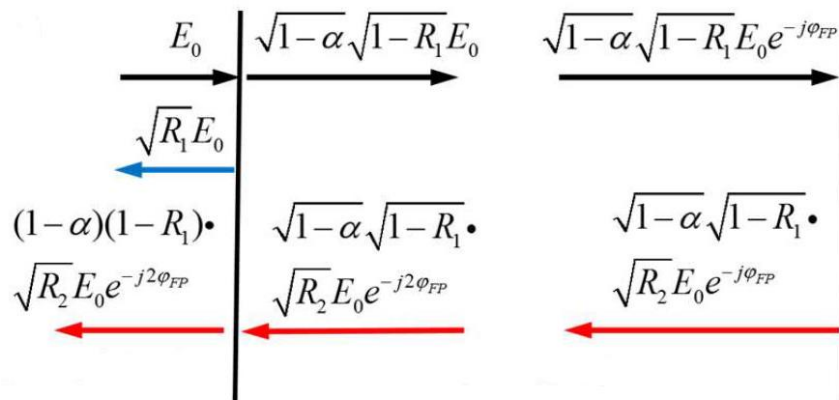
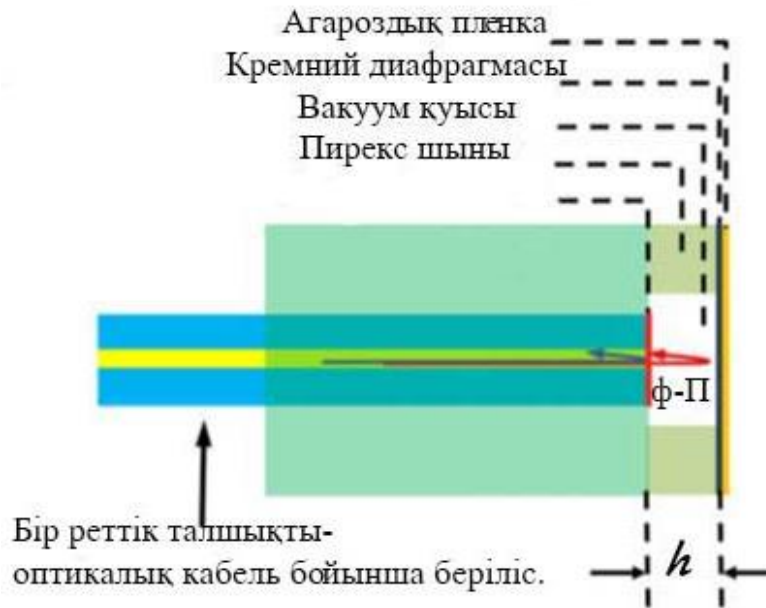
3.3.2 Фабри-Перот интерферометрі әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімталдылық

Ылғалға сезімтал Фабри-Перот интерферометрі схемасы 3.6-суретте ұсынылған. Оптикалық бір бағытты режимдегі талшық және оған Брэгг торлары орналастырылған, оның көлденең қимасы жарты-рефлексиялық пленкамен жабылып ФПИ вакуумдық қуысына жалғасады. ФПИ вакуумдық қуысты кремний диафрагмасымен жабылады. 3.6-суретте көрсетілгендей кремний диафрагмасына агроза гелі қойылады. Ұзындығы h деп анықталған қуыстың алдыңғы және артқы екі шағылыстратын бет бар, бірі ылғалдылыққа сезімтал агроза гелі. Бұл екі беттен шағылысқан жарық арасында интерференция құбылысы пайда болады. Себебі кремний диафрагмасындағы агроза гелінің қалыңдығы, нақты вакуум қуысының ұзындығынан әлдеқайда аз, олар теориялық модельде бір шағылатын бет ретінде қарастырылды. Осылайша, ФПИ-дің E_t екінші беттің шағылыстрған электр өрісінің шамасы мынадай болуы мүмкін.

$$E_r = E_0 [\sqrt{R_1} + (1 - a)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j2\varphi_{FP}}] \quad (3.27)$$

Мұндағы E_0 – берілген электр өрісі, a – таралудағы шығын факторы. R_1 және R_2 екі шағылыстратын беттердің шағылыстыру коэффициенттері. φ_{FP} - айналудың фазалық ығысуы, бұл мынадай болуы мүмкін

$$\varphi_{FP} = \frac{4\pi h}{\lambda} \quad (3.28)$$



3.6-сурет. ФПИ ылғалдылыққа сезімталдық схемасы. Екі шақ

Сондықтан m -ші ретті ең жоғары толқын ұзындығы

$$\lambda_m = \frac{2h}{m} \quad (3.29)$$

мұндағы m - бүтін сан. Біз еркін спектральды диапазондарды аламыз және екі іргелес жолақ арасындағы толқынның ұзындығының аралығын көрсетеміз.

$$\Delta\lambda_s = \frac{\lambda^2}{2h} \quad (3.30)$$

Толық шағылу спектрі $f(\lambda)$ ретінде сипаттауға болады

$$f(\lambda) = \left| \frac{E_r}{E_0} \right|^2 = A + B \cos(2\varphi_{FR}) \quad (3.31)$$

$$A = R_1 + (1 - a)^2(1 - R_1)^2 R_2, \quad B = 2\sqrt{R_1 R_2}(1 - a)(1 - R_1) \quad (3.32)$$

Френел формуласына сәйкес, екінші бетіндегі көрініс коэффициенті ретінде мынадай жазылуы мүмкін

$$R_2 = \left(\frac{n_A - 1}{n_A + 1} \right)^2 \quad (9)$$

Мұнда n_A - Агароз сыну көрсеткіші. Агарозаның сыну көрсеткіші өзгергенде, екінші бетіндегі шағылысу өзгереді. Агарозаның сыну көрсеткіші

қоршаған ортаның ылғалдылығына сезімтал болғандықтан [15]. ФПИ ылғалдылықты анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін толқын ұзындығы $f(\lambda)$ төмендегідей сипатталады.

$$f(\lambda) = R_1 + (1 - a)^2(1 - R_1)^2 \left(\frac{H\varepsilon_A - 1}{H\varepsilon_A + 1} \right)^2 + 2\sqrt{R_1}(1 - a)(1 - R_1) \left(\frac{H\varepsilon_A - 1}{H\varepsilon_A + 1} \right) \cos(2\varphi_{FP}) \quad (10)$$

Үшінші бөлім бойынша қорытынды

Алдыңғы бөлімдерде қарастырлған мәліметтерге сүйене отырып температура мен ылғалдылықты өлшейтін датчиктің жұмысын қарастыру. Қарастырылған датчиктің жұмыс принципі екі негізгі сезімталдыққа негізделген: Фабри-петро интерферометрі әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімтал агрозалық шағылысуы және температура өзгерісіне тәуелді талшықтың деформациялық өзгеріс фазасы негізінде оптикалық талшықты Брэгг торларының (ОТБТ) белгілі бір спектрлерді кері шағылысу эффектісіне негізделген.

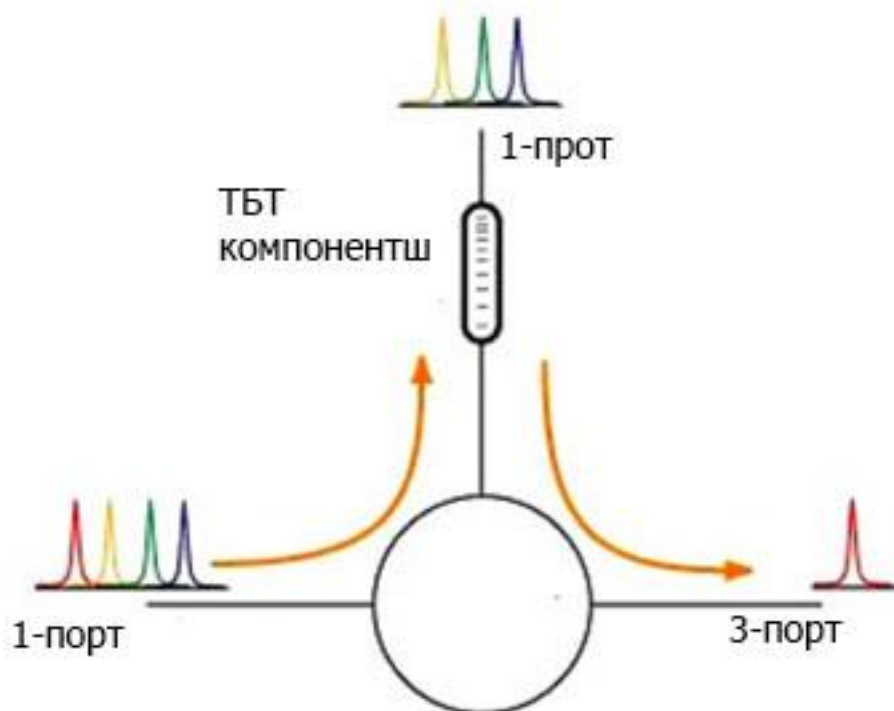
Фабри-перо интерферометрі әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімтал агрозалық шағылысуыды Джордж Айидің талдауы (Generic Airy distribution) ішкі резонансты күшейту коэффициенті негізінде қарастырдық, сондай-ақ оптикалық талшықтың Брэгг торлы кері шағылыструдың температураға байланысты деформацияға сезімталдығының математикалық теңдеуі құрылып зерттеу жұмысында көрсетілген нәтижелерге сай кері шағылысу спектр негізінде температураны анықтауға болатынын ұсындық.

4 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫНЫ ДАЙЫНДАУ ЖӘНЕ НӘТИЖЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

4.1. Әр түрлі толқын ұзындықтарының бір-біріне қатыссыз өткізетін Оптикалық циркулятор

Оптикалық циркулятор - үш немесе төрт портты оптикалық құрылғы, кез келген порты жарықтың шығуы үшін жасалынған. Бұл дегеніміз, егер жарық 1-портына кірсе, ол 2-ші порттан шығады, алайда шығарылған жарықтың кейбірі циркуляторға қайта шағылып (мәселен біздің ылғалдылыққа сезімтал жұқа пленкадан шағылып келген жарық) келсе онда ол 1-порттан шықпайды, ол тек 3-порттан шығады. Бұл электрондық циркулятор жұмысына ұқсас. Талшықты-оптикалық циркуляторлар оптикалық талшықта қарсы бағыттарда жүретін жарық сигналдарды бөлу үшін пайдаланылады, мысалы, бір талшық арқылы екі бағытта беруді қамтамасыз ету [125]. Кірістерін жоғары оқшауланғандығынан және жарық өтімділігінің төменгі кірістің жоғалтуынан оптикалық циркуляторлар кеңейтілген байланыс жүйелерінде және оптикалық талшықты сенсорлық қосымшаларда кеңінен қолданылады.

Оптикалық циркулятор - өзара емес құрылғылар. Демек, құрылғы арқылы өтетін жарықтың қасиеттеріндегі кез келген өзгерістерге байланысты кері бағытта қайтқан жарық толқындары кері шағылыспайды.



3.1-сурет. Оптикалық талшықты циркуляторлар

Циркуляторлар оптикалық сигналды бір бағытта екі бағыт бойынша жеткізу үшін қолданыла алады. Суретте көрсетілгендей: Циркулятор талшықтың әр жағында орналасқан. Әрбір циркуляция жұмысы сигналдарды қосқанда екінші бағыттағы сигналды алып тастайды. 3.2-суретте мысалды қараңыз.

1550 нм толқын ұзындығы жарықпен жұмыс істейтін стандартты циркуляторлар әдетте күрделі оптикалық құрылымының арқасында изоляторға қарағанда сәл жоғары болатын шамамен 0,8 дБ кірістерді жоғалтуы мүмкін.

3.2 Оптикалық талшықты оқшаулағыш

Талшықты оптикалық байланыс үшін пайдаланылатын пассивті компонент. Магнитофотикалық құрылғы ретінде, оптикалық оқшаулағыштың мақсаты жарықтың тек бір бағытта берілуіне мүмкіндік береді. Бұл лазер көзіне лазер көздерінің нұқсан келтіруінен немесе режимді өзгерістер, амплитудалық модуляция, жиіліктік ауысу және т.б. сияқты күтпеген кері байланыс лазерлік мәселелерді тудыруға жол бермейді. Сондықтан оптикалық-талшықты оқшаулағышты осы мәселелерді азайту үшін қажетті құрал.

Талшықты-оптикалық оқшаулағыштың құрылысы, жұмыс принципі және классификациясын талқылаймыз.



3.2-сурет. Оптикалық талшықты лазер оқшаулағыш

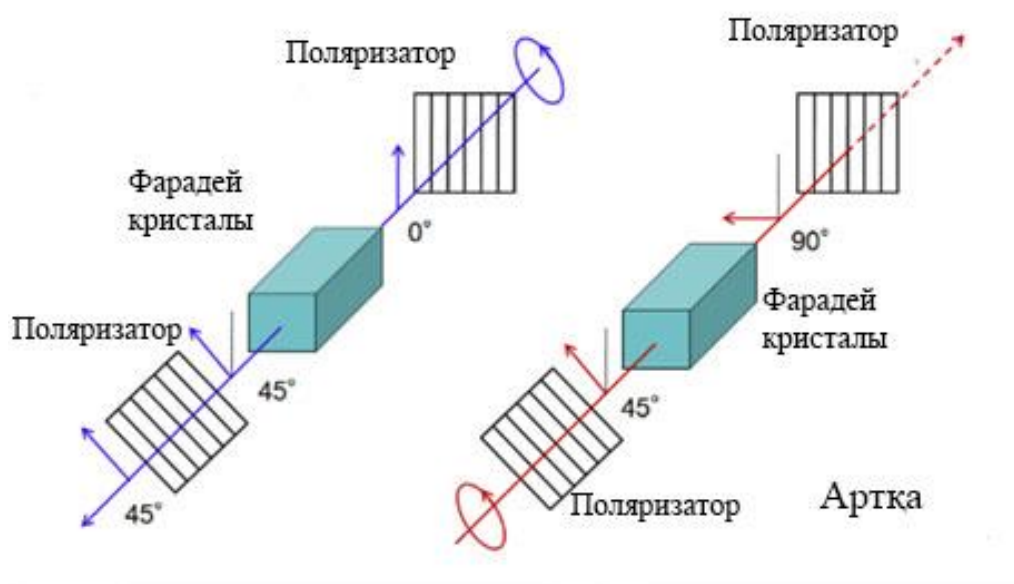
Оптикалық оқшаулағыш құрылысы. Талшықты-оптикалық оқшаулағыш кірісі поляризаторының үш негізгі бөлігін, магнитті Фарадей роторын және шығу поляризаторы қамтиды. Тек сызықты поляризацияланған жарық Фарадей роторына кіру поляризаторы арқылы өтеді. Фарадей роторының функциясы кіріс поляризаторына жеткенге дейін кіру бұрышын белгілі бір бұрышпен бұру. Бұл алдыңғы бағыттағы жарықтың кедергісіз өтуіне мүмкіндік береді. Дегенмен, кері бағытта жарық оптикалық оқшаулағыштан өтіп, көрінбейді немесе сіңіп кетеді. Оптикалық оқшаулағыштың бұл үш компоненті шебер жұмыс істейді және жарық сигналдарының қалыпты берілуін қамтамасыз етеді.

Оптикалық оқшаулағыштың жұмысы. Оптикалық изолятордың жұмысы 1842 жылы Майкл Фарадей ашқан Фарадей әсеріне негізделген. Фарадей эффектісі магнит өрісінің әсеріне ұшыраған шыны (немесе басқа материалдар) арқылы өтетін поляризацияланған жарықтың жазықтық айналатын құбылысқа қатысты. Айналу бағыты жарық беру бағытының орнына магнит өрісінің бағытына байланысты.

Түрлі жарық бағыттарына сәйкес екі түрі жұмыс істейтін оқшаулағыш бар. Олардың біреуі - алға, ал екіншісі кері режимде. Алдыға бағытталған кіру

режимде поляризаторға жарық енгізуге мүмкіндік береді және сызықты түрде поляризацияланады. Фарадей роторына лазер сәулесі жеткенде, Фарадэй айналмалы 45° поляризациямен айналады. Осылайша, жарық поляризаторды 45° поляризацияда қалдырады. Алайда кері режимдегі жарық бірінші поляризацияда 45° поляризацияда сынады. Содан кейін, ол Фарадей роторынан өтіп бара жатқанда, сол бағытта тағы 45° бұрылады. Содан кейін 90° поляризацияланған жарық кіріс поляризаторына тік болады да оқшаулаушыдан кете алмайды. Нәтижесінде жарық шағылыстырылады немесе сіңіріледі.

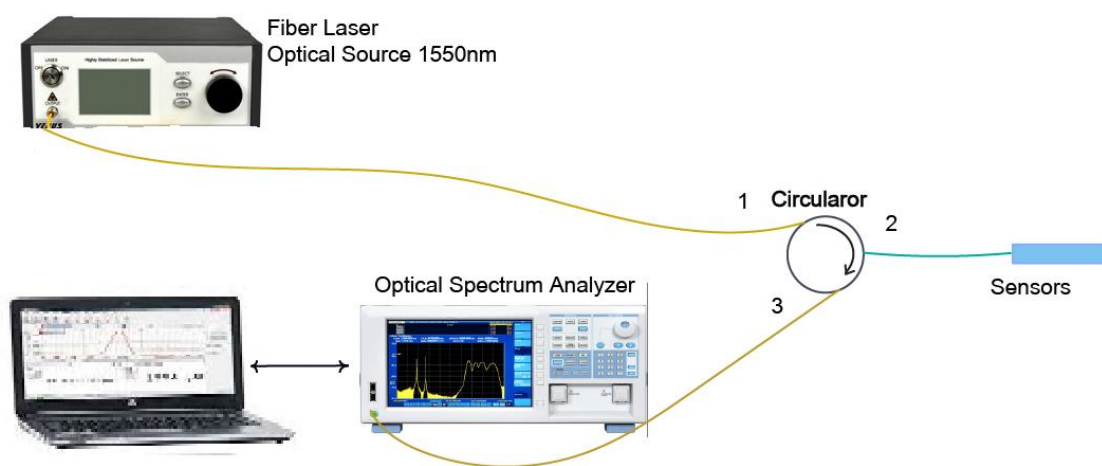
Алдыға



3.3-сурет. Алдыға артқа өтетін жарықтың поляризациялануы[126]

Эксперименттік қондырғыны дайындау

ФПИ-ге негізделген ылғалдылықты анықтаудың эксперименттік жұмысын орнату және талшықты Брэгг торлы температураға сезімталдығын анықтау. Талшықтық лазердің оптикалық көзінен шыққан спектрдің толқын ұзындығы 1500nm . Талшықты сақиналық қуыста бір бағыттағы лазермен жұмыс істеу үшін қажетті жарықтың бағытын оқшаулағышы бар. Ылғалға сезімтал ФПИ талшықты-лазерге циркулятор мен трансмиссиялық оптикалық талшық (TOF, Thorlabs) арқылы қосылады. ФПИ қуысы селективті сүзгі ретінде қызмет етеді және датчиктің ішкі жүйесінде ылғалды анықтауға арналған сезімтал басы ретінде қолданылады. Шығу спектрі 1 қосқыштары арқылы оптикалық спектральды анализатормен қосылады (OSA, YOKOGAWA, AQ6370, спектральды ажыратымдылық $0,02\text{nm}$). Онда неше түрлі спектрі анықталады. Өткізгіштіктің жоғалуы әртүрлі қоршаған ортаның ылғалдылығында ФПИ-мен модуляцияланғандықтан ылғалданудың ылғалдық сезімі талшықты лазердің шығу қуатына әсер етеді. Ылғалдылық сенсорын эксперименталды орнату, талшықты сақиналы лазерінің инкассавтикалық сезіміне негізделген, сондай ақ температураға сезімтал оптикалық талшықтың Брэгг торлы кері шағылу спектрінің өзгерісін оптикалық спектральды анализатормен анықтайды.



4.1-сурет. Эксперименттік қондырғы: Талшықты лазердің жарық көзі, оптикалық циркулятор, датчик, нәтижелерді талдауға арналған компьютер, оптикалық спектрометр

Елімізде датчикті өңдеу, зерттеу жұмыстарын жалғастру үшін қондырғыларының құны жоғары болуына байланысты кедергілер болды. Сондықтан температура мен ылғалдылықты бір уақытта анықтайтын датчиктің жұмысн ҚХР Чжэцзянский университетті ғылым инженерлікті бақылау колледжіндегі ақпараттық ғылымдар және электронды есептеу техникасы радио-фотондық ақпараттық өңдеу орталығындағы жоғары дәрежелі зертханасында тексерілді.

4.1-кесте. Экспериментке қажетті материалдыр және құны

Optical fiber Spectrum Analyzer Оптикалық талшықты анализатор	US \$25000.00- \$255000.00
Optical Fiber Laser Isolator Оптикалық талшықты оқшаулағыш	US \$50.00-\$450.00
1550nm/1310nm Fiber Optical Circulator Оптикалық талшықты циркуляторлар	US \$1000.00-\$1050.
GYXTW 4 6 8 12 core single mode outdoor fiber optic cable 1km price Бір бағыттағы оптикалық талшықты 1км	US \$100.00-\$210.00 / Kilometer
Fused Tapered Polarization Maintaining (PM) Optical Fiber Coupler поляризациямен қамтамасыз оптикалық талшық қосқыш түйін	US \$175.00-\$1470.00 / Piece

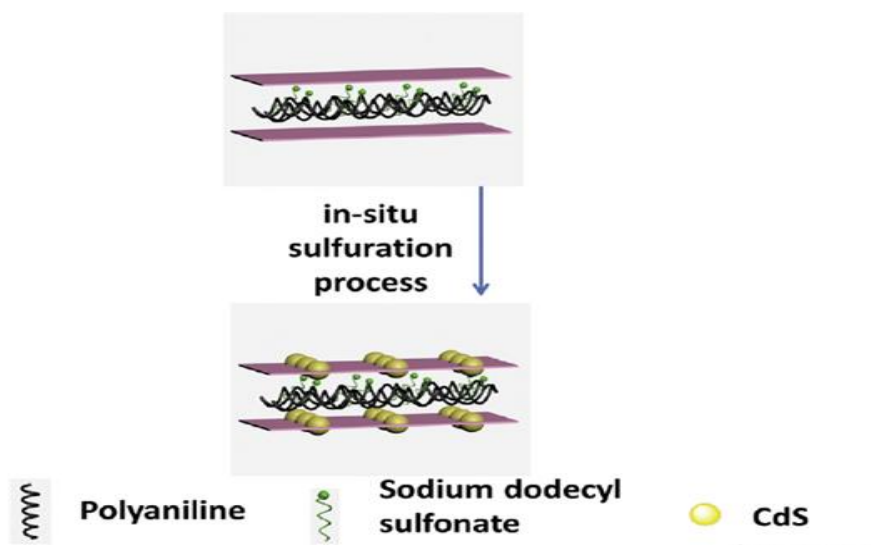
4.3. Ылғалдылыққа сезімтал агроза гелінің дайындалу технологиясы

CdS/PANI дайындау; CdS/PANI композиті сульфидтеу процесін пайдалана отырып, дайындалған. CdAl-LDH/PANI белгілі бір мөлшерін өлшеп алып, вакуумдалған және герметикалы шыны реакциялық камераға орналастырады. H₂S газының артық мөлшерін бөлме температурасында камераға енгізеді. H₂S газы H₃PO₄ пен Na₂S*9H₂O арасындағы реакция нәтижесінде түзіледі.

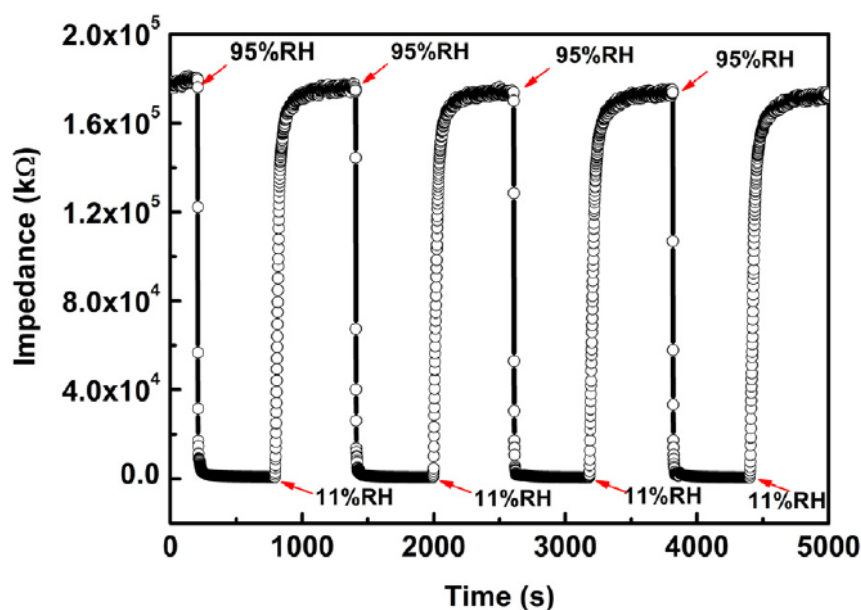
ФПИ өндірісінде, микроэлектромеханикалық жүйені жасауда кремний диафрагмасының жетілген әдістерін пайдаланылды, ол [24] баяндалған. Кремний диафрагмасының 2,5мм×2,5мм болатын шамамен қалыңдығы 10μm.

Қарама-қарсы екі шағылысатын беттер ортада вакуумдық қуыс орта бар. 2% агароздық гель кремний диафрагмасына тамшылату арқылы құйылады. Агроза гелі агроза ұнтағын ыдыстағы тазартылған суда еріту арқылы дайындалады. Тұндыру процесінде шамамен агроза қалыңдығы 1 μm болады.

Ылғалдылықты өлшеу. Алынған композиттік және деиондалған суды паста жасай отырып араластырады. Одан кейін пастаны үлдір жасау үшін төсемесі (6мм×3мм, қалыңдығы 0,5мм) керамикадан жасалған Ag-Pd араластыратын электродтарға орайды. Осыдан кейін үлдірді шамамен 25 °C температурада 24 сағат бойы ашық ауада кептіреді. Үлгілердің ылғалға сезімтал қасиеттері бөлме температурасында (25 °C) Chemical Humidity Sensing-1 (CHS-1) өлшеу жүйесінде әр түрлі салыстырмалы ылғалдылық кезінде (RH) 1,25 В айнымалы токта зерттелінді (Beijing Elite Tech. Co., ЖШҚ, Қытай). Салыстырмалы ылғалдылықтың (RH) 11% бастап 95% дейінгі әр түрлі деңгейлері әр түрлі қаныққан тұз ерітінділерімен алынған, солардың ішінде 11% RH үшін LiCl, 33% RH үшін MgCl₂, 54% RH үшін Mg (NO₃)₂, 75% RH үшін NaCl, 85% салыстырмалы ылғалдылық үшін KCl және 95% салыстырмалы ылғалдылық үшін KNO₃. Қаныққан тұз атмосферасы біртекті және тұрақты болды.

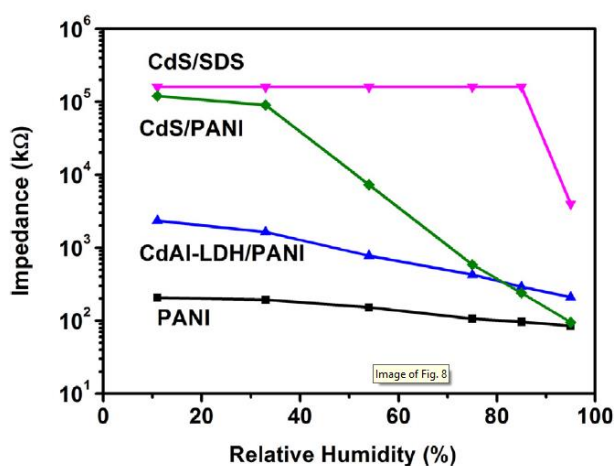


4.2-сурет. CdS элементін CdAl-LDH трансформациялаудың сызбалық көрінісі



4.3-сурет. CdS/PANI композитінің қайталанған жауап және қалпына келтіру сипаттамалары.

Реакция уақыты мен судың абсорбция және десорбция процестерін қалпына келтіру уақыты да ылғалдылық датчигінің қасиеттерін бағалау үшін маңызды параметр болып табылады. 4.3-суретте CdS / PANI датчигінің 11% бен 95% салыстырмалы ылғалдылықтың арасындағы реакция және қалпына келтіру сипаттамалары көрсетілген. RH 11% мәнінен 95% салыстырмалы ылғалдылыққа дейін артқан кезде импеданс 8 с кейін бірден $1,8 \times 10^5$ К шамадан 4 есеге 90 К дейін төмендетеді. CdS/PANI композитте негізделген сенсор жылдам реакция мен қалпына келтіру уақытын көрсетеді. Сондықтан ылғалдылық датчигі айналымда жақсы қайталануды көрсетеді. Датчиктің жылдам реакциясы абсорбция және десорбция процестері барысында су молекулаларын тасымалдайтын CdS/PANI желілік құрылымымен байланысты.



4.5-сурет. CdS/PANI, CdS/SDS, CdAl-LDH/PANI және PANI датчиктерінің ылғалдылық қисықтары

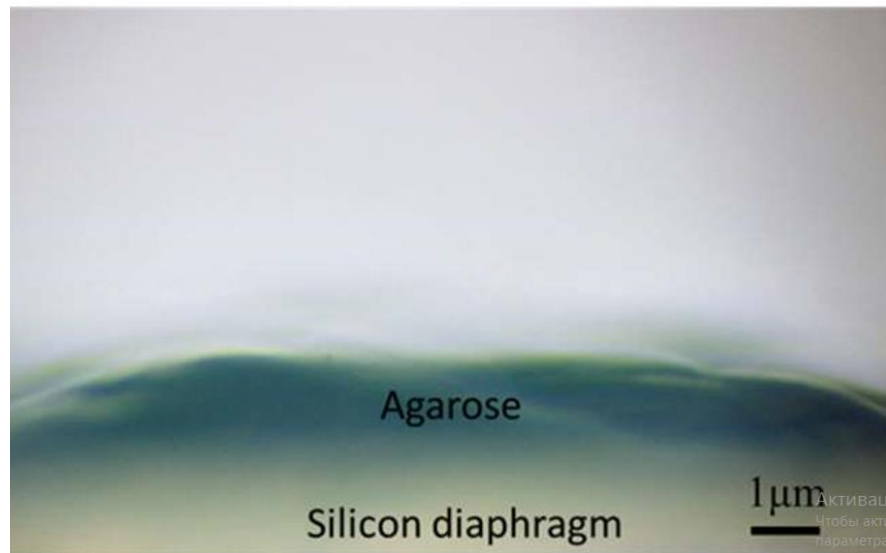
Сезімталдылық механизмі бойынша талқылау

CdS/PANI датчигінің негізгі сезімтал механизмін ары қарай зерттеу үшін CdS/PANI датчигінің кешенді импедансы салыстырмалы ылғалдылықтың 11% бастап 95% дейінгі диапазонында және жиіліктің 10 Гц пен 100 кГц диапазонында өлшенді. 4.5-суретте көрсетілгендей, кешенді импеданс қарапайым материалдардан толық ерекшеленетін түрлі ылғалдылық кезінде қисықтың аналогты пішініне ие болады.

Ол CdS/PANI негізделген датчигінің тек бір ғана өткізгіш механизмі болатындығын көрсетеді. Ылғалдылық датчигінің механизмін түсіну зонд (NH_2^+) пен H_2O молекулаларының арасындағы өзара әрекеттесуден туындайтын электрлік сипаттағы өзгерісті талдау арқылы су молекуласының болатындығын немесе концентрациясын анықтауға негізделеді. Салыстырмалы ылғалдылық аз болған кезде салыстырмалы құрғақ беттің салдарынан бірнеше ғана су молекулалары хемосорбталатындығы белгілі. Иондық өткізгіштік бөлме температурасы кезінде негізінен бір орыннан басқа орынға бет бойынша H_3O^+ иондарының секіріс тәрізді ауысуы арқылы жүреді. Осыдан кейін полимер тізбектер CdS/PANI қабатында жұтылған молекула санының артуымен сызықты кеңеюді созуға ұмтылады. PANI негізгі қайталанатын буындар азот атомының күйімен сипатталады, сәйкесінше NH_2^+ және NH болып белгіленеді. Сондықтан NH_2^+ су молекуласын тасымалдаушы болып табылады. Бұл тасымал $\text{NH}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH} + \text{H}_3\text{O}^+$ қышқыл-сілтілік реакция ретінде жазылады. Сондай-ақ, көптеген зерттеушілер полимерден протондарды осылай тасымалдау су молекуласы болған кезде орын алатындығын дәлелдеген. Сонымен қатар, ылғалдылық жоғары деңгейде болған кезде судың бір немесе бірнеше қабаты су түзеді және H^+ немесе H_3O^+ тасымалдануын арттырады. Су қабатына иондардың жылдам өтуі CdS/PANI импедансының жылдам төмендеуіне алып келеді.

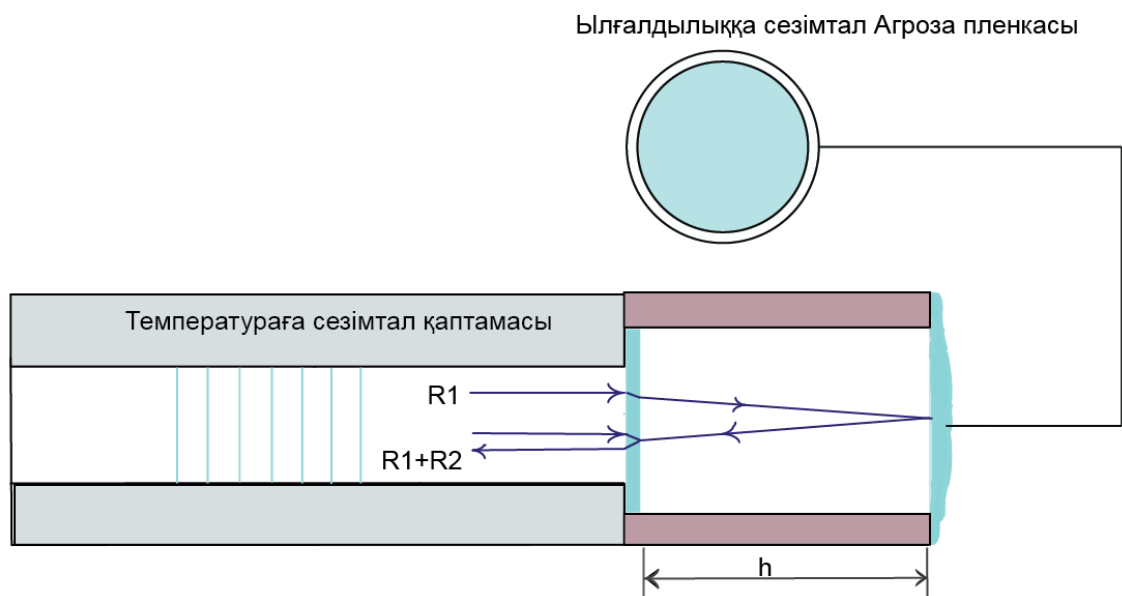
4.3.1 Салыстырмалы ылғалдылыққа байланысты сезімталдықа тәжірибе жасау нәтижелерді талдау

Сәйкесінше, ылғалдылықты өлшеудің келесідей механизмі ұсынылады: композиттегі полианилин тізбектері мен CdS арасындағы өзара әрекеттесу осы адсорбциялық әрекетке алып келеді. Төмен ылғалдылық жағдайында полимер тізбектер катушканың ықшам түріне жиналу басымдылығына ие болады, бұл заряд тасымалдауына көмектеседі. Ылғалдылықтың жоғары деңгейінде полимер су молекуласын жұтады, ол ықшам катушканың бір-біріне қатысты түзелетін түзу тізбектерге жайылуына алып келеді. Полимер тізбектер қайтадан созылған сызықты түрге келеді, бір-бірімен өзара қатар болады және CdS бірге желілік скелет қалыптастырады.

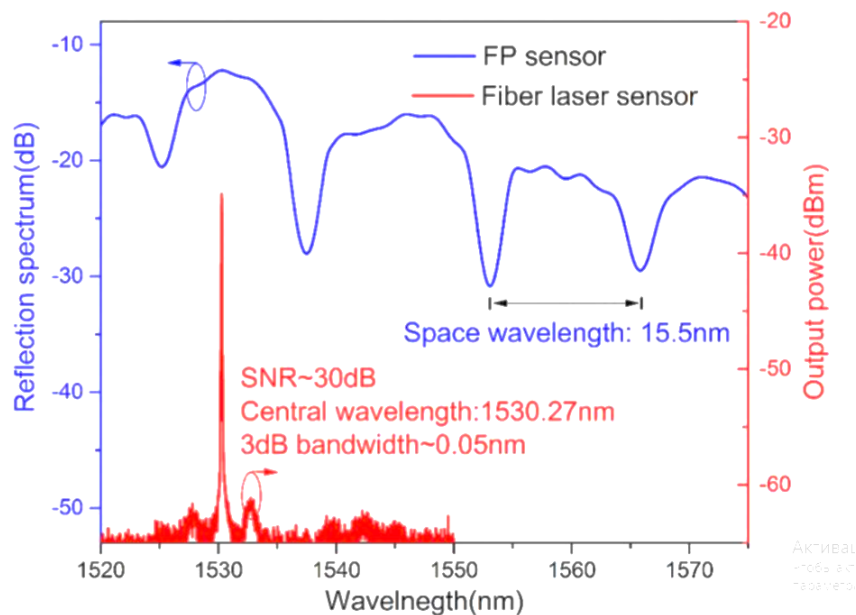


4.6-сурет. Агароз пленкасының микроскоппен көрінген бейнесі

Ұсынылған ылғалдылық сенсорының оңтайландырылған сигналдан шуылға қатынасына қол жеткізу үшін, датчикті дайындауда Фабри-Перо интерферометрінің спектрінде шыңы арасындағы спектрлік қабаттасуды қамтамасыз ету қажет. Ол талшықты лазердің ішіндегі жоғалуын азайтады. Эксперименттерде жарықтың толқын ұзындығы шамамен 1500 nm . ФПИ-ның толқын ұзындығымен арақатынасы ФП қуысының h ұзындығын өзгерту арқылы жасалады. Қоршаған орта ылғалдылығы 35% болғанда, ФПИ көрсететін спектрі 4.8-суреттегідей. ФПИ көрініс спектрінде максималды қарқындылығы бар шыңы шамамен 1530 nm , ал көрсетілім жоғалуы $-12,2\text{ dB}$. ФПИ толқын ұзындығының аралығы 1550 nm құрайды, ығыстыру бетіндегі электр өрісінің моделі.

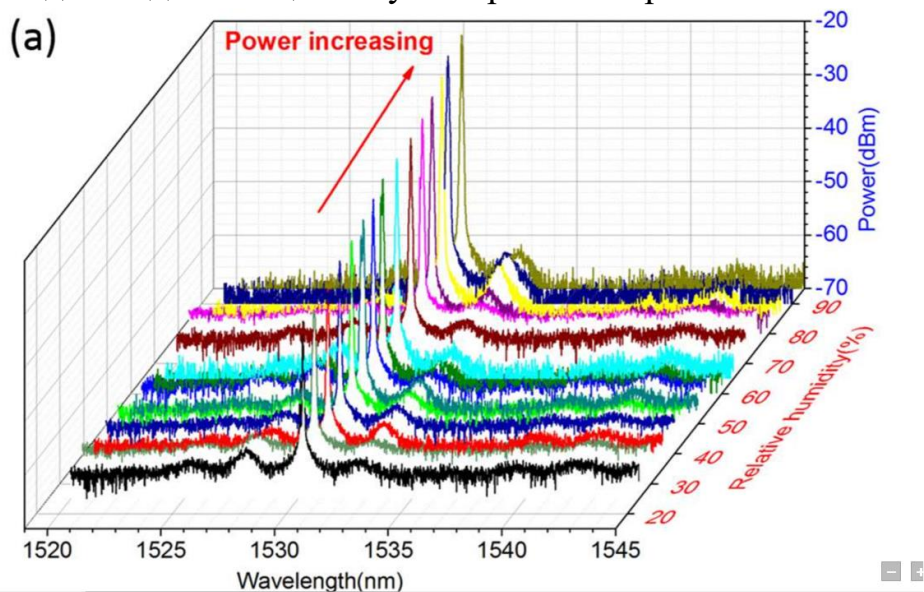


4.7-сурет. Температура мен ылғалдылықты біріктіре өлшейтін датчиктің құрылымдық сұлбасы.

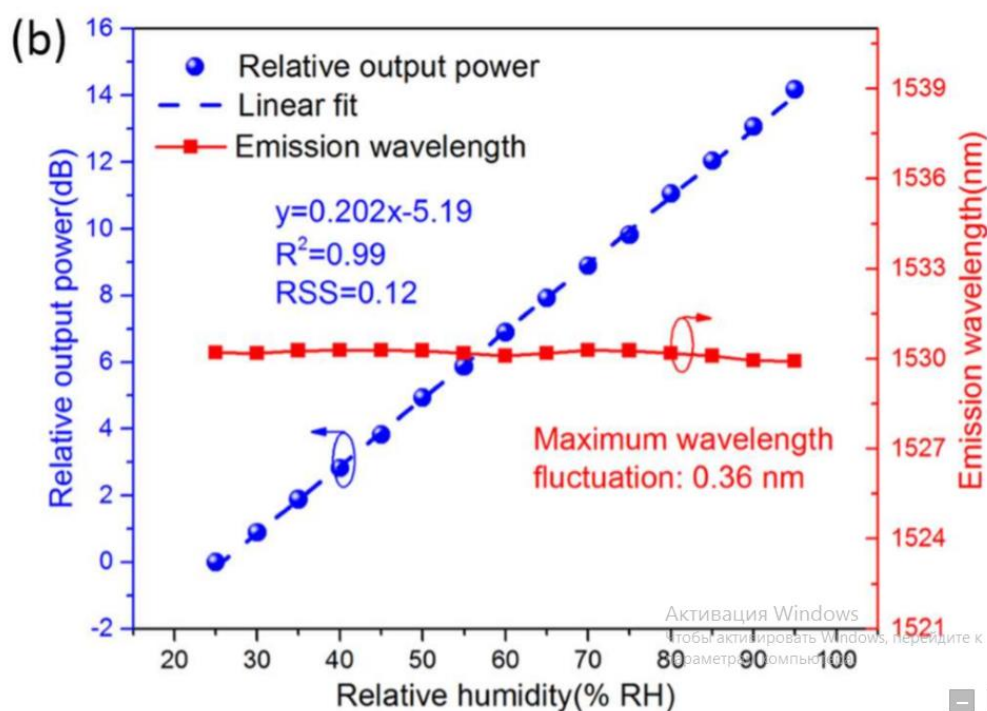


4.8-сурет. Қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығы 35% болғанда, ФПИ-нің тиісті оптикалық талшықты лазер спектрлері.

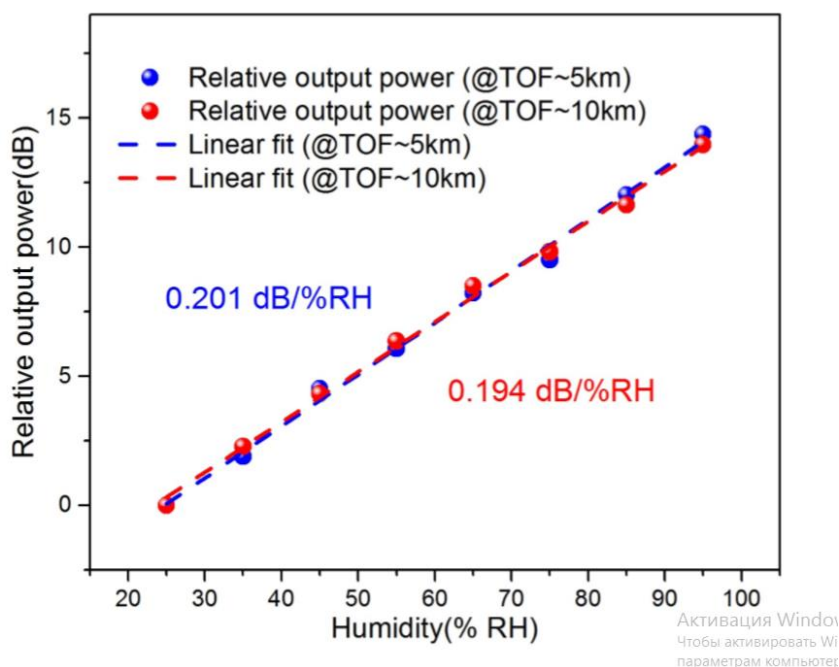
ФПИ әдісіне негізделген салыстырмалық ылғалдылық 20%-98% диапазонында құрайды. Қоршаған ортаның ылғалдылығы өзгерген кезде талшықты лазердің шығу спектрі 4.9-суретте көрсетілгендей өлшеу нәтижелерін сипаттаған, талшықты лазердің шығу қуаты -36.78 dBm-ден -22.61 dBm дейін артады, себебі қоршаған ортаның ылғалдылығы 25% -дан 95% -ға дейін өзгереді. Салыстырмалы ылғалдылық 10% бойынша өзгергенде. Тиісінше сенсордың сигналдың шуылға қатынасы 30 dB-ден 45 dB-ға дейін артқан және өткізу қабілеті 3дБ, ол 0,05 nm кем болған. Ылғалдылық сезімталдығы 0.202 dB/% деп өлшенеді. Тәжірибеде сенсордың жақсы сызықты екенін көрсетілген. Қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығы 20%-дан 90%-ға дейін өзгертіндіктен, Агрозаның сыну индексі 1,45-ден 1,48-ге дейін өлшенеді [23]. Тәжірибе нәтижесі сенсордың ылғалдылыққа сызықты жауап беретінін көрсетті.



4.9-сурет. Қоршаған ортаның ылғалдылығы 25% -дан 90% -ға дейін өзгерген кездегі талшықты лазерінің шығу спектрі өзгерісі.



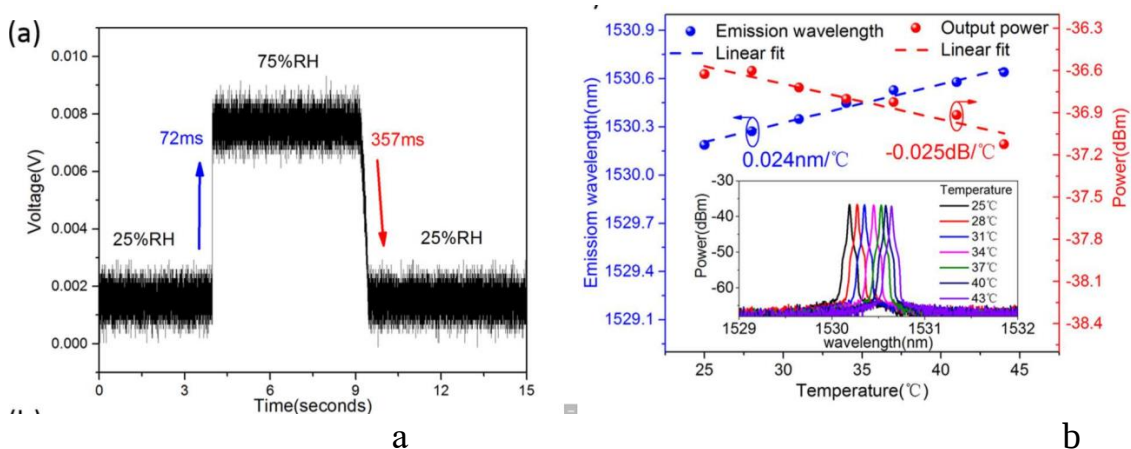
4.10-сурет. Қоршаған ортаның ылғалдылығы ретінде талшықты сақина лазерінің шығу спектрі 25% -дан 95% -ға дейін өзгереді. (b) салыстырмалы шығу қуаты мен талшықты сақиналық лазердің толқын ұзындығы арасындағы ылғалдылыққа жауаптары.



4.11-сурет. Ұзындығын 5 км-ге және 10 км-ге дейін ұзарту арқылы талшықты сақина лазерінің салыстырмалы шығу қуатының ылғалдылығы туралы байланыстары.

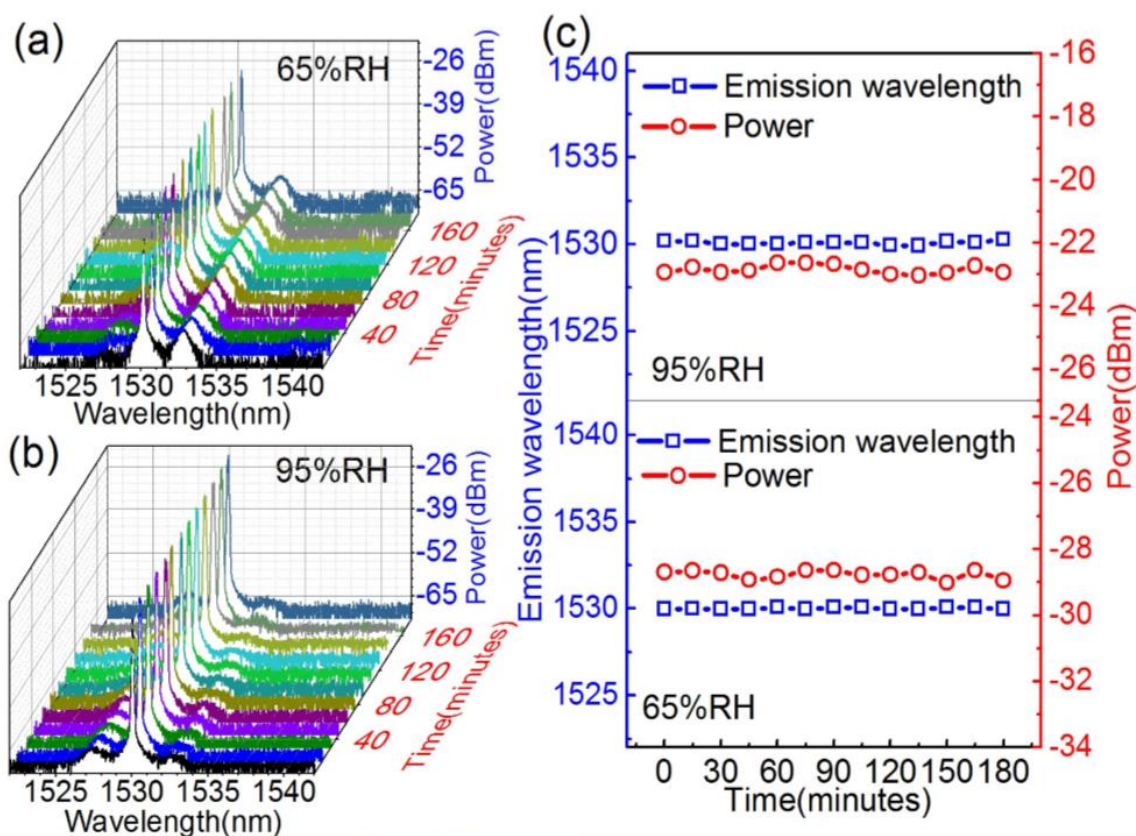
Датчиктің болжамды жауап беру уақыты 72мс тез болған. Қалпына келтіру уақыты шамамен 357 мс, бұл датчиктен алынған ылғалды ауа уақытына байланысты. Уақытты енгізу мен алып тастау уақытын есепке ала отырып, біз реакцияның нақты уақыты мен қалпына келтіру уақыты өлшенген уақытқа қарағанда қысқа деп ойлаймыз.

Датчик кросс-сезімталдығы, түрлі температурада талшықты лазердің спектрі болып табылады. Қоршаған ортаның температурасы 25 °C-тан 44 °C-қа дейін артады талшық лазерлі датчиктің сәулелену толқын ұзындығы 1530.19 нм-тен 1530.64 нм-ге дейін ауысады және шығыс қуаты -36,64 dBm-ден -37,12 dBm дейін төмендейді. Төмен температура кросс сезгіштік -0,025 дБ/°C және 0,024nm/°C ретінде алынады. Төмен температура кросс сезімталдығы ФП қуысының төменгі жылу кеңеюінен пайда болды.



4.12-сурет. (a) датчиктің уақыт бойынша сезімталдық жауабы. (b) бөлменің салыстырмалы ылғалдылығы 25% кезінде өлшенген температура датчиктің температура бойынша сезгіштігі, бұл графикте қоршаған ортаның температурасы 25 °C пен 44 °C аралығында өзгерген.

Лазерлік датчиктер үшін шығыс параметрінің тұрақтылығы олардың қосымшаларын шектеуде маңызды болып табылады [14]. Датчиктің тұрақтылығын талдау үшін толқын ұзындығы мен шығу қуаты қоршаған ортаны салыстырмалы ылғалдылығы 65% және 95% деңгейінде белгілеу арқылы 180 минут ішінде өлшейді. Оптикалық талшықты лазердің шығу спектрі тиісінше 4.13(a) және 4.13(b)-суретте көрсетілген. Толқын ұзындығы мен қуат тұрақтылығы 4.13(c)-суретте талданады. Толқын ұзындығы мен қуат ауытқуының стандартты тиісінше 65% салыстырмалы ылғалдылық кезінде 0.101 нм және 0.129 dBm болған, ал стандартты ауытқулар 95% салыстырмалы ылғалдылық кезінде тиісінше 0.046 нм және 0.137 dBm құрайды. Нәтижелер датчиктің жақсы тұрақтылыққа ие екендігін көрсетеді. Датчикте процесс жақсы қайталанатындығын көрсетеді, ылғалдылыққа сезімталдығы мен нақты ауытқуы шамасы $\pm 2\%$ -дан да аз.



(a) 65% салыстырмалы ылғалдылық және (b) 95% салыстырмалы ылғалдылық тиісінше 180 минут ішінде өлшенеді және (c) толқын ұзындығы мен қуат тұрақтылығы

4.13-сурет. Оптикалық талшықты лазерлік датчиктің ылғалдылыққа байланысты шығыс спектрі қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығын белгілеу арқылы

Жоғарыда көрсетілген нәтижелерге сай талшықты лазердің салыстырмалы ылғалдыққа жауаптарын алғаннан кейін температура деформациясын сезімтал Брэг торларынан кері шағылған толқын ұзындықтарын анықтау арқылы температураның өзгерісін қадағалай аламыз.

4.4 Температураға байланысты талдаулар нәтижесі

Тұрақты Bragg толқын ұзындығы үшін, 4.1-кесте температура әсер еткен кезде қажетті деформации мәндерін береді.

4.1-кесте. Оптикалық талшықтың әртүрлі температурада қажетті деформациясы

Температура, C ⁰	Деформация ξ
-50	8.75×10^{-4}
-30	6.2×10^{-4}
-10	3.75×10^{-4}
0	2.9×10^{-4}
25	0
60	-3.75×10^{-4}
80	-6×10^{-4}
110	-0.001

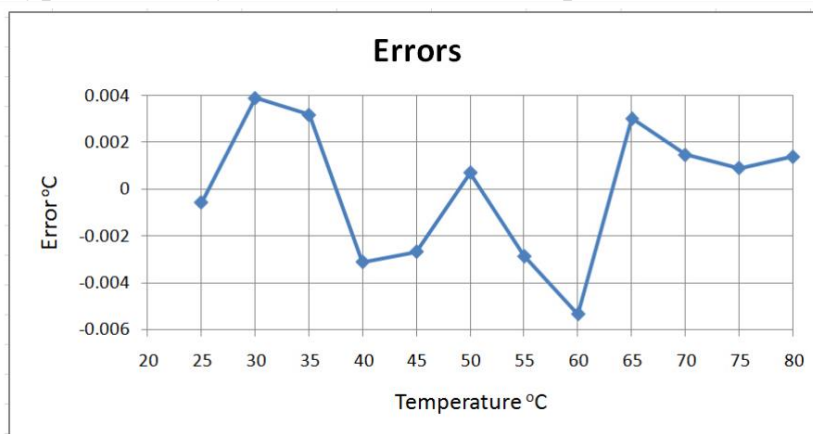
Сандық нәтижелерді талдау, алдағы тәжірибелі жұмыста көрсетілген кейбір сандық мәндерден датчиктің өлшеу диапазонын анықтауға болады. 3.1-кестеде көрсетілген берілген мәндерге сүйене отырып 3.1-кестедегі мәндерін алмастырғаннан кейін, 1550 нм толқын ұзындығының диапазонында тордың температураға сезімталдығын анықтау:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 14.18 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

4.3-кесте. Калибрлеу параметрлері

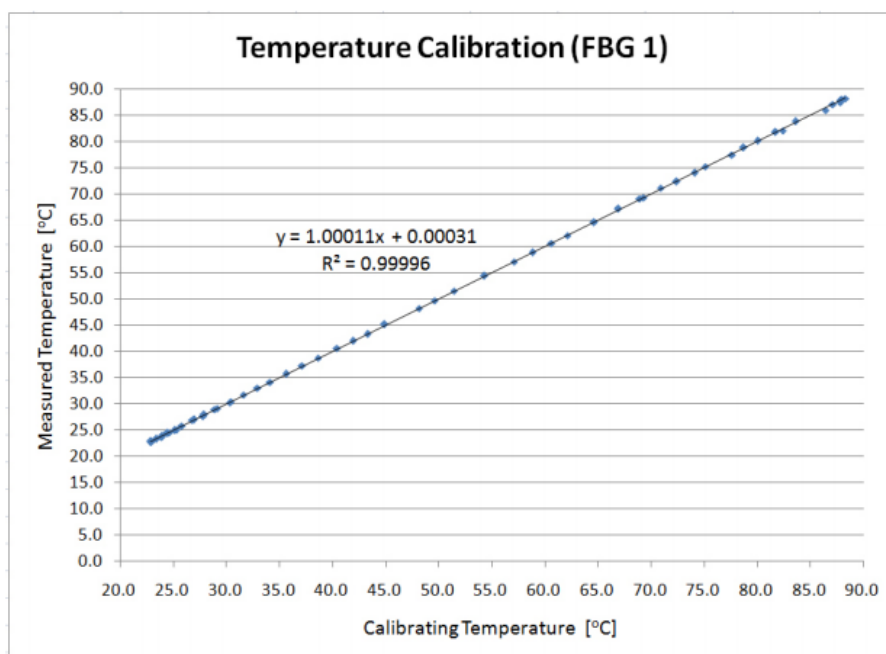
ТБТ	Теориялық сезімталдығы $\text{pm}/^\circ\text{C}$	Нақты өлшенген сезімталдылық $\text{pm}/^\circ\text{C}$	Корреляция коэффициенті R^2	Орташа-квадраттық ауытқу (бөлме температурасы)	Максимум қалдық қате ($^\circ\text{C}$)
1	14.05	12.31	0.99982	0.00311	0.003
2	14.10	12.71	0.99981	0.00328	0.005
3	14.14	12.95	0.99982	0.00327	0.005
4	14.19	12.99	0.99993	0.00320	0.006
5	14.23	13.10	0.99978	0.00363	0.007

Төменде суретте ТБТ үшін қателерді талдау көрсетіледі. Максималды оң қателік 30°C температурада шамамен $0,004^\circ\text{C}$ болды. Басқа сенсорлар үшін температураны өлшеу қателігі $\pm 0,007^\circ\text{C}$ аралығында болды.



4.14-сурет. Температураны өлшейтін ТБТ қателіктерін талдау

Барлық корреляция коэффициенттері бірлікке өте жақын және қателер 1°C тан азырақ. Бұл қателіктер тексеру жүйесінде анықталмағанымен (± 1 сағат) пайдаланылған кезде байқалады. ТБТ-нің орташа сезімталдықты 13°C -қа дейін пайдалану арқылы (4.3-кестені қараңыз), қателік кезінде сағат 13°C -де температураның белгісіздігі шамамен $0,08^\circ\text{C}$ шамасын білдіреді, бұл термометрдің қателігін азайтады.



4.15-сурет. Температуралық калибрлеу нәтижелері

4.1-кестеде 3-теңдеуде болжанғандай теориялық сезімталдықтардың калибрлеу экспериментінен алынған айырмашылығы бар екенін ескертеміз. Сондай-ақ, 2.1-теңдеудегі λ_B функциясын n_{eff} функциясы ретінде көрсетеді, ақшыл талшықтың ядросы мен толқын ұзындығы 1500μм сәулелендірілген ядро арасындағы орташа сыну көрсеткіші. Сәуленің шыны талшықтың сыну көрсеткішін өзгертеді және әрбір ТБТ-ы әртүрлі түрде η мәндерін өзгертеді. Бұл жоғарыда анықталған сәл шашыраңқы сезімталдыққа әкеледі. Бұл нәтиже ТБТ-мен сәулеленудің жоғарылауы арқылы ТБТ-ның температуралық жауаптылығын өзгерту әдісін көрсетті [5]. 4.2-кестедегі деректер бойынша әрбір ТБТ үшін толқын ұзындығы мен температураның арасындағы байланысты есептеу мүмкіндігін алуға болады. Температурадағы үшінші ондық таңбаға бір-біріне сәйкес келетін дәлдік және $R^2=0.99996$ корреляция коэффициенті, температураны өлшеу үшін ТБТ сенсорларының өте жақсы сызықтығын және дәлдігін көрсететін.

Салыстрмалы ылғалдылыққа байланысты нәтижені талдау ФПИ түрлі ылғалдылықты сезіну үшін басқарылатын экологиялық камераға (Doaho Shanghai Co., LTD, модель DHTHM-27-0-P-SD) орналастырылған. Камераның рұқсаты етілген ылғалдылығы 2%, әдеттегі СЫ 20% ~ 98% диапазонында құрайды. Қоршаған ортаның ылғалдылығы өзгерген кезде талшықты лазердің шығу спектрі 4.9(a)-суретте көрсетілгендей өлшенеді Нәтиже 4.10-суретте сипатталғандай, талшықты сақина лазерінің шығу қуаты -36.78 dBm-ден -22.61 dBm дейін артады, себебі қоршаған ортаның ылғалдылығы 25% -дан 95% -ға дейін өзгереді. Салыстрмалы ылғалдылық 5% бойынша өзгергенде. Тиісінше сенсордың сигналдың шуылға қатынасы 30 dB-ден 45 dB-ға дейін. Өткізу қабілеті 3-дБ 0,05 нм кем болғанда. Қоршаған ортаның ылғалдылығы мен

салыстырмалы шығу қуаты арасындағы реакция 4.10-суретте көрсетілген онда шығыс қуаты 25% салыстырмалы ылғалдылық анықтама ретінде белгілеген. Ылғалдылық сезімталдығы 0.202 dB/% СЫ деп өлшенеді. R-квадраты (R^2) сызықтық форма 0,99 дейін жетті. ал 0,12-дегі квадраттардың төменгі қалдық шамасы (RSS) алынды. Бұл сенсордың жақсы сызықты екенін көрсетеді. Теңдеу (8) ұсынылған сенсордың ылғалдылық реакциясы сызықты екенін көрсетеді. Қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығы 20% -дан 80% -ға дейін өзгеретіндіктен [34], Agarose сыну индексі 1,45-ден 1,48-ге дейін өлшенеді. Біздің тәжірибемізде сенсордың желілік сынуы бұл қысқа сыну көрсеткішінің диапазонында сенсордың шамамен сызықтық жауап болғандығымен түсіндіріледі. Датчиктің толқын ұзындығының ауытқуы 4(b) -суреттегі -та талданады. Нәтижесінде толқын ұзындығының максималды ауытқуы 0,36 нм нен аз екенін көрсетті. Шағын толқын ұзындығы ауытқуы сенсордың ені 3 dB дейінгі ені бар кеңістіктік толқын ұзындығын бөлетін мультиплексорлық сенсорлық желіні құруға мүмкіндік береді.

4.3-кесте. Оптикалық талшық негізінде температурамен ылғалдылықты өлшейтін датчиктің сипаттамасы

	Полимерге негізделген бір модульды, 1500нм нөлдік дисперсиялыдағы оптикалық талшықты датчик				
	Анықталу әдістері	Сезімтал материал	Өлшеу аралығы	Сезімталдық Ажыратымдылық	Жауап беру уақыты
Температура	ТБТШ		-50 ~130 C ⁰	$0.117 \times 10^{-4} / C^0$	
Салыстырмалы ылғалдылық	ФПИ	Агрозалық гель (CdS/PANI)	20% ~98%	0.202 dB /% СЫ	Ж;72мс Қ;357мс

Төртінші бөлім бойынша қорытынды

Төртінші бөлімде температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчике тәжірибе жасалып нақты нәтижелер алынды. Тәжірибе барысында ФПИ әдісіне негізделген салыстырмалық ылғалдылық 20%-98% диапазонын құрады. Қоршаған ортаның ылғалдылығы өзгерген кезде талшықты лазердің шығу спектрі -36.78 dBm-ден -22.61 dBm дейін артады. Салыстырмалы ылғалдылық 10% бойынша өзгергенде. Тиісінше сенсордың сигналдың шуылға қатынасы 30 dB-ден 45 dB-ға дейін артқан және өткізу қабілеті 3-dB, ол 0,05 нкм кем болған. Ылғалдылық сезімталдығы 0.202 dB/%, температура сезімталдығы $0.117 \times 10^{-4} / C^0$ деп өлшенеді. Тәжірибеде датчиктің жақсы сызықты екенін көрсетілген. Агрозаның сыну индексі 1,45-ден 1,48-ге дейін. Тәжірибе нәтижесі сенсордың ылғалдылыққа сызықты жауап беретінін көрсетті. Температураға байланысты

талшықты Брэгг торларының t өзгерісі $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ дан $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ сәйкесінше ξ деформация 8.75×10^{-4} м ден - 0.00122 дейін өзгереді.

Датчиктің болжамды жауап беру уақыты 72 мс тез болған. Қалпына келтіру уақыты шамамен 357 мс.

Датчиктің тұрақтылығын талдау үшін толқын ұзындығы мен шығу қуаты қоршаған ортаны салыстырмалы ылғалдылығы 65% және 95% деңгейінде белгілеу арқылы 180 минут ішінде өлшейді.

Толқын ұзындығы мен қуат ауытқуының стандартты тиісінше 65% салыстырмалы ылғалдылық кезінде 0.101 нм және 0.129 дБм болған, ал стандартты ауытқулар 95% салыстырмалы ылғалдылық кезінде тиісінше 0.046 нм және 0.137 дБм құрайды. Нәтижелер датчиктің жақсы тұрақтылыққа ие екендігін көрсетеді. Датчикте процесс жақсы қайталанатындығын көрсетеді, ылғалдылыққа сезімталдығы мен нақты ауытқуы шамасы $\pm 2\%$ -данда аз, ал температураға байланысты $\pm 1^{\circ}\text{C}$ шамасында боғаны анықталған.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыстың бірінші бөлімінде температура мен ылғалдылықты анықтаудың жалпы әдістері мен өлшеу датчиктері қарастрылды. Температураны анықтайтын кедергілі термометр, Кварц резонаторлары негізіндегі температура датчиктер, интегралды датчиктері, Сыйымдылықты термометрлер, температуралық және ылғалдылық датчиктерінің сезімталдық анықтаулары, ылғалдылықты анықтауға арналған датчик түрлері қарастырылды, сондай ақ, металл оксиды негізіндегі жартылай өткізгішті температурамен ылғалдылықты анықтауға арналған датчиктің схемасы қаралды, талдаулар жасалды.

Екінші бөлімде оптикалық талшықты лазерлік сәулеленумен талшықты Брэгг торларының көмегімен қоршаған ортаның қатаң зондауда өндірісі саласындағы соңғы жасалған жұмыстар мен қолданылулар, сондай-ақ лазер мен материалдардың арасындағы өзара фемтосекундтық әрекеттесу теориясының кейбір алғышарттары қарастырылды.

Үшінші бөлімде температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшеуге арналған оптикалық талшықты датчикке талдаулар жасалынды. Фабри -Перо интерференциясына негізделген оптикалық талшықтың сезімталдылығын Джордж Айдің ішкі резонансты күшейту әдісі негізіндегі талдаулар қарастырылды. Оптикалық талшықты Брэгг торларының (ОТБТ) белгілі бір спектрлік кері шағылыстыру фемтосекундтық эффектсіне негізделіп температураға байланысты талшықтың деформациялық өзгерісі арқылы температураны анықтауға болатындығы тұжырымдалды. Осы талдаулар негізінде температурамен ылғалдылықты бірге өлшейтін оптикалық талшықты датчиктің жұмысы ұсынылды.

Төртінші бөлімде температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчикке тәжірибе жасалып нақты нәтижелер алынды. Тәжірибе барысында ФПИ әдісіне негізделген салыстырмалық ылғалдылық 20%-98% диапазонын құрады. Қоршаған ортаның ылғалдылығы өзгерген кезде талшықты лазердің шығу спектрі -36.78 dBm -ден -22.61 dBm дейін артады. Салыстырмалы ылғалдылық 10% бойынша өзгергенде. Тиісінше сенсордың сигналдың шуылға қатынасы 30 дБ-ден 45 дБ-ға дейін артқан және өткізу қабілеті 3- dB, ол 0,05 нкм кем болған. Ылғалдылық сезімталдығы 0.202 dB/%, температура сезімталдығы 0.117×10^{-4} /C0 деп өлшенеді. Тәжірибеде датчиктің жақсы сызықты екенін көрсетілген. Агрозаның сыну индексі 1,45-ден 1,48-ге дейін. Тәжірибе нәтижесі сенсордың ылғалдылыққа сызықты жауап беретінін көрсетті. Температураға байланысты талшықты Брэгг торларының t өзгерісі -50 C0 дан 130 C0 сәикесінше ξ деформация 8.75×10^{-4} м ден - 0.00122 дейін өзгереді.

Датчиктің болжамды жауап беру уақыты 72 мс тез болған. Қалпына келтіру уақыты шамамен 357 мс.

Датчиктің тұрақтылығын талдау үшін толқын ұзындығы мен шығу қуаты қоршаған ортаны салыстырмалы ылғалдылығы 65% және 95% деңгейінде белгілеу арқылы 180 минут ішінде өлшейді.

Толқын ұзындығы мен қуат ауытқуының стандартты тиісінше 65% салыстырмалы ылғалдылық кезінде 0.101 нм және 0.129 dBm болған, ал стандартты ауытқулар 95% салыстырмалы ылғалдылық кезінде тиісінше 0.046 нм және 0.137 dBm құрайды. Нәтижелер датчиктің жақсы тұрақтылыққа ие екендігін көрсетеді. Датчикте процесс жақсы қайталанатындығын көрсетеді, ылғалдылыққа сезімталдығы мен нақты ауытқуы шамасы $\pm 2\%$ -данда аз, ал температураға байланысты $\pm 1\text{C}0$ шамасында боғаны анықталған.

Диссертацияда орындалған нақты жұмыстар. Оптикалық талшықты лазерінің ішкі сезімталдығына негізделген электр-магнитке қарсылықты қасиетке ие, температура мен ылғалдылықты бірі уақытта анықтайтын датчиктің жұмысы талданып құрылымы қарастырылды.

Зерттеу барысында төмендегідей нақты мәселелер шешілді:

1. Оптикалық талшықты лазерге негізделген қоршаған ортаны зондтауда қолданылған ғылыми жұмыстың тақырыбына сәйкес келетін негізгі ғылыми жұмыстарға шолу жасалынды;

2. Оптикалық бір бағытты режимдегі температураға байланысты функционалды өзгеру коэффициенті бар талшыққа орналастырылған Брэгг торларынан кері шағылатын фемтосекундтық лазердің фазалық ығысуына талдау жасау арқылы температура өзгерісін қадағалауға болатыны және ФПИ интерферометріне негізделген ылғалдылық сезімтал агроза гелінің әсерінен резонанстық күшейту нәтижесінде ылғалдылық анықтау әдістері қарастырылып математикалық модельдері құрылып тәжірибе жүзінде тексерулер жүргізу.

Қорғауға ұсынылатын жаңа тұжырымдар:

Оптикалық бір бағытты режимдегі талшық және оған Брэгг торлары орналастырылған, оның көлденең қимасы жарты-рефлексиялық шынымен жабылып ол ФПИ-ның вакуумдық қуысына жалғасады. ФПИ вакуумдық қуысында кремний диафрагмасына құйылып дайындалған ылғалдылыққа сезімтал агроза гелі бар. Ұзындығы h (жарықтың ең жоғары толқын ұзындығы $\lambda = 1500 \text{ nm}$ деп берілген, олмынаған тең $\lambda_m = \frac{2h}{m}$) деп анықталған қуыстың алдыңғы және артқы екі шағылыстратын беті бар, екіншісі ылғалдылыққа сезімтал агроза гелі. Бұл екі беттен шағылысқан жарық арасында интерференция өзгерісі арқылы ылғалдылық өзгерісін анықтау.

4. Оптикалық бір бағытты режимдегі температураға байланысты функционалды өзгертін талшыққа орналастырылған Брэгг торларынан кері шағылатын фемтосекундтық лазердің фазалық ығысуымен температураны анықтау әдісі.

5. Жоғарыдағы талдаулар негізінде жасалған тәжірибелік нәтижелерді негізге ала отырып температура мен ылғалдылық бір уақытта өлшейтін микроқұрылымды, ішкі электромагниттік әсерлерге иммунитетті датчиктің жұмысын ұсыну.

6. Тәжірибелік және нақты берілген мәндерге сүйене отырып температура мен ылғалдылықты өлшейтін датчиктің өлшеу диапазонын анықтау.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы. Диссертациялық жұмыс нәтижелерінің ғылыми құндылығы – температура мен ылғалдылық бір уақытта өлшейтін оптикалық талшықтың ішкі сезімталдылығына негізделген микроқұрылымды электромагниттік әсерлерге иммунитетті датчиктің жұмысы.

Зерттеу тәжірибелік құндылығы ылғалға сезімтал агрозалық гель негізінде ПФИ-ның шағылыстру резонанысынң ылғалдылыққа байланысты сызықты артуы және Брэгг торларының кері бағыттағы шағылыструы фемтосекундтық лазердің фазалық ығысу арқылы температураны анықтаудағы сенімділігі, диссертацияда алынған нәтижелерді халқаралық басылымдарға беруге негізделеді.

Теориялық маңыздылығы. Фемтосекундты лазерлі ТБТ температураға байланысты ерекше қасиеттері, олар әртүрлі әдістермен өндіріледі, сонымен қатар, оларды қатаң жағдайларда әртүрлі зонттық қосымшалар үшін қолдануға болатындығы, соңғы жылдарда қолданысқа енген жұмыстармен ғылыми басылымдардағы материалдар қарастырылды. Сондай ақ, ылғалдылыққа сезімтал Фабри-Перот интерференциясының спектрлік резонанысты талдаулары математик және астроном Джордж Бидделл Айидің талдауларына сүйене отырып анықталды.

Практикалық қолдану. Ылғалды ортада жұмыс істеуге арналған ағзаға имплантацияланған электронды құрылғылар ағзаға кірген кезде интегралды схеманың белсенді аймағында ылғалдылық нәтижесіненен конденсация, коррозия пайда болады. Бұл датчиктің эффективтілігін жоғалтып құрылғының жұмыс істемей қалуына алып келеді. Микрокабельді функционалдың құрғақ екендігін тексерудің ең тікелей жолы, оның ішкі салыстырмалы ылғалдылығын өлшеуге арналған датчикті пайдалану. Температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчиктер бар алайда ол кеңейтілген өңдеу қадамдарын қажет етеді. Әрі датчик үшін қажетті аймақ өте үлкен (4~2мм). Мысалы, микроаппаратпен имплантацияланатын стимуляторларды кішкентай датчикті қамтамасыз ету керек. Бұл температурамен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчик құрылымы жеңілдететін және чиптің қажетті аймағын едәуір азайтылған салыстрмалы ылғалдылық пен температураны бір уақытта анықтайтын датчикті қарастыруды талап етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 S. Park, J. Kang, J. Park, “One-bodied humidity and temperature sensor having advanced linearity at low and high relative humidity range” *Sensors and Actuators B* 76 322–326 (2001).
- 2 Clemens Eder, Virgilio Valente, Nick Donaldson, Andreas Demosthenous, “A CMOS Smart Temperature and Humidity Sensor with Combined Readout” 14, 17192-17211; doi:10.3390/s140917192 *Sensors* 2014.
- 3 Carlo Macaroni, Michele. A, Caponero, Rosaria D, Amato, Daniela Lo Presti, Emiliano Schena. “Fiber Bragg Grating Measuring System for Simultaneous Monitoring of Temperature and Humidity in Mechanical Ventilation” *Sensors* doi: 10.3390/s170407492 April 2017.
- 4 Williams.R, Rankin.N, Smith.T, Galler.D, Seakins.P, “Relationship between the humidity and temperature of inspired gas and the function of the airway mucosa”. *Crit. Care Med.* 1996, 24, 1920–1929.
- 5 N. Parvatikar, S. Jain, S. Khasim, M. Revansiddappa, S.V. Bhoraskar, M.V.N.Ambika Prasad, Electrical and humidity sensing properties of polyaniline/WO₃ composites, *Sens. Actuators B: Chem.* 114 (2006) 599–603.
- 6 Q. Lin, Y. Li, M. Yang, Polyaniline nanofiber humidity sensor prepared by electrospinning, *Sens. Actuators B: Chem.* 161 (2012) 967–972
- 7 J.W. Han, B. Kim, J. Li, M. Meyyappan, Carbon nanotube based humidity sensor on cellulose paper, *J. Phys. Chem. C* 116 (2012) 22094–22097
- 8 J. Wang, G. Song, Mechanism analysis of BaTiO₃ and polymer QAR composite humidity sensor, *Thin Solid Films* 515 (2007) 8776–8779
- 9 A. Sun, L. Huang, Y. Li, Study on humidity sensing property based on TiO₂, porous film and polystyrene sulfonic sodium, *Sens. Actuators B: Chem.* 139(2009) 543–547.
- 10 C.D. Feng, S.L. Sun, H. Wang, C.U. Segre, J.R. Stetter, Humidity sensing properties of Nation and sol-gel derived SiO₂/Nafion composite thin films, *Sens. Actuators B: Chem.* 40 (1997) 217–222.
- 11 X.Z. Li, S.R. Liu, Y. Guo, Polyaniline-intercalated layered double hydroxides: synthesis and properties for humidity sensing, *RSC Adv.* 6 (2016) 63099–63106.
- 12 N. Parvatikar, S. Jain, S. Khasim, M. Revansiddappa, S.V. Bhoraskar, M.V.N.Ambika Prasad, Electrical and humidity sensing properties of polyaniline/WO₃ composites, *Sens. Actuators B: Chem.* 114 (2006) 599–603.
- 13 Q. Lin, Y. Li, M. Yang, Polyaniline nanofiber humidity sensor prepared by electrospinning, *Sens. Actuators B: Chem.* 161 (2012) 967–972.

- 14 N. Parvatikar, S. Jain, C.M. Kanamadi, B.K. Chougule, S.V. Bhoraskar, M.V.N.Ambika Prasad, Humidity sensing and electrical properties of polyaniline/cobalt oxide composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 103 (2) (2010) 653–658.
- 15 W. C. Wong, C. C. Chan, L. H. Chen, T. Li, K. X. Lee, and K. C. Leong, “Polyvinyl alcohol coated photonic crystal optical fiber sensor for humidity measurement,” *Sens. Actuator B*, vol. 174, pp. 563-569, July 2012.
- 16 C. Huang, W. Xie, M. Yang, J. Dai, and B. Zhang, “Optical Fiber Fabry–Perot Humidity Sensor Based on Porous Al₂O₃ Film,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 20, pp. 2127-2130, Oct. 2015.
- 17 J. Mathew, Y. Semenova, and G. Farrell, “Effect of coating thickness on the sensitivity of a humidity sensor based on an Agarose coated photonic crystal fiber interferometer,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 5, pp. 6313-6320, Mar. 2013.
- 18 C. Zhao, Q. Yuan, L. Fang, X. Gan, and J. Zhao, “High-performance humidity sensor based on a polyvinyl alcohol-coated photonic crystal cavity,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 23, pp. 5515-5518, Dec. 2016.
- 19 Lagakos, N., Bucaro, J. and Jarzynski, J. Temperature-induced optical phase shifts in fibers. *Appl. Opt.*, 1981, 20, 2305–2308.
- 20 W. Zhang, D. J. Webb, and G.-D. Peng, “Investigation into Time Response of Polymer Fiber Bragg Grating Based Humidity Sensors,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 8, pp. 1090–1096, Apr. 2012.
- 21 X. Chen, W. Zhang, C. Liu, Y. Hong, and D. J. Webb, “Enhancing the humidity response time of polymer optical fiber Bragg grating by using laser micromachining,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 20, pp. 25942-25949, Oct. 2015.
- 22 G. Woyessa, K. Nielsen, A. Stefani, C. Markos, and O. Bang, “Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 2, pp. 1206-1213, Jan. 2016.
- 23 C. Massaroni, M. A. Caponero, R. D’Amato, D. L. Presti, and E. Schena, “Fiber Bragg Grating Measuring System for Simultaneous Monitoring of Temperature and Humidity in Mechanical Ventilation,” *Sensors*, vol. 17, no. 4, pp. 749, Apr. 2017.
- 24 W. Zang, P. Li, Y. Fu, L. Xing, X. Xue, Hydrothermal synthesis of Co–Zn Z. Liu, Z. Tan, B. Yin, Y. Bai, and S. Jian, “Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 5, pp. 5037-5042, Mar. 2014.
- 25 X. Bai, D. Fan, S. Wang, S. Pu, and X. Zeng, “Strain sensor based on fiber ring cavity laser with photonic crystal fiber in-line Mach–Zehnder interferometer,” *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 4, pp. 6801608, Aug. 2014.
- 26 J. Shi, Y. Wang, D. Xu, H. Zhang, G. Su, L. Duan, C. Yan, D. Yan, S. Fu, and J. Yao, “Temperature Sensor Based on Fiber Ring Laser With Sagnac Loop,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 28, no. 7, pp. 794–797, Apr. 2016.

- 27 R.J. Wu, Y.L. Sun, C.C. Lin, H.W. Chen, M. Chavali, Composite of TiO₂, nanowires and Nafion as humidity sensor material, *Sens. Actuators B: Chem.* 115 (2006) 198–204.
- 28 W. Zang, P. Li, Y. Fu, L. Xing, X. Xue, Hydrothermal synthesis of Co–ZnO nanowire array and its application as piezo-driven self-powered humidity sensor with high sensitivity and repeatability, *RSC Adv.* 5 (2015) 84343–84349.
- 29 S. Jain, S. Chakane, A.B. Samui, V.N. Krishnamurthy, S.V. Bhoraskar, Humidity sensing with weak acid-doped polyaniline and its composites, *Sens. Actuators B: Chem.* 96 (2003) 124–129.
- 30 J.W. Han, B. Kim, J. Li, M. Meyyappan, Carbon nanotube based humidity sensor on cellulose paper, *J. Phys. Chem. C* 116 (2012) 22094–22097.
- 31 J. Wang, G. Song, Mechanism analysis of BaTiO₃ and polymer QAR composite humidity sensor, *Thin Solid Films* 515 (2007) 8776–8779.
- 32 A. Sun, L. Huang, Y. Li, Study on humidity sensing property based on TiO₂, porous film and polystyrene sulfonic sodium, *Sens. Actuators B: Chem.* 139 (2009) 543–547.
- 33 C.D. Feng, S.L. Sun, H. Wang, C.U. Segre, J.R. Stetter, Humidity sensing properties of Nafion and sol-gel derived SiO₂/Nafion composite thin films, *Sens. Actuators B: Chem.* 40 (1997) 217–222.
- 34 W. Shi, S. He, M. Wei, D.G. Evans, X. Duan, Optical pH sensor with rapid response based on a fluorescein-intercalated layered double hydroxide, *Adv. Funct. Mater.* 20 (2010) 3856–3863.
- 35 D. Yan, J. Lu, J. Ma, M. Wei, S. Qin, L. Chen, D. Evans, Thin film of coumarin-3-carboxylate and surfactant co-intercalated layered double hydroxide with polarized photoluminescence: a joint experimental and molecular dynamics study, *J. Mater. Chem.* 20 (2010) 5016–5024.
- 36 Y. Wang, D. Zhang, Q. Bao, J. Wu, Y. Wan, Controlled drug release characteristics and enhanced antibacterial effect of graphene oxide/drug intercalated layered double hydroxide hybrid films, *J. Mater. Chem.* 22 (2012) 23106–23113.
- 37 X. Xu, R.J. Lu, X.F. Zhao, S.L. Xu, X.D. Lei, F.Z. Zhang, D.G. Evans, Fabrication and photocatalytic performance of a Zn_xCd_{1-x}S solid solution prepared by sulfuration of a single layered double hydroxide precursor, *Appl. Catal. B* 102 (2011) 147–156.
- 38 Основы температурных измерений/Гордов А.Н. и др. - М.: Энергоатомиздат, 1992.
- 39 Измерения влажности/Берлинер М.А. - М.: Энергия, 2000
- 40 Подлепецкий В.И. и др. Микроэлектронные датчики влажности//Зарубежная электронная техника. - 2008. - № 2.

- 41 4. Ahmad, Z.; Zafar, Q.; Sulaiman, K.; Akram, R.; Karimov, K.S. A humidity sensing organic-inorganic composite for environmental monitoring. *Sensors* 2013, 13, 3615–3624.
- 42 5. Futagawa, M.; Iwasaki, T.; Murata, H.; Ishida, M.; Sawada, K. A miniature integrated multimodal sensor for measuring pH, EC and temperature for precision agriculture. *Sensors* 2012, 12,
- 43 Liu, X.; Demosthenous, A.; Vanhoostenberghe, A.; Jiang, D.; Donaldson, N. Active Books: The design of an implantable stimulator that minimizes cable count using integrated circuits very close to electrodes. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2012, 6, 216–227
- 44 International Standard, ISO 14708-3 Implants for Surgery-Active Implantable Medical Devices - Part 3: Implantable Neurostimulators. 2008. Available online: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=41944 (accessed on 9 September 2014).
- 45 Chen, C.C.; Lin, S.H. A time-domain CMOS oscillator-based thermostat with digital set-point programming. *Sensors* 2013, 13, 1679–1691.
- 46 Ituero, P.; López-Vallejo, M.; López-Barrio, C. A 0.0016 mm² 0.64 nJ leakage-based CMOS temperature sensor. *Sensors* 2013, 13, 12648–12662.
- 47 Saeidi, N.; Schuettler, M.; Demosthenous, A.; Donaldson, N. Technology for integrated circuit micro-packages for neural interfaces, based on gold–silicon wafer bonding. *J. Micromech. Microeng.* 2013, 23, doi:10.1088/0960-1317/23/7/075021.
- 48 Cirmirakis, D.; Demosthenous, A.; Saeidi, N.; Donaldson, N. Humidity-to-frequency sensor in CMOS technology with wireless readout. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 900–908.
- 49 Eder, C.; Valente, V.; Donaldson, N.; Demosthenous, A. A 1-Wire® communication interface between a control hub and locally powered epidural stimulators. In *Proceedings of 2013 Biomedical Circuits and Systems Conference*, Rotterdam, The Netherlands, 31 October–2 November 2013; pp. 214–217.
- 50 Saeidi, N.; Strutwolf, J.; Marechal, A.; Demosthenous, A.; Donaldson, N. A capacitive humidity sensor suitable for CMOS integration. *IEEE Sens. J.* 2013, 13, 4487–4495.
- 51 Kersey, A.D.; Davis, M.A.; Patrick, H.J.; LeBlanc, M.; Koo, K.P.; Askins, C.G.; Putnam, M.A.; Friebele, E.J. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.* 1997, 15, 1442–1463. [CrossRef]
- 52 Hill, K.O.; Meltz, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *J. Lightwave Technol.* 1997, 15, 1263–1276.
- 53 Poumellec, B.; Niay, P.; Douay, M.; Bayon, J.F. The UV-induced refractive index grating in Ge:SiO₂ preforms: Additional CW experiments and the macroscopic origin of the change in index. *J. Phys. D Appl. Phys.* 1996, 29, 1842–1856

- 54 Erdogan, T.; Mizrah, V.; Lemaire, P.J.; Monroe, D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings. *J. Appl. Phys.* 1994, 76, 73–80.
- 55 Mihailov, S.J.; Grobnc, D.; Smelser, C.W.; Lu, P.; Walker, R.B.; Ding, H. Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phasemask. *Opt. Mater. Express* 2011, 1, 754–765
- 56 Zagorulko, K.A.; Kryukov, P.G.; Larionov, Y.V.; Rybaltovsky, A.A.; Dianov, E.M.; Chekalin, S.V.; Matveets, Y.A.; Kompanets, V.O. Fabrication of fiber Bragg gratings with 267 nm femtosecond radiation. *Opt. Express* 2004, 12, 5996–6001.
- 57 Bernier, M.; Vallée, R.; Morasse, B.; Desrosiers, C.; Saliminia, A.; Sheng, Y. Ytterbium fiber laser based on first-order fiber Bragg gratings written with 400 nm femtosecond pulses and a phase-mask. *Opt. Express* 2009, 17, 18887–18893.
- 58 "Optical Fiber". www.thefoa.org. The Fiber Optic Association. Retrieved 17 April 2015.
- 59 Measuring strain on an aircraft in flight" (pdf).[dead link]
- 60 Strong, Andrew P.; Lees, Gareth; Hartog, Arthur H.; Twohig, Richard; Kader, Kamal; Hilton, Graeme (December 2009). "An Integrated System for Pipeline Condition Monitoring". doi:10.2523/IPTC-13661-MS.
- 61 Roth, Wolf-Dieter (2005-04-18). "Der Glasfaser-Schallwandler". Heise Online (in German). Retrieved 2008-07-04.
- 62 "Case Study: Can You Hear Me Now?". Rt Image. Valley Forge Publishing. pp. 30–31. Archived from the original on 2011-07-25. Retrieved 2010-03-11
- 63 Sensornet. "Upstream oil & gas case study". Archived from the original (pdf) on 2011-10-05. Retrieved 2008-12-19.
- 64 Schlumberger. "Wellwatcher DTS Fibre Optic Monitoring product sheet". Archived from the original (pdf) on 2011-09-28. Retrieved 2010-09-22.
- 65 Optical sensors for ITER magnets". (<https://smartec.ch/en/products/?filters=fiber-optic-sensing>)
- 66 Ghosh, S.K.; Sarkar, S.K.; Chakraborty, S.; Dan, S. (2006). "High frequency electric field effect on plane of polarization in single mode optical fiber". *Proceedings, Photonics 2006*.
- 67 Ghosh, S.K.; Sarkar, S.K.; Chakraborty, S. (2006). "A proposal for single mode fiber optic watt measurement scheme". *Journal of Optics (Calcutta)*. Optical Society of India. 35 (2): 118–124. ISSN 0972-8821.
- 68 Zeller, M.; Scheer, G. (2008). "Add Trip Security to Arc-Flash Detection for Safety and Reliability, Proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA
- 69 Technologies, Mechanics and Optics. 15 (5): 809–816. Jump up ^ Roland, U.; et al. (2003). "A New Fiber Optical Thermometer and Its Application for Process Control

- in Strong Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields" (PDF). *Sensor Letters*. 1: 93–8.
- 70 Yin, Ming-jie; Gu, Bobo; An, Quan-Fu; Yang, Chengbin; Guan, Yong Liang; Yong, Ken-Tye (1 December 2018). "Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications". *Coordination Chemistry Reviews*. 376: 348.
- 71 Mihailov, S.J.; Grobnc, D.; Smelser, C.W.; Lu, P.; Walker, R.B.; Ding, H. Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phasemask. *Opt. Mater. Express* 2011, 1, 754–765.
- 72 Zagorulko, K.A.; Kryukov, P.G.; Larionov, Y.V.; Rybaltovsky, A.A.; Dianov, E.M.; Chekalin, S.V.; Matveets, Y.A.; Kompanets, V.O. Fabrication of fiber Bragg gratings with 267 nm femtosecond radiation. *Opt. Express* 2004, 12, 5996–6001.
- 73 Bernier, M.; Vallée, R.; Morasse, B.; Desrosiers, C.; Saliminia, A.; Sheng, Y. Ytterbium fiber laser based on first-order fiber Bragg gratings written with 400 nm femtosecond pulses and a phase-mask. *Opt. Express* 2009, 17, 18887–18893.
- 74 Thomas, J.; Voigtlander, C.; Becker, R.G.; Richter, D.; Tunnermann, A.; Nolte, S. Femtosecond pulse written fiber gratings: A new avenue to integrated fiber technology. *Laser Photonics Rev.* 2012, 6, 709–723.
- 75 Mihailov, S.J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors* 2012, 12, 1898–191
- 76 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, 28, 995–997.
- 77 Davis, K.M.; Miura, K.; Sugimoto, N.; Hirao, K. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt. Lett.* 1996, 21, 1729–1731
- 78 Stuart, B.C.; Feit, M.D.; Herman, S.; Rubenchik, A.M.; Shore, B.W.; Perry, M.D. Optical Ablation by high-power short-pulse lasers. *J. Opt. Soc. Am. B* 1996, 13, 459–468
- 79 Schaffer, C.B.; Brodeur, A.; Mazur, E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Meas. Sci. Technol.* 2001, 12, 1784–1794
- 80 Sudrie, L.; Franco, M.; Prade, B.; Mysyrowicz, A. Study of damage in fused silica induced by ultra-short IR laser pulses. *Opt. Commun.* 2001, 191, 333–339
- 81 Sudrie, L.; Franco, M.; Prade, B.; Mysyrowicz, A. Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses. *Opt. Commun.* 1999, 171, 279–284.
- 82 Shimotsuma, Y.; Kazansky, P.G.; Qiu, J.; Hirao, K. Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses. *Phys. Rev. Lett.* 2003, 91, 7405–7508.

- 83 Bricchi, E.; Kazansky, P.G. Extraordinary stability of anisotropic femtosecond direct-written structures embedded in silica glass. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 88
- 84 Taylor, R.; Hnatovsky, C.; Simova, E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass. *Laser Photonics Rev.* 2008, 2, 26–4
- 85 Poumellec, B.; Lancry, M.; Chahid-Erraji, A.; Kazansky, P.G. Modification thresholds in femtosecond laserprocessing of pure silica: Review of dependencies on laser parameters. *Opt. Mater. Express* 2011, 1, 766–782.
- 86 Lancry,M.; Poumellec, B.; Chahid-Erraji, A.; Beresna,M.; Kazansky, P.G. Dependence of the femtosecond laser refractive index change thresholds on the chemical composition of doped-silica glasses. *Opt. Mater. Express* 2011, 1, 711–723.
- 87 Canning, J.; Lancry, M.; Cook, K.; Weickman, A.; Brisset, F.; Poumellec, B. Anatomy of a femtosecond laser processed silica waveguide. *Opt. Mater. Express* 2011, 1, 998–1008
- 88 Chan, J.W.; Huser, T.; Risbud, S.; Krol, D.M. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses. *Opt. Lett.* 2001, 26, 1726–1728.
- 89 Reichman,W.J.; Chan, J.W.; Smelser, C.W.;Mihailov, S.J.; Krol, D.M. Spectroscopic characterization of different femtosecond laser modification regimes in fused silica. *J. Opt. Soc. Am. B* 2007, 24, 1627–1632.
- 90 Smelser, C.W.; Mihailov, S.J.; Grobnc, D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask. *Opt. Express* 2005, 13, 5377–5386
- 91 Zimmermann, F.; Lancry, M.; Plech, A.; Richter, S.; Hari Babu, B.; Poumellec, B.; Tünnermann, A.; Nolte, S. Femtosecond laser written nanostructures in Ge-doped glasses. *Opt. Lett.* 2016, 41, 1161–1164.
- 92 Becker, M.; Bergmann, J.; Brückner, S.; Franke, M.; Lindner, E.; Rothhardt, M.W.; Bartelt, H. Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry. *Opt. Express* 2008, 16, 19169–19178
- 93 Williams, R.J.; Krämer, R.G.; Nolte, S.; Withford, M.J. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique. *Opt. Lett.* 2013, 38, 1918–1920.
- 94 Smelser, C.W.; Grobnc, D.; Mihailov, S.J. Generation of pure two-beam interference grating structures in an optical fiber with a femtosecond infrared source and a phase mask. *Opt. Lett.* 2004, 29, 1730–1732.
- 95 Huang, Z.; Pickrell, G.; Xu, J.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Wang, A. Sapphire temperature sensor coal gasifier field test. *Proc. SPIE* 2004, 5590, 27–36.
- 96 Smelser, C.W.; Mihailov, S.J.; Grobnc, D.; Lu, P.;Walker, R.B.; Ding, H.; Dai, X. Multiple-beam interference patterns in optical fiber generated with ultrafast pulses and a phase mask. *Opt. Lett.* 2004, 29, 1458–1460.

- 97 Li, Y.; Yang, M.; Wang, D.N.; Lu, J.; Sun, T.; Grattan, K.T. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation. *Opt. Express* 2009, 17, 19785–19790.
- 98 Hnatovsky, C.; Grobncic, D.; Coulas, D.; Barnes, M.; Mihailov, S.J. Self-organized nanostructure formation during femtosecond-laser inscription of fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.* 2017, 42, 399–402.
- 99 Walker, R.B.; Ding, H.; Coulas, D.; Grobncic, D.; Lu, P.; Mihailov, S.J.; Duschesne, M.A.; Hughes, R.W.; McCalden, D.J.; Burchat, R.; et al. High temperature monitoring of an oxy-fuel fluidized bed combustor using femtosecond infrared laser written fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE* 2016, 9754.
- 100 Walker, R.B.; Yun, S.; Ding, H.; Charbonneau, M.; Coulas, D.; Ramachandran, N.; Mihailov, S.J. High resolution, fast temperature mapping of a gas turbine combustor simulator with femtosecond infrared laser written fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE* 2017, 10117, 10117–10155.
- 101 Walker, R.B.; Ding, H.; Coulas, D.; Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Duschesne, M.A.; Hughes, R.W.; McCalden, D.J.; Burchat, R. Entrained-flow gasifier and fluidized-bed combustor temperature monitoring using arrays of fs-IR written fiber Bragg gratings. *Proc. SPIE* 2015, 9634.
- 102 Méndez, A.; Morse, T.F. *Specialty Optical Fibers Handbook*; Elsevier Academic Press: San Diego, CA, USA, 2007; p. 284.
- 103 Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Walker, R.B.; Smelser, C.W. Self-packaged Type II femtosecond IR laser induced
- 104 fiber Bragg grating for temperature applications up to 1000 C. *Proc. SPIE* 2011, 775.
- 105 Warren-Smith, S.C.; Nguyen, L.V.; Lang, C.; Ebendorff-Heidepriem, H.; Monro, T.M. Temperature sensing up to 1300 C using suspended-core microstructured optical fibers. *Opt. Express* 2016, 24, 3714–3719.
- 106 Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Ding, H.; Bilodeau, F.; Smelser, C.W. Single and low order mode interrogation of a multimode sapphire fibre Bragg grating sensor with tapered fibres. *Meas. Sci. Technol.* 2006, 17, 980–984.
- 107 Yang, S.; Hu, D.; Wang, A. Point-by-point fabrication and characterization of sapphire fiber Bragg gratings. *Opt. Lett.* 2017, 42, 4219–4222.
- 108 Morana, A.; Girard, S.; Marin, E.; Marcandella, C.; Rizzolo, S.; Perisse, J.; Mace, J.-R.; Taouri, A.; Boukenter, A.; Cannas, M.; et al. Radiation Vulnerability of Fiber Bragg Gratings in Harsh Environments. *J. Lightwave Technol.* 2015, 33, 2646–2651.
- 109 Urbanczyk, W.; Chmielewska, E.; Bock, W.J. Measurements of temperature and strain sensitivities of a two-mode Bragg grating imprinted in a bow-tie fibre. *Meas. Sci. Technol.* 2001, 12, 800–804.

- 110 Frazão, O.; Ferreira, L.A.; Araujo, F.M.; Santos, J.L. Applications of fiber optic grating technology to multi-parameter measurement. *Fiber Integr. Opt.* 2005, 24, 227–244
- 111 Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Smelser, C.W.; Walker, R.B. Multiparameter sensor based on single high-order fiber Bragg grating made with IR-Femtosecond radiation in single-mode fibers. *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 1223–1228.
- 112 Busch, M.; Ecke, W.; Latka, I.; Fischer, D.; Willsch, R.; Bartelt, H. Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications. *Meas. Sci. Technol.* 2009, 20.
- 113 Jewart, C.M.; Wang, Q.; Canning, J.; Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Chen, K.P. Ultrafast femtosecond-laser-induced fiber Bragg gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing. *Opt. Lett.* 2010, 35, 1443–1445.
- 114 Huang, J.-Y.; Van Roosbroeck, J.; Vlekken, J.; Martinez, A.B.; Geernaert, T.; Berghmans, F.; Van Hoe, B.; Lindner, E.; Caucheteur, C. FBGs written in specialty fiber for high pressure/high temperature measurement. *Opt. Express* 2017, 25, 17936–17947
- 115 Grobncic, D.; Mihailov, S.J.; Smelser, C.W.; Ramos, R.T. Ultrafast IR laser writing of strong Bragg gratings through the coating of high Ge-doped optical fibers. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2008, 20, 973–975.
- 116 Martinez, A.; Khrushchev, I.Y.; Bennion, I. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser. *Opt. Lett.* 2006, 31, 1603–1605.
- 117 Bernier, M.; Trépanier, F.; Carrier, J.; Vallée, R. High mechanical strength fiber Bragg gratings made with infrared femtosecond pulses and a phase mask. *Opt. Lett.* 2014, 39, 3646–3649.
- 118 Gallagher, M.; Osterberg, U. Time resolved 3.10 eV luminescence in germanium-doped silica glass. *Appl. Phys. Lett.* 1993, 63, 2987–2989.
- 119 Hnatovsky, C.; Grobncic, D.; Mihailov, S.J. Nonlinear photoluminescence imaging applied to femtosecond laser manufacturing of fiber Bragg gratings. *Opt. Express* 2017, 25, 14247–14259.
- 120 Rodriguez, G.; Gilbertson, S. Ultrafast Fiber Bragg Grating Interrogation for Sensing in Detonation and Shock Wave Experiments. *Sensors* 2017, 17.
- 121 Antipov, S.; Ams, M.; Williams, R.J.; Magi, E.; Withford, M.J.; Fuerbach, A. Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings. *Opt. Express* 2016, 24, 30–40.
- 122 Lu, P.; Mihailov, S.J.; Ding, H.; Grobncic, D.; Walker, R.; Coulas, D.; Hnatovsky, C.; Naumov, A.Y. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers. *J. Lightwave Technol.* 2017, 10323.
- 123 Lai, Y.; Martinez, A.; Khrushchev, I.; Bennion, I. Distributed Bragg reflector fiber laser fabricated by femtosecond laser inscription. *Opt. Lett.* 2006, 31, 1672–1674

- 124 IBM, Redbooks (9 November 1998). Understanding Optical Communications. 4.6: IBM Corporation. ISBN 0738400580. Retrieved 16 October 2015.
- 125 <http://www.chinacablesbuy.com/what-is-fiber-optic-isolator.html>
- 126 https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93P%C3%A9rot_interferometer#cite_note-IsmailPollnau2016-6
- 127 Ismail, N.; Kores, C. C.; Geskus, D.; Pollnau, M. (2016). "Fabry-Pérot resonator: spectral line shapes, generic and related Airy distributions, linewidths, finesses, and performance at low or frequency-dependent reflectivity". *Optics Express*. 24 (15): 16366–16389
- 128 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4883438/>

ҚОСЫМША А

Білгалдылыққа байланысты Фабри-петро интерферометірінің резонанстық күшейтілуін Matlab программасы ортасында моделдеу нәтижесі. (жоғарғы жағы) спектрлік тәуелді ішкі резонансты күшейту, жалпы Airy таратуын теңестіреді

```
K = -1.5:0.01:1.5;
```

```
r1 = 0.75;
```

```
F = 4 * r1^2 / (1 - r1^2)^2;
```

```
I1 = 1 ./ (1 + F * sin(K /2).^2);
```

```
figure(1)
```

```
plot(K , I1 , 'linewidth' , 2 , 'color' , [0.8 , 0.1 ,0.8]);
```

```
grid on
```

```
hold on
```

```
r2 = 0.85;
```

```
F = 4 * r2^2 / (1 - r2^2)^2;
```

```
I2 = 1 ./ (1 + F * sin(K /2).^2);
```

```
plot(K , I2 , 'linewidth' , 2 , 'color' , [0.1 , 0.7 ,0.7]);
```

```
hold on
```

```
r3 = 0.99;
```

```
F = 4 * r3^2 / (1 - r3^2)^2;
```

```
I3 = 1 ./ (1 + F * sin(K /2).^2);
```

```
plot(K , I3 );
```

```
axis([-10,10, 0 , 1.1]);
```

```
xlabel('K = fxtaw=2 k d \mu cos \theta');
```

```
ylabel('I(K)');
```

```
title('The Transmitted Intensity of a Fabry-Perot Interferometer');
```

```
figure(2)
```

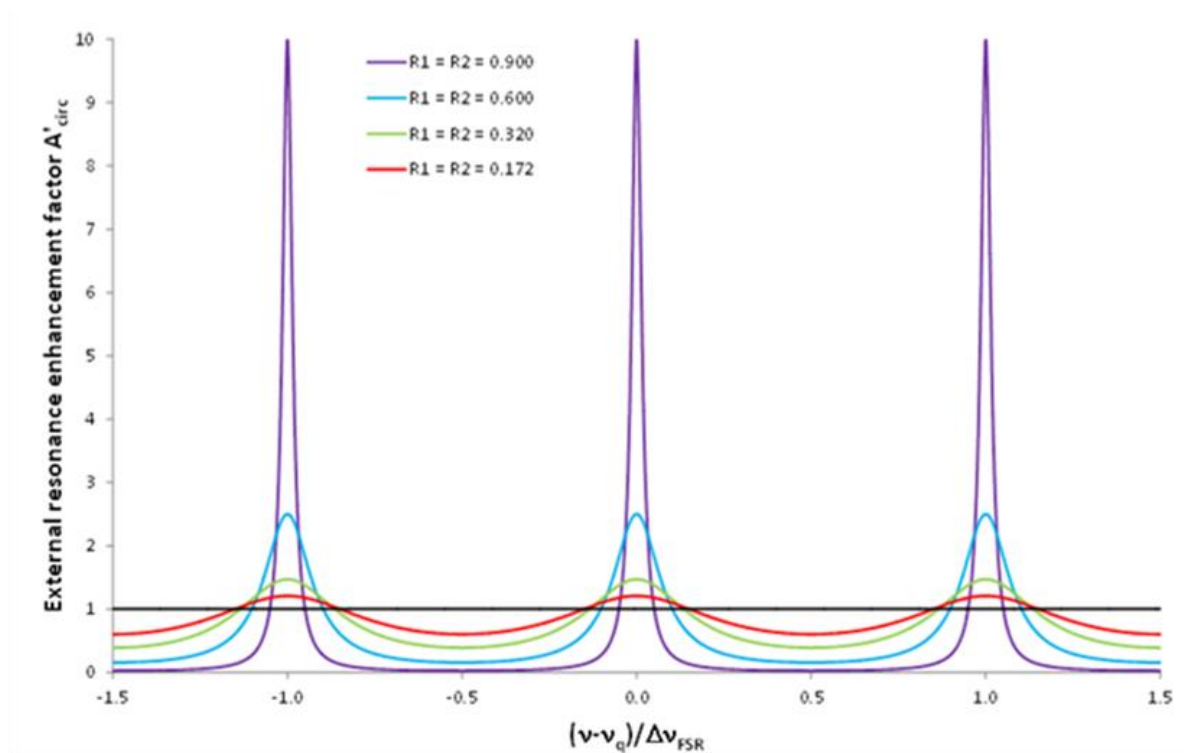
```
r11=.5:.005:.99;
```

```
FF = 3.14 * sqrt(r11) ./ (1 - r11);
```

```

plot(r11,FF)
xlabel('Mirror Reflectivity R');
ylabel('Finesse FR');
title(' Ылғалдылыққа байланысты беттік шағылу R');
grid on
figure(3)
FFC = 4 * r11.^2 ./ (1 - r11.^2).^2;
plot(r11,FFC)
ylim([-20 800])
xlabel('Mirror Reflectivity R');
ylabel('Contrast Factor FFC');
title('Contast Factor versus Mirorr Reflectivity R');
grid on

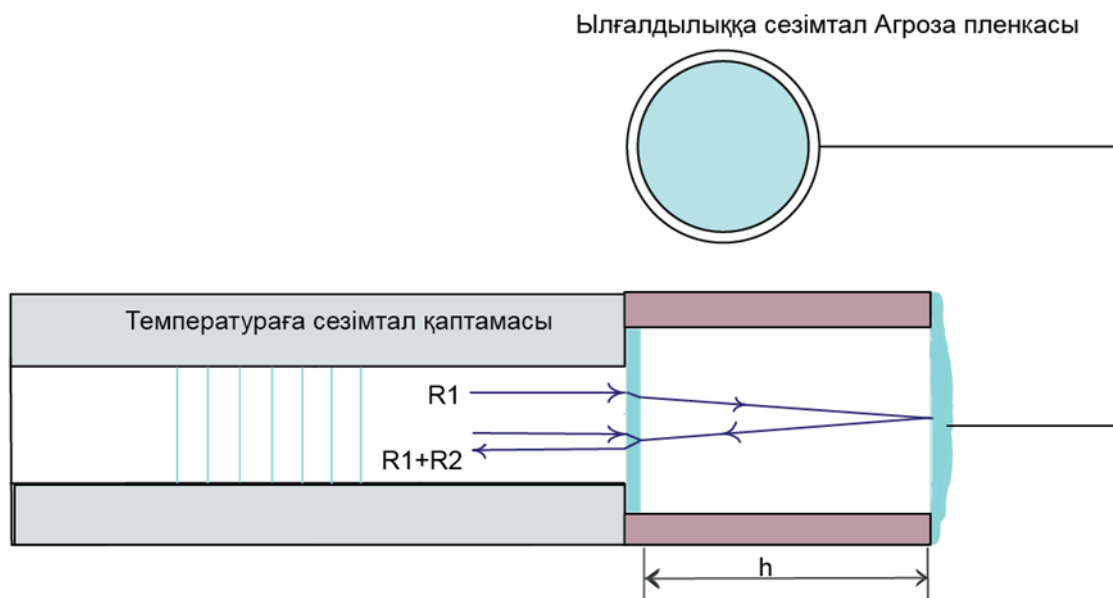
```



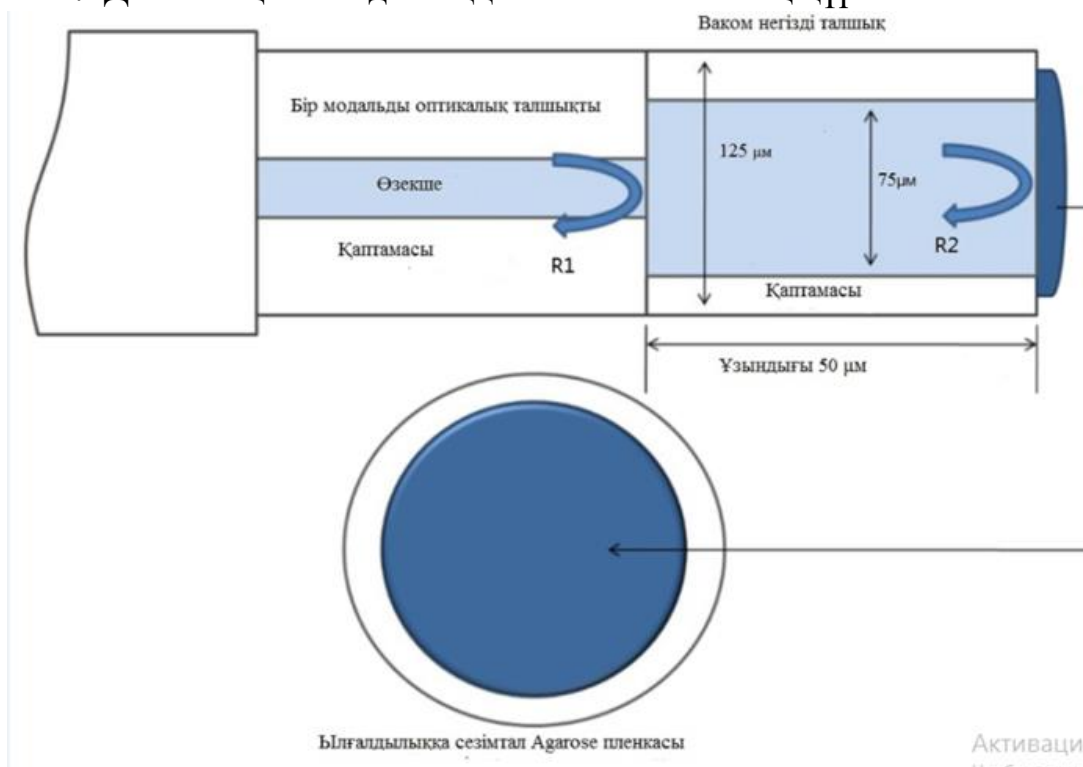
ҚОСЫМША Ә

Фабри-Перот интерферометрі әдісіне негізделген ылғалдылыққа сезімталдылықты анықтаудың тәжірибеден алынған мәндері.

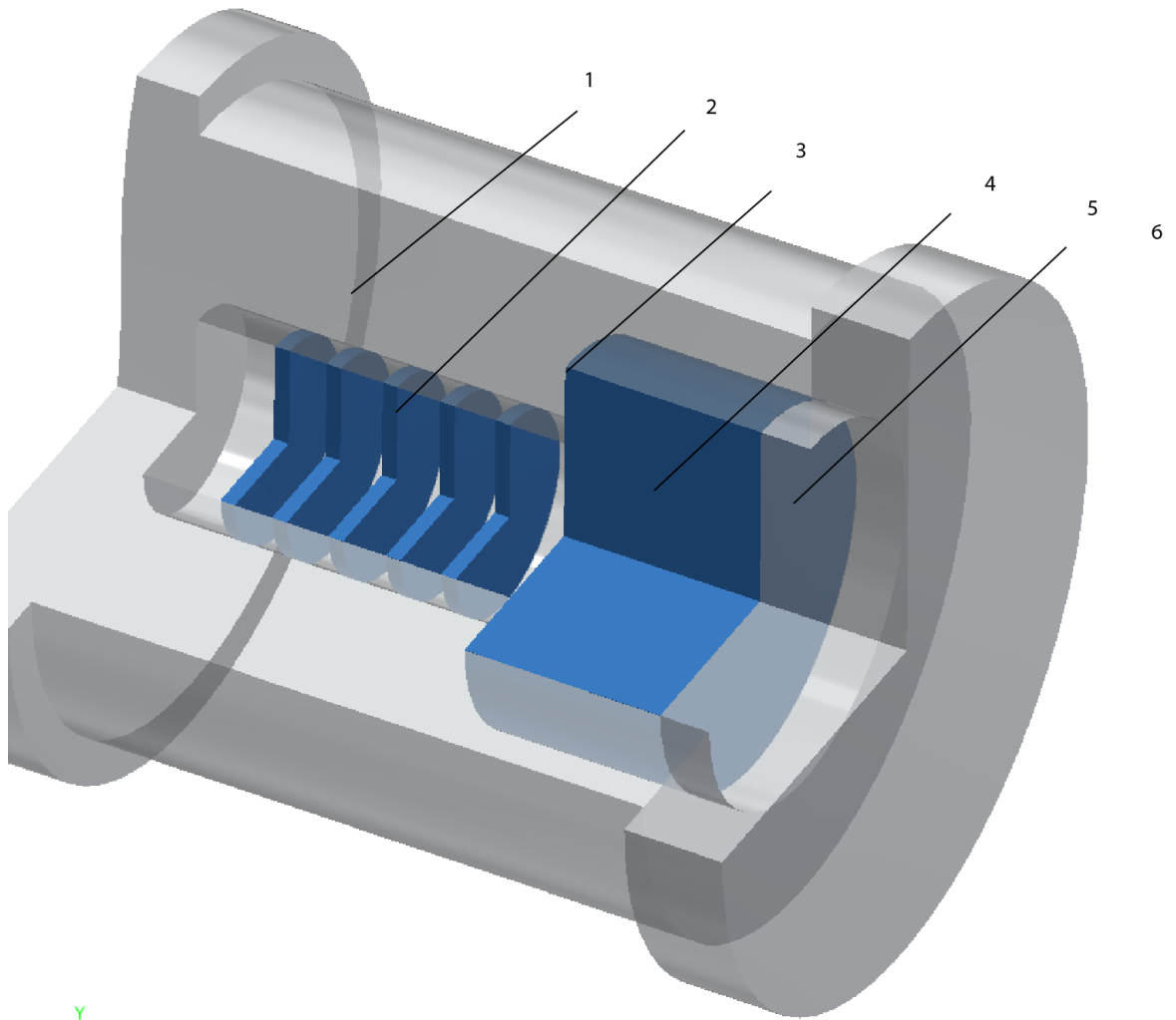
1. Температура мен ылғалдылықты біріктіре өлшейтін датчиктің құрылымдық сұлбасы.



2. Датчиктің ылғалдылыққа сезімтал басының құрылымы мен өлшемдері

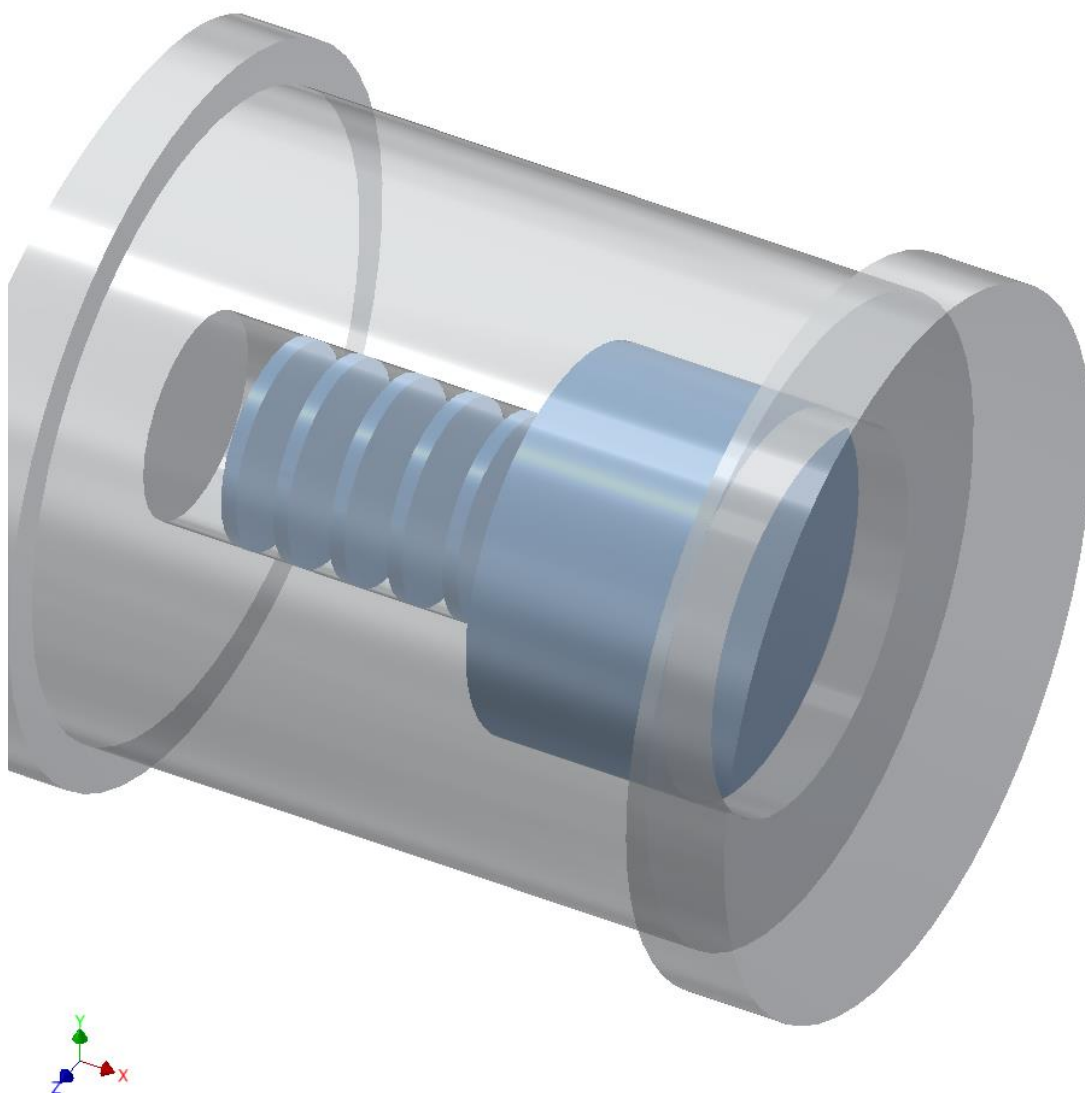


3. Температура мен ылғалдылықты өлейтін оптикалық талшықты датчиктің 3D сұлбасы



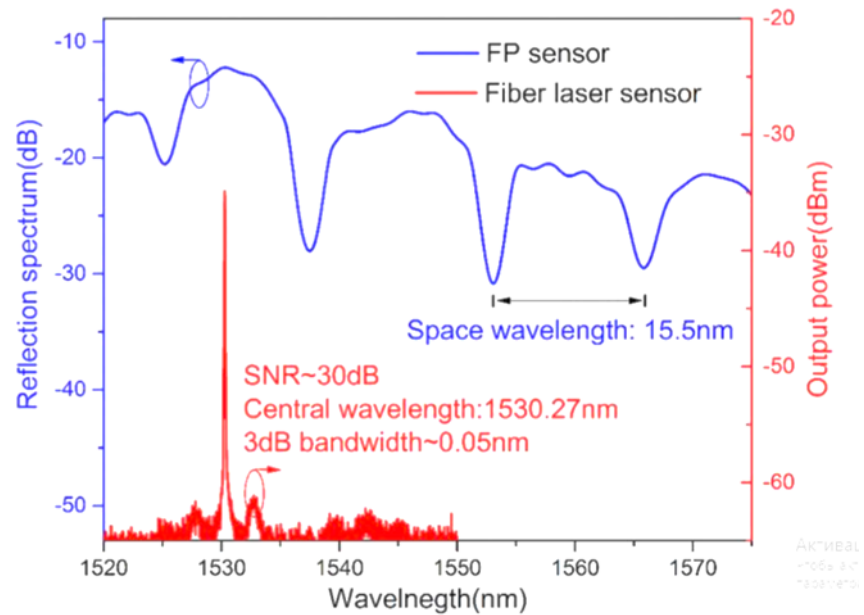
1. Температураға байланысты функционалды өзгертін акрилат қаптамасы; 2. Талшықты Брэгг торлары; 3. ПФИ дегі бірінші бетік шағылыстратын шыны; 4. h ұзындықтағы вакуум; 5. Ылғалдылыққа сезімтал агрозгелі (екінші беттік шағылыстырғыш); 6. Кремний диафрагмасының $r = 2.5\mu m$ болатын қалыңдығы шамамен $10\mu m$;

4. Датчиктің сыртқы көрінісі

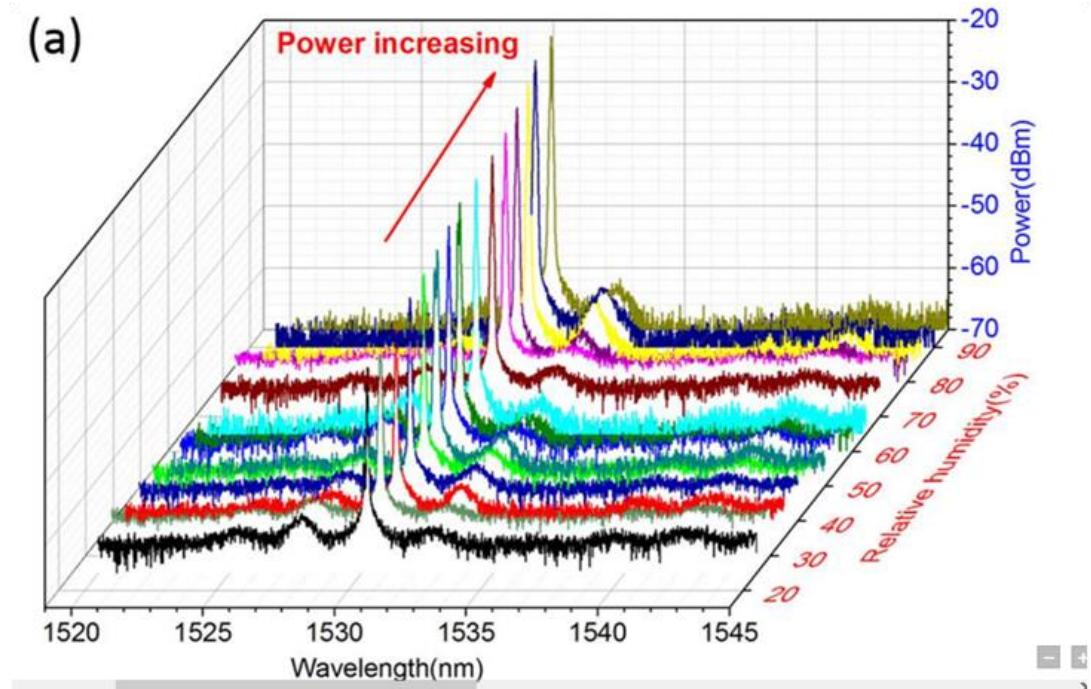


ҚОСЫМША Б

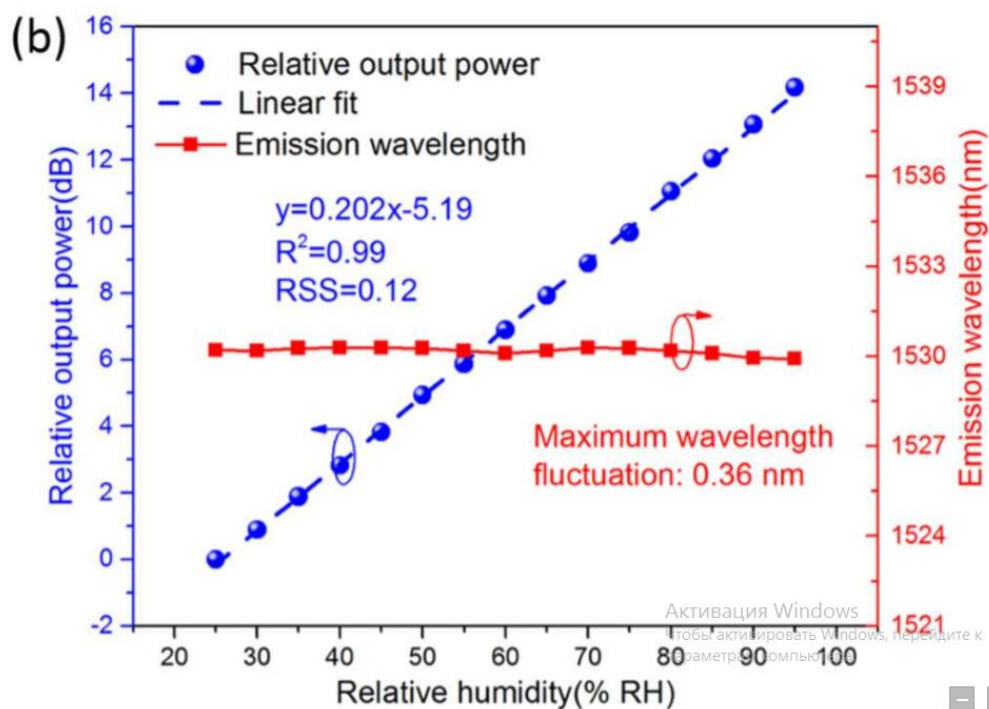
Тәжірибелік талдау нәтижелері



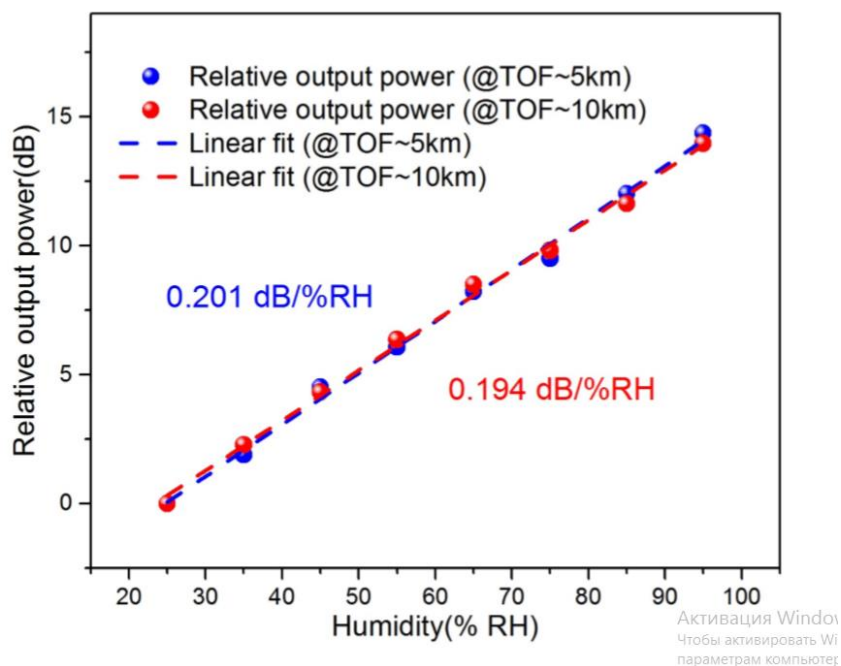
Қоршаған ортаның салыстырмалы ылғалдылығы 35% болғанда, ФПИ-нің тиісті оптикалық талшықты лазер спектрлері



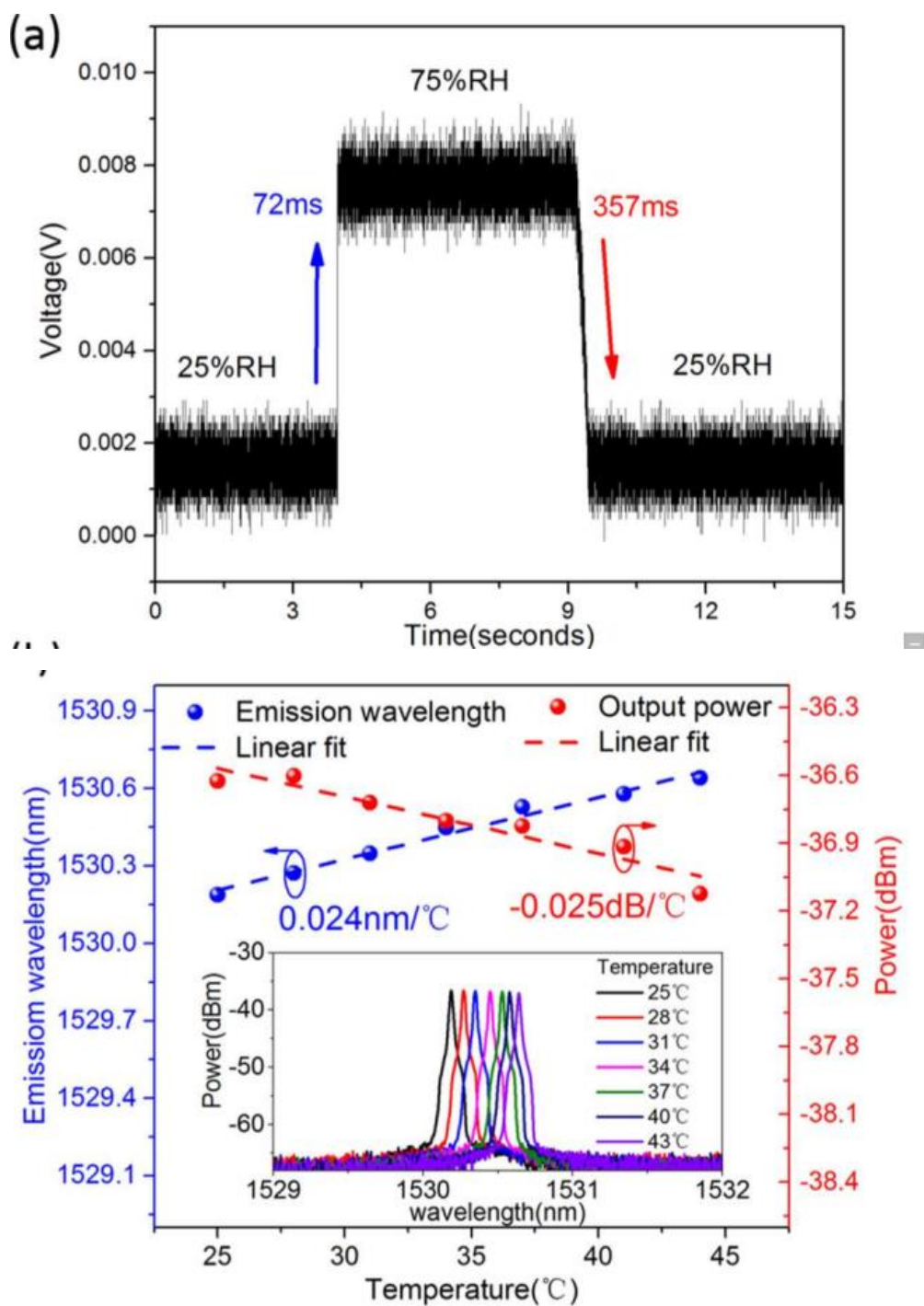
Қоршаған ортаның ылғалдылығы 25% -дан 90% -ға дейін өзгерген кездегі талшықты лазерінің шығу спектрі өзгерісі



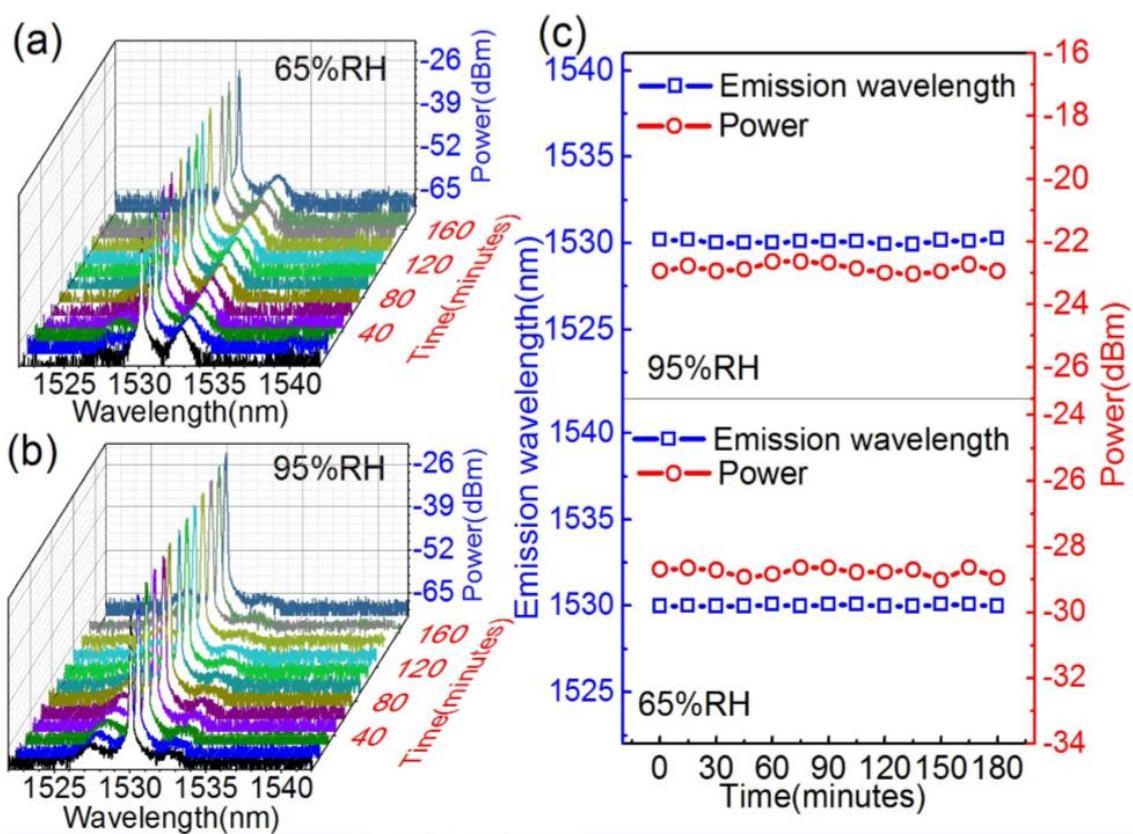
Қоршаған ортаның ылғалдылығы ретінде талшықты сақина лазерінің шығу спектрі 25% -дан 95% -ға дейін өзгереді. (b) салыстырмалы шығу қуаты мен талшықты сақиналық лазердің толқын ұзындығы арасындағы ылғалдылыққа жауаптары



Ұзындығын 5 км-ге және 10 км-ге дейін ұзарту арқылы талшықты сақина лазерінің салыстырмалы шығу қуатының ылғалдылығы туралы байланыстары



(a) датчиктің уақыт бойынша сезімталдық жауабы. (b) бөлменің салыстырмалы ылғалдылығы 25% кезінде өлшенген температура датчиктің температура бойынша сезгіштігі, бұл графикте қоршаған ортаның температурасы 25 °C пен 44 °C аралығында өзгерген



(a) 65% салыстырмалы ылғалдылық және (b) 95% салыстырмалы ылғалдылық тиісінше 180 минут ішінде өлшенеді және (c) толқын ұзындығы мен қуат тұрақтылығы

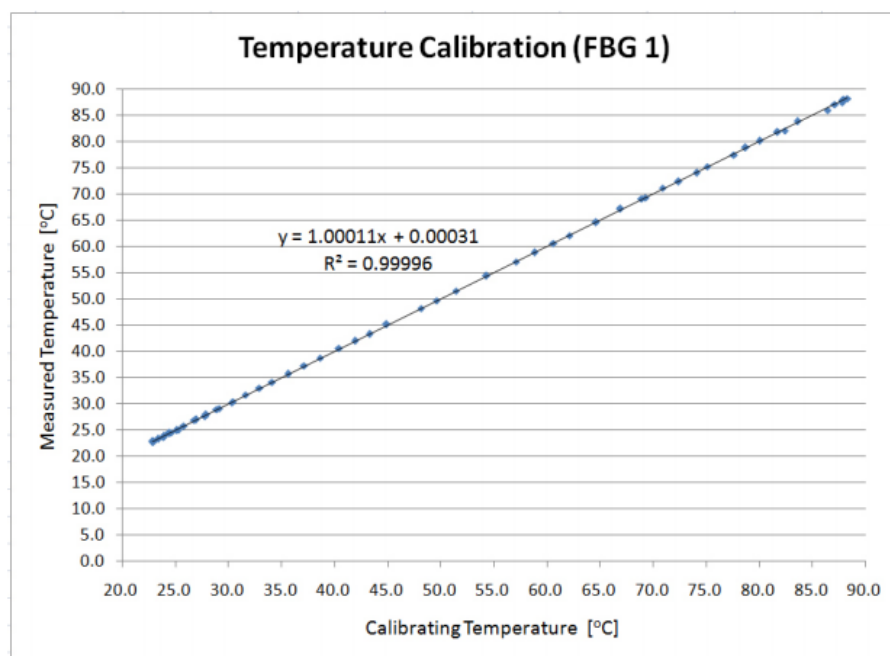
ҚОСЫМША Г

Оптикалық талшықтың әртүрлі температурада қажетті деформациясы

Температура, С ⁰	Деформация ξ
-50	8.75×10^{-4}
-30	6.2×10^{-4}
-10	3.75×10^{-4}
0	2.9×10^{-4}
25	0
60	-3.75×10^{-4}
80	-6×10^{-4}
110	-0.001
130	-0.00122

Калибрлеу параметрлері

ТБТ	Теориялық сезімталдығы pm/°C	Нақты өлшенген сезімталдылық pm/°C	Корреляция коэффициенті R^2	Орташа-квадраттық ауытқу (бөлме температурасы)	Максимум қалдық қате (° C)
1	14.05	12.31	0.99982	0.00311	0.003
2	14.10	12.71	0.99981	0.00328	0.005
3	14.14	12.95	0.99982	0.00327	0.005
4	14.19	12.99	0.99993	0.00320	0.006
5	14.23	13.10	0.99978	0.00363	0.007



Температуралық калибрлеу нәтижелері

ҚОСЫМША F

Оптикалық талшық негізінде температура мен ылғалдылықты бір уақытта өлшейтін датчиктің сипаттамасы

	Полимерге негізделген бір модульды, 1500нм нөлдік дисперсиялыдағы оптикалық талшықты датчик				
	Анықталу әдістері	Сезімтал материал	Өлшеу аралығы	Сезімталдыққа байланысты ажыратылымдық	Жауап беру уақыты
Температура	ТБТШ		-50 ~130 C ⁰	$0.117 \times 10^{-4} / C^0$	
Салыстрмалы ылғалдылық	ФПИ	Агрозалық гель (CdS/PANI)	20% ~98%	0.202 дБ /% СЫ	Ж;72мс Қ;357мс