

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Рамазан Ғалым

«Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Алматы 2022 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

 Е. Таштай

« 24 » 05 2022 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

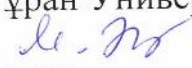
Тақырыбы: «Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау»

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

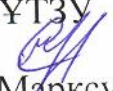
Орындаған:

Ғ.Рамазан

Пікір беруші
КЖПИИ каф. меңгерушісі
PhD докторы
Тұран Университеті


М. Жасандықызы
« 24 » 05 2022 ж.

Ғылыми жетекші
ЭТЖҒТ каф. лекторы,
техн. ғыл. Магистры
ҚазҰТЗУ


С. Марксұлы
« 24 » 05 2022 ж.

Алматы 2022 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі

 Е. Таштай

« 21 » XII 2021 ж.

Дипломдық жұмыс орындауға ТАПСЫРМА

Білім алушы *Рамазан Ғалым*

Тақырыбы *«Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау»*

Университет ректорының *«24» желтоқсан 2021 ж. №489-ІІ бұйрығымен* бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі *«30» сәуір 2022 ж.*

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1) Беттік плазмон резонансы және оны алу әдістері; 2) Плазмон резонанс әдістері; 3) Талшықты плазмоникалық датчиктердің параметрлері;

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Математикалық сигналды өңдеу; б) Сигналдарды алдын ала өңдеу; в) Сенсор ажыратымдылығын бағалау. г) Температураның өзгеру әсеріу талдау.

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс):

Ұсынылатын негізгі әдебиет 49 атау: *1) The sensitivity enhancement based on the Au & black phosphorus composite film for the surface plasma resonance fiber sensor. 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). 2) Comparative Investigation of Gamma Radiation Effects on Long Period Gratings and Optical Power in Different Optical Fibers. Flavio Esposito; Andrei Stăncălie; Constantin-Daniel Neguț; Stefania Campopiano; Dan Sporea; Agostino Iadicicco. Journal of Lightwave Technology 2019. 3) Tunable Fano-Like Lineshape in an Adiabatic Tapered Fiber Coupled to a Hollow Bottle Microresonator. Zeinab Chenari; Hamid Latifi; Omid Reza Ranjbar-Naeini; Mohammad Ismaeel Zibaii; Ebrahim Behroodi; Amir Asadollahi. Journal of Lightwave Technology 2018*

дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау

КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, карастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	04.01.2022 - 01.02.2022	<i>орындалды</i>
Теориялық ақпарат	01.02.2022 - 01.03.2022	<i>орындалды</i>
Жабдықтар жұмысының есебі және жұмысты рәсімдеу	01.03.2022 - 30.05.2022	<i>орындалды</i>

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

қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	Марксұлы С. ЭТЖҒТ каф.лекторы, т.ғ.м.	10.03.2022	<i>С.Марксұлы</i>
Теориялық ақпарат	Марксұлы С. ЭТЖҒТ каф.лекторы, т.ғ.м.	15.04.2022	<i>С.Марксұлы</i>
Норма бақылау	Смайлов Н.К. ЭТЖҒТ каф. Қауым проф PhD	12.05.2022	<i>Н.Смайлов</i>

Ғылыми жетекшісі

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

Марксұлы С.

Рамазан Ғ.

Күні «13» желтоқсан 2021 ж.

АНДАТПА

Ұсынылған «Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау» тақырыбындағы дипломдық жұмыс төрт бөлімнен тұрады. Оптикалық талшықтардағы плазмонды резонанстың генерациясының ең перспективалы тәсілі қиғаш Брэгг торларын пайдаланатын құрылымдар екенін көреміз. Бұл ретте талшықты плазмониканың дамуына кедергі келтіретін және зертханадан тыс талшықты плазмоникалық сенсорларды пайдалану туралы айтуға мүмкіндік бермейтін осындай элементтердің негізгі кемшіліктері анықталды. Осы кемшіліктерді жою жолдарын зерттеу осы дипломдық жұмыстың өзекті және практикалық маңызды міндеті болып табылады.

Көлбеу Брегг торы негізінде плазмоникалық сыну көрсеткішінің датчиктерінің талшықты-оптикалық үлгілерін қайталанатын өндіру технологиясы әзірленді. Талшықтың цилиндрлік бетіне жұқа металл қабықшаларды біркелкі тұндыру әдісі әзірленді. Алғаш рет плазмонды резонансты қоздыратын оптикалық сәулеленудің поляризациясының өздігінен өзгеру әсерінің жағымсыз факторын жоюға арналған эксперименттік тәсіл ұсынылып, енгізілді. Тәсіл поляризацияны және поляризациялық сәулеленуді сақтай отырып, қос сынғыш талшықтарда тікелей беттік плазмондардың генерациясына жағдай жасауға негізделген. Бұл тәсілдің тиімділігі осындай датчиктердің спектріндегі резонанстық позицияның тұрақтылығын изотропты талшықта жазылған сенсордың спектріндегі резонанспен салыстыру арқылы көрсетіледі. Эксперименттік деректер тұрақтылықтың шама ретінен артық жақсарғанын растады.

АННОТАЦИЯ

Предлагаемая дипломная работа на тему «анализ методов плазменного резонанса в оптическом волокне» состоит из четырех разделов. Мы видим, что наиболее перспективным способом генерации плазмонного резонанса в оптических волокнах являются структуры, использующие косые решетки Брэгга. При этом выявлены основные недостатки таких элементов, препятствующие развитию фиброзной плазмоники и не позволяющие говорить об использовании волоконных плазмонных датчиков вне лаборатории. Изучение путей устранения этих недостатков является актуальной и практико значимой задачей данной дипломной работы.

Разработана технология воспроизводства волоконно-оптических образцов плазмонных датчиков показателя преломления на основе наклонной решетки Брегга. Разработан метод равномерного осаждения тонких металлических пленок на цилиндрической поверхности волокна. Впервые предложен и внедрен экспериментальный подход к устранению отрицательного фактора эффекта самопроизвольного изменения поляризации оптического излучения, возбуждающего плазмонный резонанс. Подход основан на создании условий для генерации прямых поверхностных плазмонов в двойных хрупких волокнах с сохранением поляризации и поляризационного излучения. Эффективность такого подхода выражается сравнением стабильности резонансного положения в спектре таких датчиков с резонансом в спектре датчика, записанным в изотропном волокне. Экспериментальные данные подтвердили, что стабильность улучшилась более чем в разы.

ANNOTATION

The proposed thesis on the topic "analysis of plasma resonance methods in optical fiber" consists of four sections. We see that the most promising way to generate plasmon resonance in optical fibers are structures using Bragg oblique lattices. At the same time, the main disadvantages of such elements that hinder the development of fibrous plasmonics and do not allow us to talk about the use of fiber plasmon sensors outside the laboratory are revealed. The study of ways to eliminate these shortcomings is an urgent and practically significant task of this thesis.

A technology for reproducing fiber-optic samples of plasmon refractive index sensors based on an inclined Bragg lattice has been developed. A method of uniform deposition of thin metal films on the cylindrical surface of the fiber has been developed. For the first time, an experimental approach has been proposed and implemented to eliminate the negative factor of the effect of spontaneous change in the polarization of optical radiation that excites plasmon resonance. The approach is based on creating conditions for the generation of direct surface plasmons in double brittle fibers with the preservation of polarization and polarization radiation. The effectiveness of this approach is expressed by comparing the stability of the resonant position in the spectrum of such sensors with the resonance in the spectrum of the sensor recorded in an isotropic fiber. Experimental data confirmed that stability has improved more than several times.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Беттік плазмон резонансы және оны алу әдістері	11
1.1 Жазық геометрия жағдайындағы беттік плазмондар	11
1.2 Оптикада беттік плазмонды резонанстың генерациясы талшықтар	15
2 Плазмон резонансын зерттеудің тәжірибелік әдістері	30
2.1 Эксперименттік үлгілерді дайындау технологиясы	30
2.2 Талшықты плазмоникалық датчиктердің параметрлерін зерттеудің тәжірибелік әдістемесі	34
3 Математикалық сигналды өңдеу	45
3.1 Математикалық аппараттың жұмыс істеу тәсілі мен алгоритмдерін сипаттау	45
3.2 Сигналдарды алдын ала өңдеу	46
3.3 Плазмонның резонанс толқын ұзындығын анықтау	49
4 Математикалық өңдеуді қолдану нәтижелері	54
4.1 Ерітінді концентрациясын өлшеу және сезімталдықты бағалау	54
4.2 Сенсор ажыратымдылығын бағалау	57
4.3 Температураның өзгеруінің әсері	59
4.4 Поляризация әсерін тұрақтандыру	61
Қорытынды	64
Пайдаланылған әдебиеттер	65

КІРІСПЕ

Беттік плазмондар – диэлектрлік ортадағы өткізгіштің беті бойымен таралатын электромагниттік өріс пен өткізгіш электрондардың байланысқан тербелістері. Оларды еркін электрондармен әрекеттесу нәтижесінде металл беті түсіретін электромагниттік толқындар ретінде түсіндіруге болады. Бұл әрекеттесу барысында өткізгіштік электрондар электромагниттік әсерге ұжымдық түрде әсер етіп, жарық толқынымен резонанстық тербеліс жасайды.

Қазіргі физикада беттік плазмондық резонанстық эффект деп аталатын металл бетіне түсетін оптикалық сәулеленудің көмегімен беттік плазмондардың резонанстық қозуы үлкен қызығушылық тудырады. Жазық құрылымдар бойынша белсенді зерттеулер 1968 жылы алтынмен қапталған оптикалық призманың көмегімен беттік плазмондардың резонанстық генерациясының схемасына арналған Кречманның еңбектерінің жариялануымен басталды [1]. Содан бері және қазіргі уақытқа дейін плазмонды резонанстың физикалық қасиеттеріне негізделген құрылғылар мен әдістер жасалды және жетілдірілді, олар шын мәнінде фотониканың жеке саласы - плазмоникумен құрайды.

Жақында SPR әртүрлі өлшеу жүйелерін құрудың физикалық принципі ретінде белсенді түрде қолданылуда [2-8]. Иммундық талдау тапсырмалары үшін қолданылатын биохимиялық плазмоникалық сенсорлар әсіресе танымал [7-14]. Мұндай жүйелердің жұмыс істеуінің негізгі принципі датчик пен зерттелетін орта арасындағы интерфейсте пайда болатын беттік плазмондардың толқын ұзындығын өлшеу болып табылады. Физикалық принциптерге сәйкес беттік плазмонның толқындық векторы датчиктің металл бетінің жанындағы диэлектрлік ортаның сыну көрсеткішіне анық тәуелді, оның бойымен беттік плазмон таралады [4, 15]. Беттің кез-келген модификациясы, атап айтқанда анықталатын молекулалардың адсорбциясы сенсордың жақын ортасының өзгеруіне және сәйкесінше оның оқылуына әкелетіні анық. Планарлық сұлбалар негізінде, мысалы, Кречманның ең көп таралған сұлбаларының бірі иммундық талдаудың аналитикалық кешендері бар және белсенді қолданылады [16]. Алайда, мұндай жабдық жоғары күрделілікпен және бағамен, ұтқырлықтың болмауымен сипатталады, ал жедел талдау жүргізу үшін ықшам мобильді және арзан құрылғыларды құру өзекті міндет болып табылады. Осы тәсілмен талшықты-оптикалық технологиялар плазмалық сенсориканы дамытудың ең перспективалы бағыты болып көрінеді.

Әдебиетте плазмалық талшықты сенсорларға арналған көптеген жұмыстар бар [5, 6, 8, 17-22]. Мұндай сенсорларда арнайы жағдайлар жасалатын ағып жатқан жарық өрісінің энергиясы оптикалық талшықтың бетінде плазмон-поляритондарды (ПП) генерациялау үшін пайдаланылады. Генерация жағдайларын жасау үшін талшықтың беті плазмалық металдың жұқа қабатымен, әдетте алтынмен жабылған. Пайда болатын беттік плазмондардың толқын ұзындығы сыртқы ортаның сыну көрсеткішіне, сондай-ақ планарлық схемаларға байланысты. Энергияны тиімді айдау резонанстық жағдайлар орындалған кезде

жүреді, онда оптикалық сәулеленудің толқындық векторының проекциясы беттік плазмонның толқындық векторымен сәйкес келеді. Энергияны сорудың әсері, әдетте, ұқсас сенсордың өткізу спектрінде көрінеді. Плазмонның таралу жылдамдығы сенсордың жақын ортасының қоршаған орта параметрлеріне байланысты екенін ескере отырып, оның өзгеруі талшықты сенсордың өткізу спектрінде де өзгеріс тудырады.

Ең қызықты, практикалық тұрғыдан алғанда, талшықты жарық өткізгіштің бүйір бетіндегі плазмондардың қозу тізбектерінің бірі - көлбеу соққылары бар Брэгг торларына негізделген схемалар [6, 23-28]. Көптеген жарияланымдар сенсорлардың зертханалық жағдайда жақсы нәтиже көрсеткеніне қарамастан, олар әлі күнге дейін практикалық іске асырылған жоқ. Бұл бірқатар шешілмеген мәселелерге байланысты, олардың бірі плазмалық резонанс генерациясының тиімділігіне әсер ететін жарық сәулесінің поляризация күйін бақылау қажеттілігі болып табылады. Сәйкес кіріспе электромагниттік өріс жер үсті плазмонах, тек бір сызықты құрайтын поляризация света қабілетті қатысуға генерациялау плазмонів. Изотропты талшықты жарық өткізгішті пайдалану, әдетте, стандартты телекоммуникациялық Corning SMF-28 шамалы деформациялар кезінде де таралатын сәулеленудің поляризация күйін өзгерте алады, бұл сенсордың өткізу спектрінде айтарлықтай бұрмаланулар тудырады. Мұндай әсер сенсор параметрлерін айтарлықтай нашарлатады, мысалы, ажыратымдылық және минималды анықтау шегі.

Тағы бір маңызды шешілмеген мәселе - өлшенген спектрден плазмондық резонанстық толқын ұзындығын дәл анықтау. Бұл мәселені шешу үшін спектрлік заңдылықты кешенді талдауды қолдануға негізделген математикалық өңдеу әдістерін қолдану қажет. Бұл жерде айта кететін жайт, көптеген мәселелер үшін плазмонның резонанс толқын ұзындығының абсолютті нақты мәні емес, сыртқы факторлардың әсерінен оның өзгеруі маңызды. Мысалы, датчик бетіндегі ақуыз адсорбциясы әсерінен плазмонның резонанс толқын ұзындығының өзгеру динамикасы оның ерітіндідегі бастапқы концентрациясын бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Бұл жұмыстың мақсаты оптикалық талшықтардағы беттік плазмонды резонанс құбылысын эксперименталды түрде зерттеу, плазмонның спектрлік жағдайына қоздыру сәулесінің поляризациясы мен қоршаған орта температурасының әсерін ескере отырып, оптикалық талшықтардағы беттік плазмондарды генерациялау әдістерін зерттеу және әзірлеу болып табылады. резонанс. Жұмыстың практикалық мақсаты да плазмондық резонанс параметрлерінің (плазмондық резонанс толқын ұзындығының) өзгерістерін ең дәл анықтау болып табылады.

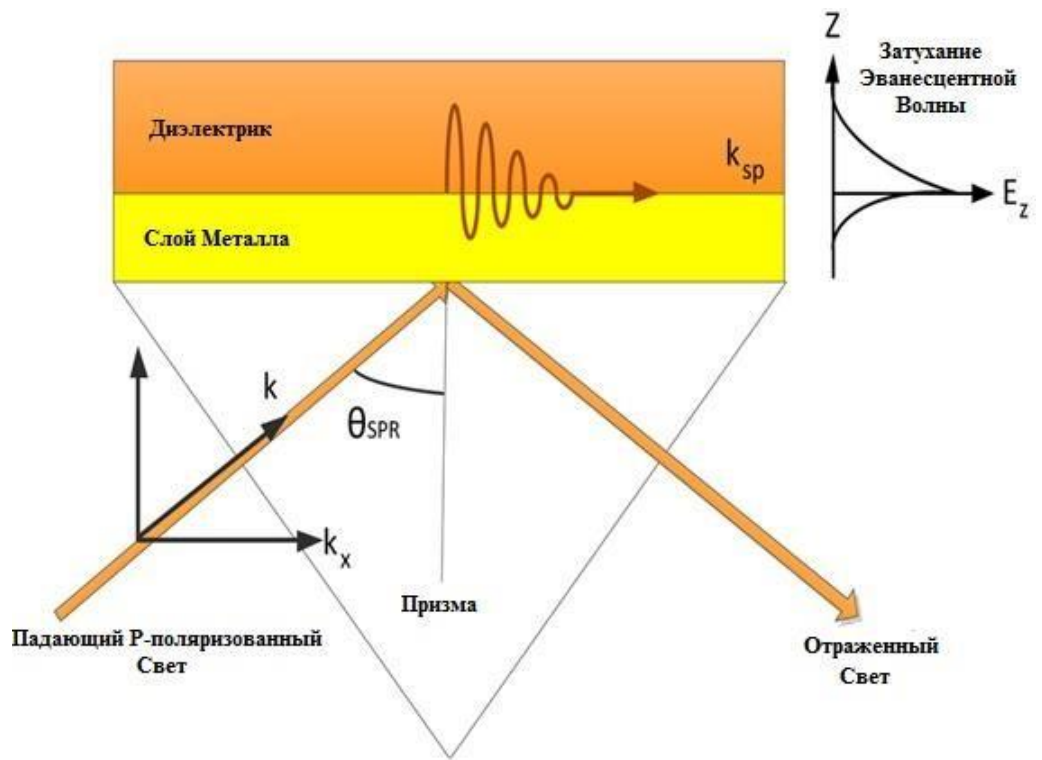
1 БЕТТІК ПЛАЗМОН РЕЗОНАНСЫ ЖӘНЕ ОНЫ АЛУ ӘДІСТЕРІ (ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ)

1.1 Жазық геометрия жағдайындағы беттік плазмондар

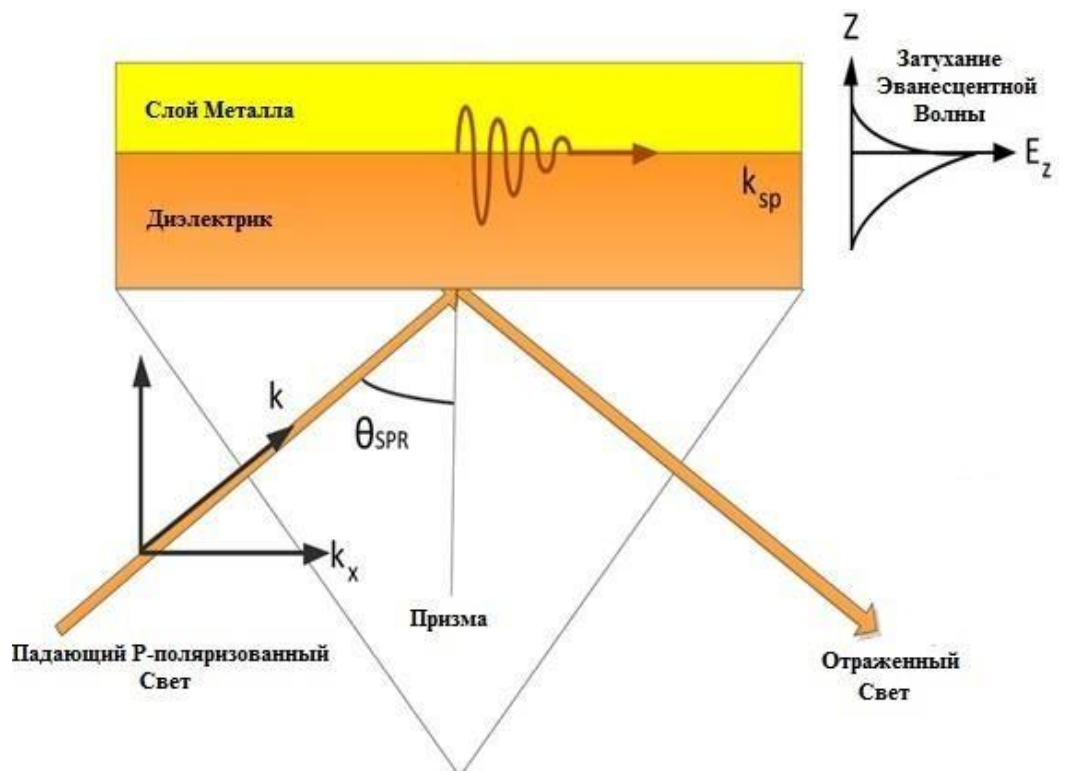
Беттік плазмондық поляритондар – өткізгіштегі өткізгіш электрондардың және диэлектриктегі электромагниттік толқынның осы екі ортаның түйіскен жерінде пайда болатын қосылатын тербелістері [4, 15]. Электромагниттік толқынның өткізгіштік электрондарымен әрекеттесу барысында соңғылары жарық толқынымен резонанспен тербелетін электромагниттік әсерге бірлесіп әрекет етеді. Беттік плазмонның гибриді табиғаты оның басқа атауы плазмон-поляритоннан да көрінеді: мұнда «плазмон» металл бетіндегі заряд тербелістерін, ал «поляритон» диэлектриктегі электромагниттік өрісті білдіреді [29, 30].

Тегіс құрылымдардағы беттік плазмондарды белсенді зерттеу 1968 жылы Кречман [1] және Отто [31] мақалаларын шығарудан басталды, олар оптикалық металл призмасы арқылы беттік плазмондардың резонанстық генерация схемасына арналған. Кейінірек мұндай генерация схемалары сәйкесінше «Кречманның» (1.1-сурет) және «Оттоның» (1.2-сурет) ең танымал классикалық схемалары ретінде белгілі болады.

Кречман конфигурациясында оптикалық призманың тегіс беттерінің бірі жұқа (әдетте 20–30 нм тәртібінде) металл қабатпен жабылған. Металл қабатының оңтайлы қалыңдығын таңдау оптикалық сәулелену энергиясын тиімді сіңіру бойынша шектеулерге байланысты. Осылайша, қабат қалыңдығы тым аз болса, жарық сәулесінің энергиясының негізгі бөлігі беттік плазмонның қозуына қатыспай, кері шағылысады. Керісінше, металдың сыртқы бетіне жете алмайтын оптикалық сәулелену үшін тым көп қалыңдық өтпейді [32]. Отто конфигурациясында металл мен призма арасында диэлектрик бар, ал металл қабаты максималды қалыңдықта шектеулер жоқ.

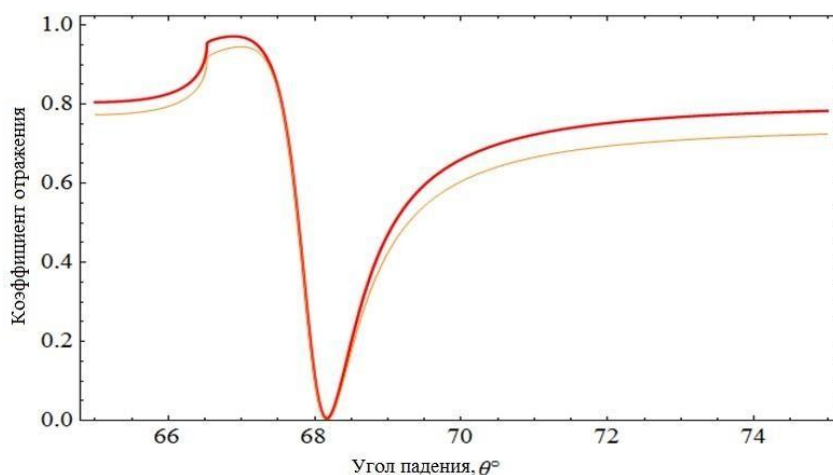


1.1 Сурет - Призманың бетіндегі беттік плазмонның Кречман қозуының схемасы.



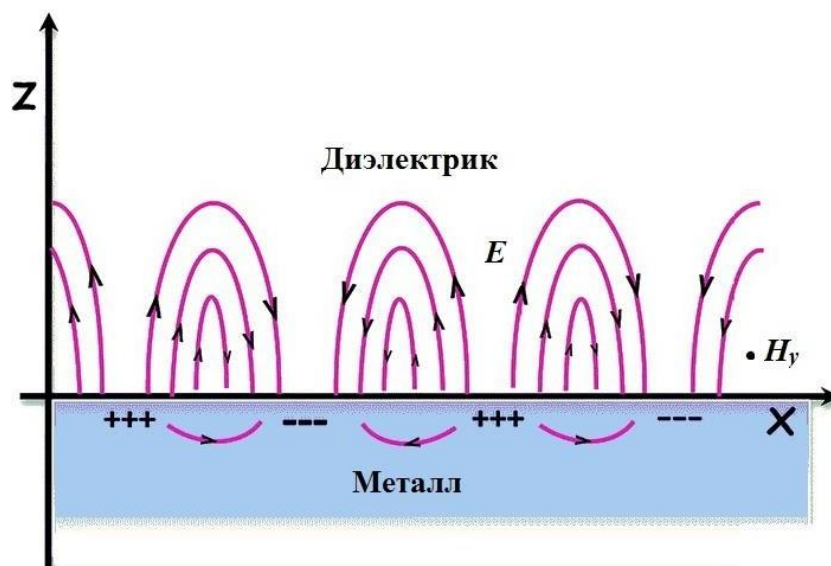
1.2 Сурет - Призманың бетіндегі беттік плазмонның Отто қозуының схемасы.

Кречман схемасы эксперимент жүргізушіге жарық сәулесінің түсу бұрышы өзгерген кезде шағылысқан сигналдың қарқындылығының өзгеруін бақылау арқылы призmanın бетіндегі плазмон-поляритонның қозуын байқауға мүмкіндік береді. Шынында да, көріп отырғаныңыздай (сурет. 1.3), толық ішкі шағылысу бұрышы деп аталатын критикалық бұрышқа жеткенде, шағылысқан сигналдың қарқындылығы қанығуға шығады және оқиға сигналының қарқындылығына тең болады (сіңіруді есептемегенде). Алайда, құлау бұрышының одан әрі ұлғаюымен беттік плазмонның резонанстық қозу шарты орындалуы мүмкін, ол оқиға сәулесінің толқындық векторының проекциясы беттік плазмонның толқындық векторымен сәйкес келеді. Бұл жағдайда шағылысқан сигналдың қарқындылығы нөлге дейін күрт төмендей бастайды (керемет контрастпен). Жарық сәулесінің түсу бұрышының одан әрі ұлғаюы жарықтың толқындық векторының проекциясының шамасын арттырады және резонанстық жағдай қайтадан бұзылады [34, 35].



1.3 Сурет - Кречман конфигурациясы үшін шағылысу коэффициентінің түсу бұрышына сипаттамалық тәуелділігі [34].

Бұл мінез-құлық сонымен қатар бұзылған толық ішкі шағылысу ретінде белгілі және жарық толқыны энергиясының беттік плазмонның энергиясына өтуін көзбен көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл жағдайда Кречман және Отто схемалары бойынша беттік плазмондардың қозуына түскен жарық шоғының екі ортогональды поляризациялық компоненттерінің біреуі ғана қатыса алатынын атап өткен жөн. Бұл төмендегі суретте көрсетілген беттік плазмондық поляритондарға тән электромагниттік өріс сызықтарының таралу заңдылығының ерекшелігімен түсіндіріледі [4, 11, 15].



1.4 Сурет - Беттік плазма поляритонының құрылымында электромагниттік өрістің таралуы.

Беттік плазмонның магнит өрісі ортаның интерфейсіне параллель және сурет жазықтығына перпендикуляр бағытталған. Электр өрісінің кернеулігі беттік электр зарядын қалыптастыру үшін қажет бетке қалыпты компонентке ие. Электр өрісінің күш сызықтары Максвелл теңдеулерінен туындайтын шекаралық жағдайларға сәйкес келеді. Нәтижесінде электр өрісі өткізгіштің бетінен алыстап кетеді, сондықтан беткі плазмонның энергиясы металл/диэлектрик шекарасына жақын шоғырланған. Бұл жағдайда электр өрісі металға тері қабатының тереңдігіне, ал диэлектрикке сәулеленудің толқын ұзындығының тереңдігіне енеді [4, 11, 15]. Осылайша, беткі плазмонның электромагниттік өрісі жер бетіне жақын орналасқан (қоздырғыш жарық толқынының өрісінен едәуір үлкен), ал одан қалыпты бағытта алыстаған кезде эванесцентті болады. Бұл қасиет нанооптикада кеңінен қолданылады, өйткені ол радиацияны субволн құрылымдары арқылы шоғырландыру және арналу [36].

ПП-ны қолдануға айтарлықтай шектеу олардың тек қалыпты бағытта ғана емес, сонымен қатар олардың таралу бағытында да жойылатындығымен байланысты. Бұл ыдырау металдың диэлектрлік өтімділігінде қиял бөлігінің болуымен байланысты, бұл электромагниттік толқын энергиясының диссипациясына әкеледі (омикалық шығындар). Күміс немесе алтын сияқты минималды омикалық шығындары бар өткізгіштер үшін спектрдің көрінетін бөлігіндегі РР таралу ұзындығы жүздеген МКМ құрайды, ИҚ диапазонында миллиметрге жетеді [37]. Бұл нано және микрометр ұзындықтарының жоғары интеграцияланған фотонды құрылғыларын жасау үшін жеткілікті.

Тегіс құрылымдардағы беттік плазмалық резонанс қазіргі ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады. Диэлектрлік ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруіне беттік резонанстың толқын ұзындығының жоғары сезімталдығы жоғары сезімтал сенсорларды құрудың алғышарты болды [2]. Металл бетінің биологиялық объектілермен функционализациясы қанның сандық және сапалық құрамын зерттеу сияқты биомедициналық қосымшалар үшін өлшеу кешендерін құруға мүмкіндік берді [16]. Беттік плазмалық резонанс арқылы электромагниттік өрісті локализациялау бірнеше онжылдықтар бойы спектроскопистердің арсеналындағы негізгі құрал болып табылатын беттік күшейтілген Раман спектроскопиясында қолданылады [38]. Сондай-ақ, беттік плазмондардың қозуының резонанстық сипаты лазерлерге ұқсас мәжбүрлі сәулеленуді ынталандыру механизмі бойынша спазмдардың пайда болуына ықпал етті [39].

Осындай шешімдердің бірі-талшықты жарық өткізгіштерді плазмалық резонанстың пайда болуына жағдай жасау үшін орта ретінде пайдалану. Оптикалық талшықтарды және арнайы талшықты оптикалық сәулелену көздерін кеңінен тарату және стандарттау беттік плазмондарды қоздыру үшін жарық өрісін конфигурациялау міндетін айтарлықтай жеңілдетеді. Сонымен қатар, талшықты оптиканың ұтқырлық, ықшамдылық және компоненттердің салыстырмалы түрде арзандығы сияқты классикалық артықшылықтары талшықты жүйелерге негізделген сенсорларды дамытуға үлкен мүмкіндіктер береді.

1.2 Оптикада беттік плазмонды резонанстың генерациясы талшықтар

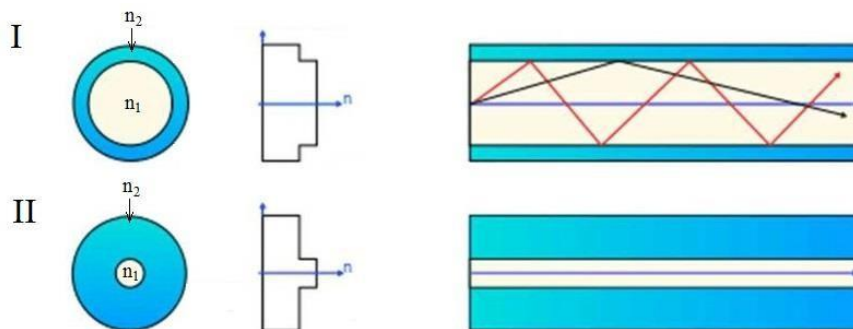
Оптикалық талшықтар беттік плазмонды қозу үшін жақсы орта болып көрінеді. Шынында да, талшықты жарық бағыттағышының өзі оптикалық сәулеленуді өткізетін диэлектрлік орта болып табылады. Оптикалық талшықтың жұмыс істеу принципі толық ішкі шағылысу әсеріне негізделген. Оптикалық талшықтың цилиндрлік құрылымында кварц шынысынан тұратын екі негізгі бөлік бар - өзек және қаптама. Өндіріс сатысында шыны торға біріктірілген қоспалардың болуына байланысты талшық өзегінің сыну көрсеткіші қаптаманың сыну көрсеткішінен жоғары болады, осылайша өзек арқылы таралатын

радиацияның толық ішкі шағылуын қамтамасыз етеді [40-43].

Талшықты жарық бағыттағышы оптикалық сәулеленуге арналған цилиндрлік толқын өткізгіш болып табылады. Оптикалық талшықта таралу үшін сәулелену режим ұғымымен, микротолқынды технологиядағы тікбұрышты толқын өткізгіштер режиміне ұқсастығымен сипатталады. Жалпы жағдайда талшық өзегі арқылы таралатын оптикалық сигналдың режимі талшық ішіндегі электромагниттік өрістің тұрақты күйі болып табылады, ол берілген құрылым үшін Максвелл теңдеуінің шешімі болып табылады [40–43]. Талшықты жарық бағыттағышының құрылымының өзі оның модальділігін, яғни жарық бағыттағышы қолдайтын әртүрлі режимдердің санын анықтайды. Схемалық түрде көпмодалы және бірмодалы талшықтың құрылымы 1.5-суретте көрсетілген. Оптикалық талшықтың модальділігі өзек пен қаптаманың сыну көрсеткішіне, өзек диаметріне және таралатын сәуленің толқын ұзындығына байланысты. Тәжірибеде талшықтың режимдік құрамын анықтау үшін төмендегі формуламен берілген «нормаланған кесу жиілігі» деп аталады:

$$V = 2\pi a \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (1.1)$$

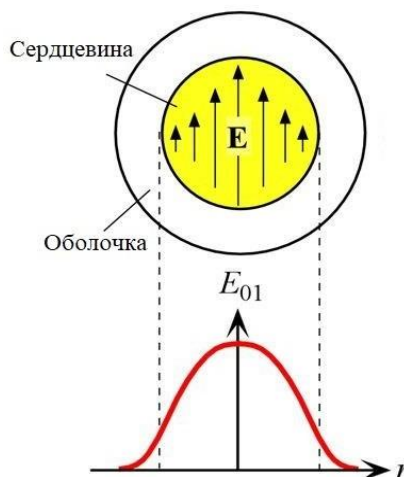
Мұнда V нормаланған кесу жиілігі, n_1 және n_2 сәйкесінше өзек пен қаптаманың сыну көрсеткіштері, a талшық өзегінің радиусы, λ - сәулелену толқын ұзындығы. Жалпы қабылданған, V мәні 2,405-тен төмен болғанда, талшық берілген толқын ұзындығында бір режимді режимде жұмыс істейді, яғни ол тек бір орталық симметриялық режимнің, осьтік сәуленің таралуын қолдауға қабілетті. [40-43]. Бұл сандық мән бірінші ретті Бессель функциясының нөлін шамамен есептеудің нәтижесі. Мұнда және одан әрі біз берілген толқын ұзындығында бір режимді Жарық өткізгіштерді ғана қарастырамыз, өйткені оптикалық сигналды бұрмалайтын әртүрлі режимдердің тормен өзара әрекеттесу ерекшеліктеріне байланысты Брэгг торларына негізделген сенсорлық құрылғылар тұрғысынан көп режимді толқындарды қолдануға болмайды.



1.5 Сурет - Оптикалық талшықтың құрылымы және ондағы оптикалық сәулеленудің таралуының схемалық көрінісі. I – көпмодалы талшық, II – бір режимді.

Құрылымына байланысты оптикалық талшықтар оптикалық сигналдарды

ұзақ қашықтыққа минималды қуат жоғалтумен беру үшін тамаша. Осылайша, стандартты Corning SMF-28e телекоммуникациялық жарық бағыттағышында 0,2 дБ/км-ден аз 1550 нм толқын ұзындығында сигналдың әлсіреу параметрі бар. Бұл, басқалармен қатар, талшықтың цилиндрлік беті арқылы оптикалық сәулеленудің ағуын азайтуға байланысты, бұл талшық бойымен таралатын сигнал өрісінің сипаттамалық таралуының тікелей салдары.



1.6 Сурет - Бір модты талшықтағы оптикалық сәулелену режимінің өрісінің таралуы.

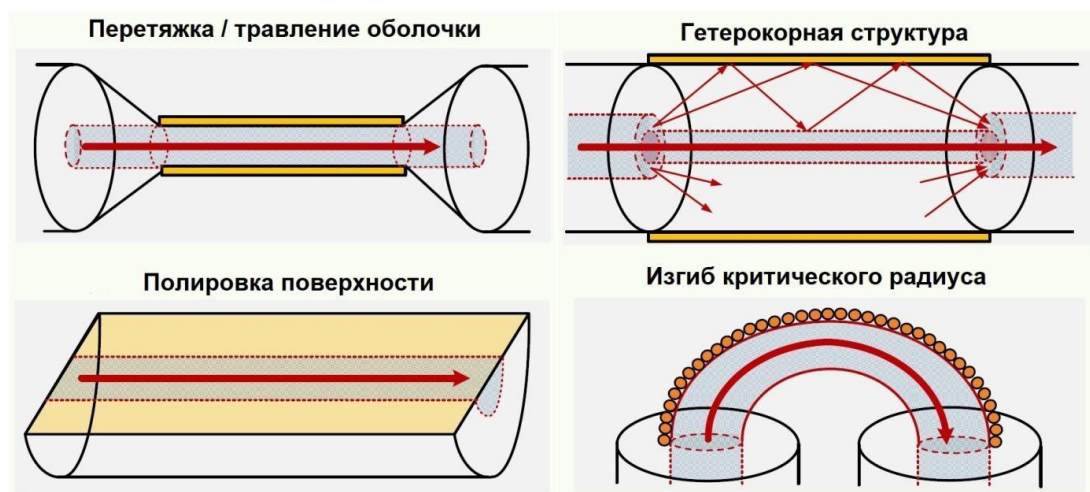
Суретте жарық сәулеленуінің энергиясы талшықтың цилиндрлік бетінің сыртқы шекарасына жақын жерде нөлге ұмтылатынын анық көрсетеді, бұл оның жарық бағыттаушы орта ретіндегі қасиеттерін айтарлықтай түсіндіреді.

Плазмондарды қозу үшін ең қолайлысы талшықтың цилиндрлік беті болып табылады. Оның ұзындығы 0,5 - 1 см болатын сипатты кесіндідегі ауданы талшықтың көлденең қимасының ауданынан әлдеқайда үлкен, сонымен қатар талшық арқылы таралатын радиация цилиндрге түскен кезде толық ішкі шағылысу шарттарын қанағаттандырады. Кречман схемасына эквивалентті талшықтағы жағдайларды қалпына келтіру үшін маңызды болып табылатын талшықтың беті. Оптикалық сәулелену энергиясын беттік плазмонға тиімді беру үшін жарық өрісінің едәуір бөлігі бетпен әрекеттесетін талшық құрылымында осындай өзгерістерді енгізу қажет.

Әдебиеттерде талшықтағы беттік плазмондардың генерациясына қажетті жағдайларды жасау үшін қолданылатын көптеген әдістер белгілі [8]. Бұл әдістерді шартты түрде үш топқа бөлуге болады: талшық геометриясын өзгерту, арнайы талшықтарды қолдану және фибр ішіндегі периодтық құрылымдарды жазу. Әр топты толығырақ қарастырайық.

Талшық геометриясына өзгертулер енгізу ең қарапайым шешім болып табылады. Бұл жағдайда оптикалық талшықты қабықты химиялық, механикалық немесе термиялық әдістермен толық немесе ішінара жоюға бағытталған көптеген әдістер бар. Төмендегі суретте талшықтың геометриялық модификациясының

негізгі жолдары көрсетілген.



1.7 Сурет - Талшықтың геометриясын өзгертудің негізгі жолдары.

Жоғарыдағы суретте көрсетілген барлық әдістер бірдей нәтижеге қол жеткізуге бағытталған - оптикалық талшықтың негізгі режимінің ішінара ағып кетуін қамтамасыз ету. Бұл жағдайда ағып кету режимі оптикалық талшықтың бетімен белсенді әрекеттесе бастайды, бұл оптикалық сәулелену энергиясын беттік плазмонға беруді бастауға мүмкіндік береді.

Талшық геометриясын өзгерткеннен кейін модификацияланған бет беттік плазмондарды генерациялауға жарамды металл қабатымен жабылады. Әдебиетте алтын жиі қолданылады, бірақ күміс пен мыс да қолданылады. Оптикалық талшықтардағы беттік плазмонды қоздырудың мұндай схемаларын таңдайтын зерттеушілер, әдетте, сезімтал аймақ арқылы өтетін кең жолақты сигналдағы өзгерістерді талдайды.

Сонымен, [7, 22, 44] еңбектерінде талшықты өзекке Жылтырату арқылы D-форма құрылымы жасалады. Плазма резонансы тегіс бетінде ядро мод энергиясынан тікелей қозғалады. Бұл ретте плазмондық резонанс сыртқы ортаның сыну көрсеткішімен анықталатын толқын ұзындығында кең шың түрінде осындай сенсорлардың өткізу спектрінде байқалады. Осы шыңның спектрлік позициясының өзгеруіне байланысты сыну көрсеткішіндегі өзгерістерді анықтауға болады. Мұндай сенсорлардың орташа сезімталдығы 3200 нм/RIU құрайды, бұл резонанстық шыңның орнын анықтаудың салыстырмалы түрде төмен дәлдігін біршама өтейді. Сыну көрсеткішінің сенсорларын жасау әрекеттері де, су ерітінділеріндегі бактериялар мен басқа заттарды анықтауға арналған иммуносенсорлардың орналасуы сияқты жоғары мамандандырылған әзірлемелер де бар.

Басқа жұмыстарда, мысалы, [19, 45] талшықты қаптау механикалық түрде жойылады, бұл да өзек режимдерінің сыртқы бетімен әрекеттесуіне әкеледі. Кейбір жағдайларда, мысалы [3], полимерлік жабынды алып тастау жеткілікті болатын мультимодальды талшық қолданылады. Сонымен қатар, жарияланған

рұқсаттардың диапазоны өте кең, көптеген жұмыстарда 10^{-4} RIU деңгейіндегі мәндер бар, бірақ кейбір жағдайларда $4 * 10^{-6}$ RIU [45] дейін көрсеткіштер жарияланған. Мұндай тәжірибелік үлгілердің орташа сезімталдығы 4000 нм/RIU құрайды, бұл D-тәрізді құрылымдармен салыстырғанда тіпті сәл жоғары. Мұндай сенсорлар сыну көрсеткішін тікелей өлшеу үшін де, теңіз суының тұздылығын анықтау, биологиялық сұйықтықтағы жекелеген белоктарды анықтау және басқа да көптеген нақты тапсырмалар үшін әзірленуде.

Механикалық түрлендіру әдістерінің айқын артықшылықтары орындаудың қарапайымдылығы және өлшемдердің тікелей сипаты болып табылады. Дегенмен, жиі мәлімделген сезімталдық пен рұқсаттың жоғары мәндеріне қарамастан, шын мәнінде, мұндай сенсорларды қолданатын өлшемдердің тиімділігі айтарлықтай шектеулі. Мұның себебі трансмиссиялық спектрдегі плазмондық резонанс шыңының айтарлықтай ені болып табылады, бұл спектрдегі резонанстың орнын дәл анықтау мәселесін шешуді өте қиын етеді. Ең жоғары ені жиі бірнеше жүз нм деңгейіне жетеді, мақалаларда $4 * 10^{-6}$ RIU деңгейінде көрсетілген рұқсат мәндері өте түсініксіз болып көрінеді.

Айта кету керек, кейбір авторлар сенсордың ажыратымдылық параметрін дұрыс түсіндірмейді. Шын мәнінде, эксперименттік нүктелердің стандартты ауытқуының үш есе шамасын алдын-ала белгілі сипаттамадан шешуге болады [46, 47]. Егер кейбір авторлар стандартты ауытқудың бір мәнін ажыратымдылық параметрі ретінде қолданған деген болжам қабылданса, онда нәтижелер әлдеқайда орынды болады.

[21, 48-52] талшықтар бөлігінің термиялық талшықтары 6–10 мкм тәртібі бойынша сипаттамалық қалыңдыққа дейін пайдаланылады. Бұл конфигурацияда режим өрісінің ені талшық қалыңдығынан асып түседі, бұл радиацияның ағуын және беттегі плазмондарға белсенді энергияның берілуін қамтамасыз етеді. Бұл жағдайда спектрдегі резонанс түрі және оның сыртқы орта параметрлерінің өзгеруімен мінез-құлқы D-формасына тән жағдайды толығымен дерлік қайталайды. Негізгі айырмашылықтар дәл осындай сенсорларды жасау технологиясында жатыр, мұнда тартылудың артықшылығы сән өрісінің бетімен өзара әрекеттесуін қарапайым және қайталанатын алу болып табылады, ал жылтыратудың артықшылығы – металл қабатын тегіс бетке қолдану, ал цилиндрлік бетті біркелкі жабуға қол жеткізу өте тривиалды емес. Жұмыстарда рұқсат 10^{-4} тен $2 * 10^{-5}$ RIU-ға дейін. Сенсорлар Сулы ерітінділердегі сыну көрсеткішін өлшеу, аналитиктерді нақты тану және биосенсорикада қолдану үшін термиялық тарту негізінде жасалады.

Гетерокоралық құрылым [20] қағаздарда кездеседі, мұнда өзегі кішірек немесе өзегі мүлде жоқ талшық бөлімі (әйнек жіп деп аталатын) өзек қалыңдығы үлкенірек талшық бөліктерінің арасына салынған. Мұндай конфигурацияда жеткізуші талшық өзегінен сәулеленудің бір бөлігі кірістірілген секцияның қаптамасына түседі (бұл жағдайда шыны жіпті өзегі жоқ қаптама ретінде қарастыруға болады), онда ол цилиндрлік бетпен әрекеттеседі. Осыдан кейін радиацияның бір бөлігі қабылдау аппаратурасына жету үшін шығыста талшықтың өзегіне қайтадан түседі. Осыдан кейін радиацияның бір бөлігі

кабылдаушы жабдыққа жету үшін шығудағы талшықтың өзегіне қайта түседі. Негізгі артықшылығы мұндай конфигурация – жаңадан өндірілуін құрылатын сенсорларды кезінде барынша жеңілдету дайындау технологиясы. Схеманың барлық элементтері стандартты сериялық компоненттер болуы мүмкін, сондықтан сенсорлар арасындағы айырмашылықтар минималды болады. Белгіленген артықшылыққа қарамастан, өзгертілген геометриясы бар схемалардың басты кемшілігі гетерокорлық құрылым жағдайында да көрінеді. Резонанстық шыңның үлкен ені оның спектрдегі орнын жоғары ажыратымдылықтағы сыну көрсеткішін өлшеу үшін жеткілікті дәлдікпен анықтауға мүмкіндік бермейді. Мұндай сенсорлардың ажыратымдылығы $2,1 \cdot 10^{-4}$ -тен $1,5 \cdot 10^{-5}$ RIU -ға дейін.

Талшықты иілу - радиацияның бір бөлігін бетке бағыттаудың ең табиғи жолы. Критикалық иілу бұрышы асып кеткенде, талшықтың өзегінде сәулеленудің таралу шарттары бұзылады және энергияның бір бөлігі қаптамаға түседі. Содан кейін талшықтың майысқан бөлігі беткі плазмнды қоздыру үшін плазмоникалық металл қабатымен жабылады. Мұндай шешімнің қарапайымдылығына қарамастан, бұл жолды бірнеше авторлар ғана ұстанған [5]. Сірә, бұл әдістеменің танымалдылығының төмендігі талшықтың иілген бөлігінде пайда болатын механикалық кернеулермен байланысты, бұл қайталанатын тәжірибелік жағдайларды құруға айтарлықтай кедергі болып табылады. Мұндай кернеулер сөзсіз қоздырғыш сәулеленудің поляризациясының асып кетуіне және нәтижесінде плазмнды резонанстық генерацияның ең күшті тұрақсыздығына әкеледі. Дегенмен, қол жеткізілген рұқсат деңгейі $3,8 \cdot 10^{-5}$ RIU әдебиетте айтылған. Осы типтегі датчиктер антиген-антидене принципі бойынша белоктарды селективті анықтау үшін биосенсорикада қолданылуы мүмкін.

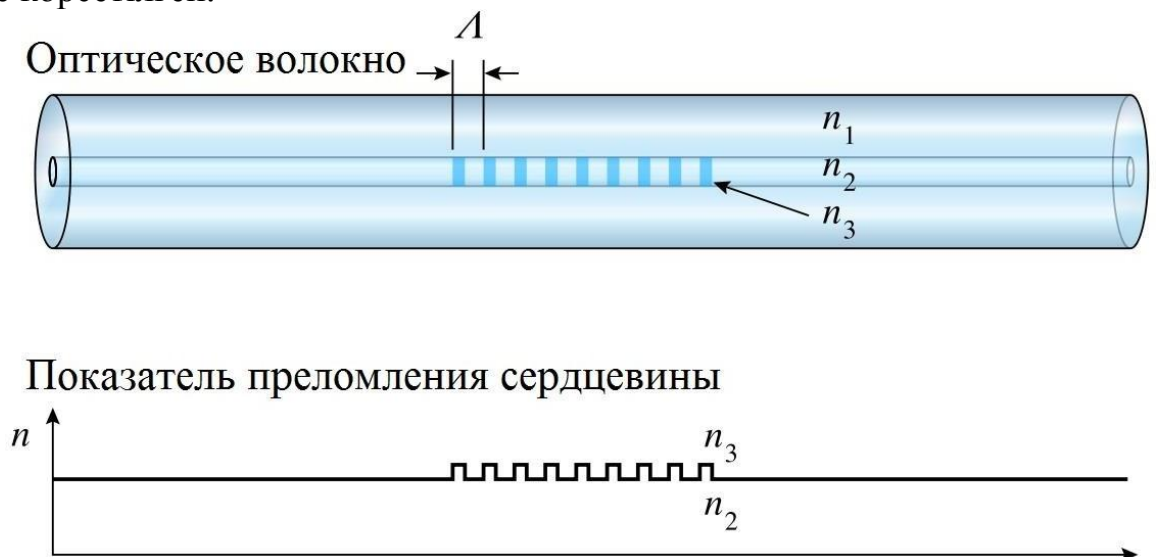
Талшықтың бетіне радиация әкелудің тағы бір табиғи әдісін кәдімгі соңғы үзіліс деп санауға болады. Шынында да, радиацияны талшықтың ұшы арқылы шығару оның бүйір бетінен қарағанда әлдеқайда оңай. Бұл әдіс [9] қолданылған. Дегенмен, талшықты бөлікті жеңілдету тұтастай алғанда дизайнның айтарлықтай күрделенуіне әкеледі. Мәселе мынада, мұндай конфигурацияда жарық сәулелену бағыты талшық ұшының жазықтығында таралатын беттік плазмндардың қозуына жол бермейді. Талшық ұшында беттік плазмндарды қоздыру арнайы құрылымдар-тұзақтар жасалады. Мұндай құрылымдардың сыртқы түрі төмендегі суретте көрсетілген.



1.8 Сурет - Талшық ұшындағы беттік плазмондардың қозуының периодтық құрылымы.

Бұл дизайнның күрделі сипаты тұтастай алғанда бұл әдістің төмен танымалдылығына әкеледі. Бұл ретте өлшеу параметрлерінде айтарлықтай артықшылық жоқ.

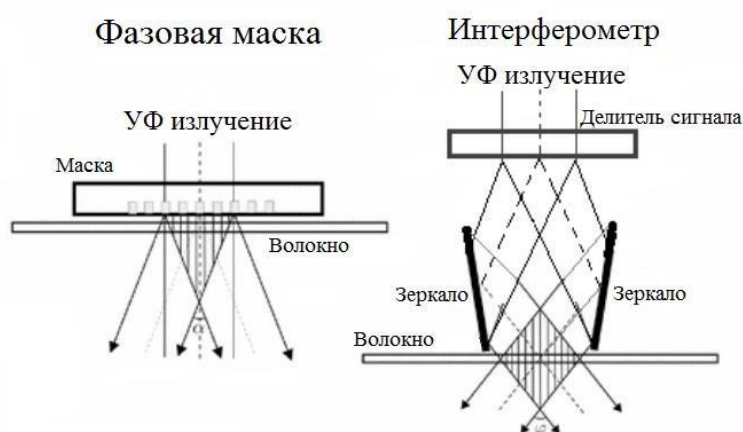
Интрафибер құрылымдарын жазу талшық геометриясының қарапайым модификациясына негізделген әдістерге неғұрлым күрделі, бірақ сонымен бірге перспективалы балама болып табылады. Талшықта жазылған құрылым туралы айтатын болсақ, әдетте ішілік торды білдіреді [45]. Шын мәнінде, интрафибер торы талшық өзегінің сыну көрсеткішінің мерзімді модуляциясы болып табылады. Көбінесе мұндай модуляция соққылар ретінде ұсынылуы мүмкін – сыну көрсеткішіндегі қадамдық немесе гармоникалық өзгерістер. Кәдімгі интрафибер торының штрихтары жарық бағыттағышының оптикалық осіне перпендикуляр орналасқан. Тор құрылымының схемалық көрінісі төмендегі суретте көрсетілген.



1.9 Сурет - Интрафибер торының құрылымы.

Интрафибрлі торды алу үшін фоторефрактивтік эффект деп аталатын механизм қолданылады. Фотосыну эффектісі – оптикалық сәулеленудің әсерінен оптикалық талшық материалының сыну көрсеткішінің тұрақты өзгеруі.

Ішкі тордың құрылымы, әдетте, ультракүлгін лазер сәулесінің көмегімен жасалады. Мұндай сәулеленудің әсерінен фотосезімтал талшықтар деп аталатын ядроның сыну көрсеткіші аздап өзгереді. Периодтық құрылымды құру үшін, атап айтқанда, талшық өзегі бойымен сыну көрсеткішінің модуляциясы, талшық өзегінде интерференциялық үлгі құру қажет. Ол үшін кеңістіктік интерферометрлердің технологиялары немесе фазалық масканы қолданатын технологиялар қолданылады. Бұл екі негізгі әдіс төмендегі суретте көрсетілген. Сыну көрсеткішінің ең үлкен өзгерісі кедергі көрінісінің максимумдарында болады. Фотосезгіш талшықты жарық өткізгіштерінде мұндай өзгерістер сәулеленуді алып тастағаннан кейін жойылмайды, бұл жазбадан кейін алынған торды пайдалануға мүмкіндік береді.



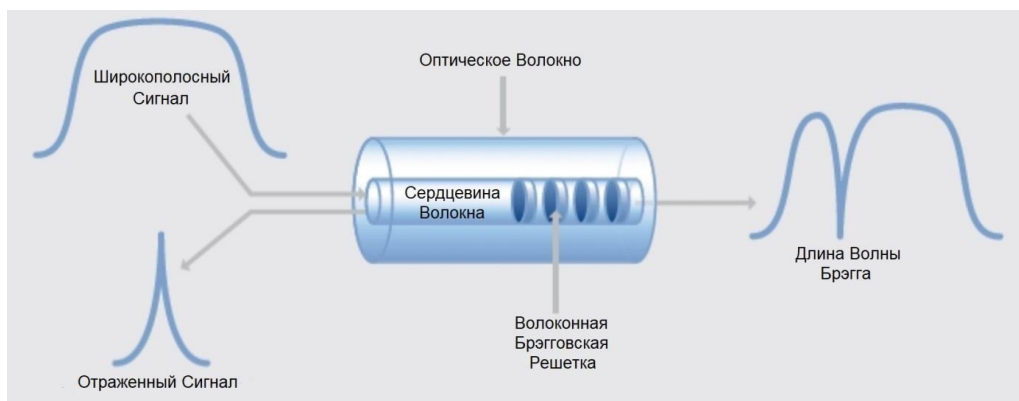
1.10 Сурет - Фоторефрактивтік эффект көмегімен интрафибр торларын жазудың негізгі әдістері.

Талшықты торлардың ең көп таралған ерекше жағдайы-бұл талшықты Брэгг торы (VBR). VBR-ге тән белгі-бұл кішкентай, толқын ұзындығының реті, модуляция кезеңі. Мұндай тор оптикалық талшықтың өзегінде пайда болған, таратылған Брэгг рефлекторы. Мұндай рефлекторды Брэгг-Вулф дифракциясымен белгілі кристалдың периодтық құрылымының бір өлшемді аналогы деп санауға болады. Брэгг торы оптикалық талшық арқылы таралатын сәулемен әрекеттесе алады. Бұл өзара әрекеттесудің нәтижесі-радиацияның бір бөлігін кері бағытта көрсету, бірақ тек белгілі бір толқын ұзындығында. Бұл толқын ұзындығы Брэгг деп аталады және тордың кезеңімен тікелей байланысты [48]. Қалған толқын ұзындығында Брэгг торы іс жүзінде мөлдір болады. Брэгг толқын ұзындығының тор кезеңімен байланысы формуламен өрнектеледі:

$$\lambda B = 2n\Lambda, \quad (1.2)$$

мұндағы Λ - тор сызықтары арасындағы қашықтық, n - ядроның таралу режимі үшін тиімді сыну көрсеткіші.

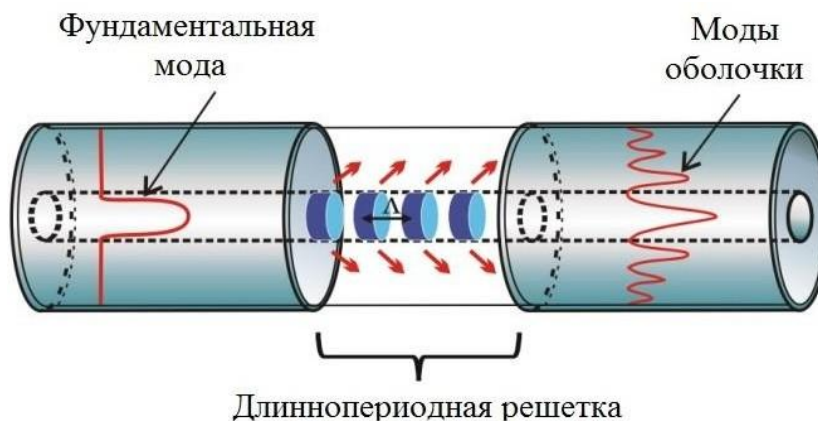
Осылайша, Брэгг торының шағылысу спектрі Брэгг толқын ұзындығындағы тар шың, ал өткізу спектрі сәйкес құлдырау болып табылады. Төмендегі суретте оптикалық талшықтың өзегі арқылы таралатын кең жолақты сигналдың ВБР-мен әрекеттесуі схемалық түрде көрсетілген.



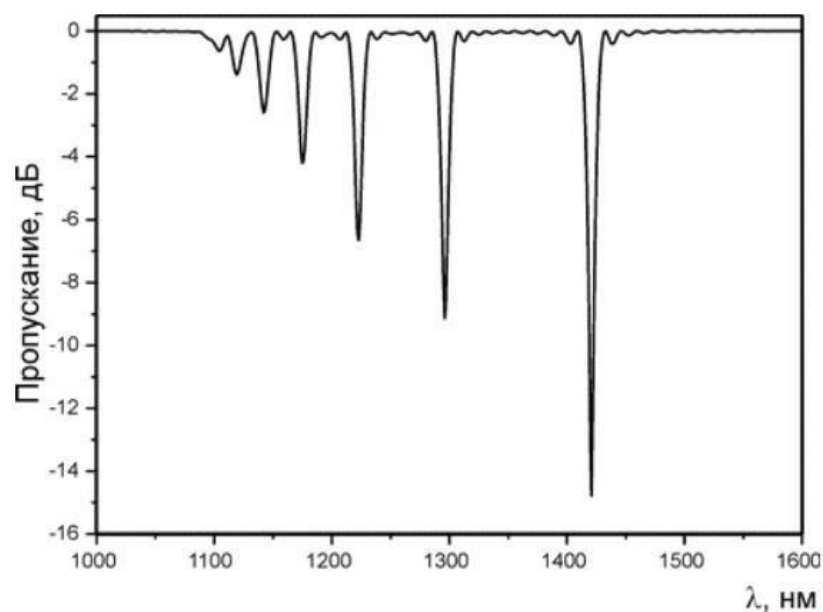
1.11 Сурет - ВБР-ның кең жолақты сигналмен әрекеттесуі.

Қарапайым Брэгг торы радиацияны талшық өзегінен шығармайды, сондықтан жер бетіндегі плазма генерациясында қолдануға жарамсыз. Плазмоникалық есептерде торлардың модификацияланған түрлері - көлбеу және ұзақ периодты қолданылады. Олар төменде талқыланады.

Ұзақ мерзімді тор - бұл ішкі тордың тағы бір түрі. Ол оптикалық сәулеленудің толқын ұзындығынан бірнеше есе үлкен соққылар арасындағы қашықтықпен сипатталады және әдетте миллиметрдің бір бөлігін құрайды. Брегг торларынан айырмашылығы, сәулеленудің ұзақ периодты тормен әрекеттесуі энергияның ядролық режимнен қаптау режимдеріне ауысуын бастайды, ол резонанстар қатары түрінде беріліс спектрінде байқалады [40]. Ұзақ мерзімді тордың құрылымдық ерекшеліктері мен сипаттамалық беру спектрі төмендегі суреттерде көрсетілген.

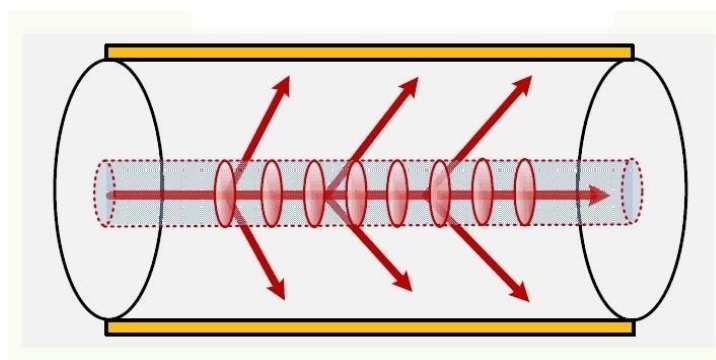


1.12 Сурет - Ұзақ мерзімді тордың құрылымы мен жұмыс істеу принципі.



1.13 Сурет - Ұзақ периодты тордың сипаттамалық берілу спектрі [39].

Қаптау режимдері талшықтың сыртқы шекарасына жететіндіктен, олардың энергиясын талшықтың бүйір бетінде тұндырылған жұқа металл қабықшадағы беттік плазмандарды қоздыру үшін пайдалануға болады. Бұл жағдайда геометриясы өзгертілген талшықтардағы сияқты талшықтың бір бөлігі плазмон металының қабатымен жабылған. Мұндай құрылымдарға негізделген сенсорлар жоғары параметрлерді көрсетуге қабілетті.

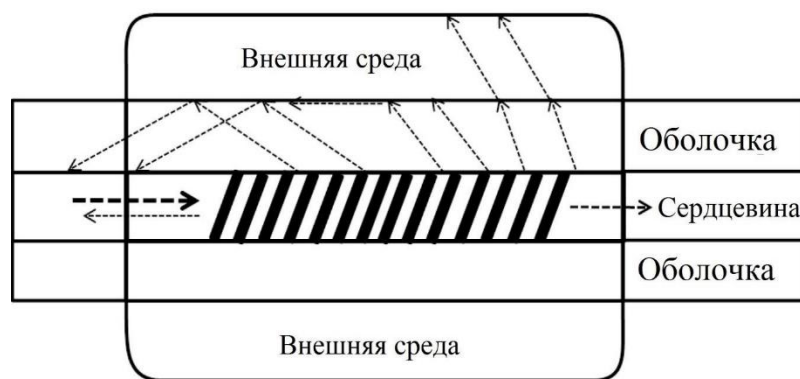


1.14 Сурет - Ұзақ периодты тордың көмегімен плазмонды резонанстық генерация.

Осылайша, [40] ұзақ мерзімді торлардағы құрылымдардың құрылысы авторларға сулы ерітінділердің сыну көрсеткішін өлшеу кезінде 10^{-5} RIU ретті рұқсатқа қол жеткізуге мүмкіндік берді. Бұл жағдайда, алайда, ұзақ периодты құрылымдар салыстырмалы түрде шағын толқын ұзындығы диапазоны үшін де спектр өзгерістерінің үлкен сызықты еместігімен сипатталады. Сонымен қатар, ұзақ мерзімді торларды қолдану қоздырылған қаптама режимдеріне сәйкес келетін спектрлік шыңдардың аз санымен және нәтижесінде өлшеулердің тар

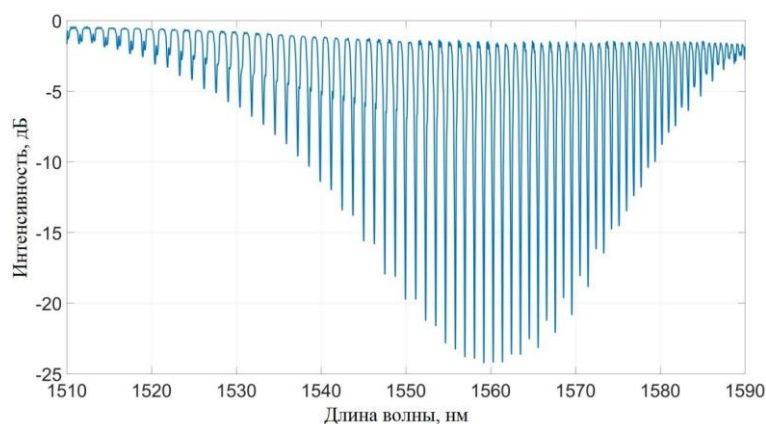
жұмыс диапазонымен қиындатады, бұл оларды плазмоникалық қолданбаларда ең танымал шешім болудан алшақ етеді.

Плазмалық сенсорда қолдануға болатын талшықты торлардың тағы бір түрі-көлбеу соққысы бар Брагг торы немесе көлбеу талшықты Брэгг торы (НФБР). Мұндай құрылым стандартты Брэгг торы болып табылады, оның штрихтары талшықтың осіне қатаң перпендикуляр емес, бірақ кейбір бұрыштарда жазылады. Мұндай тор Брэгг толқын ұзындығындағы жарық энергиясының бір бөлігін қарама-қарсы бағытта көрсетіп қана қоймайды, сонымен қатар сәулеленудің бір бөлігін қаптамаға шашыратып, қаптау режимдерін тудырады [43]. Қабық режимдері негізгі режимдердің бар принципіне ұқсас принцип бойынша бар. Олар үшін шекарада толық ішкі шағылысу шарты жарық өткізгіш қабығы / сыртқы орта орындалады. Бірақ мұндай режимдер энергияның сыртқы ортаға тез бөлінуіне байланысты ұзақ қашықтыққа тиімді түрде берілуі мүмкін емес. НВБР құрылымы мен жұмыс істеу принципі төмендегі суретте көрсетілген.



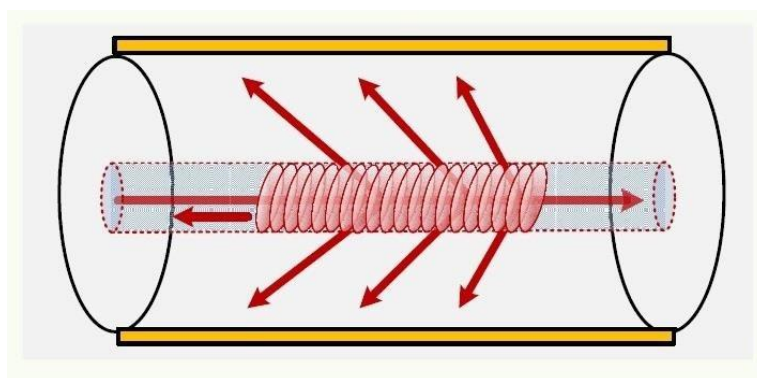
1.15 Сурет - Көлбеу Брэгг торының құрылымы мен жұмыс істеу принципі.

Трансмиссиялық спектрдегі көлбеу тор, Брегг толқын ұзындығындағы құлдыраудан басқа, сонымен қатар өзек режимінің қаптау режимдерімен әрекеттесуіне байланысты бірқатар шыңдар мен құлдырауларға ие. Мұндай өзара әрекеттесу деп аталатын бөлімде егжей-тегжейлі сипатталған біріктірілген режимдер теориясы. НВБР беру спектрінің пайда болуы көбінесе қаптау режимдерінің болу шарттарын анықтайтын сыртқы ортаның сипаттамаларына байланысты. НВБР-ге тән спектр төмендегі суретте көрсетілген.



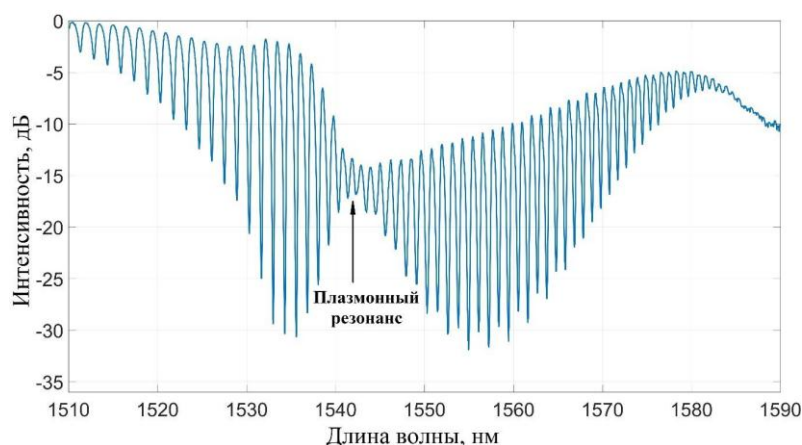
1.16 Сурет - Көлбеу Брэгг торының берілу спектрі. НВБР-тердің сыртқы ортаның параметрлеріне сезімталдығы олардың негізінде әртүрлі сенсорлардың дамуына әкелді [40].

Ұзақ периодты тордағыдай, талшық беті плазмоникалық металмен қапталғанда, қаптау режимінің энергиясының бір бөлігі беттік плазмондарды қоздыру үшін жұмсалады.



1.17 Сурет - НВБР көмегімен беттік плазмондарды генерациялау.

Беттік плазмалық резонанстың әсері ең қызықты түрде көлбеу тордың өткізу спектріnde пайда болатын "тартылыс" түрінде байқалады – режимдердің өзара әрекеттесуінің тән көрінісі жоғалып кететін тар жер.

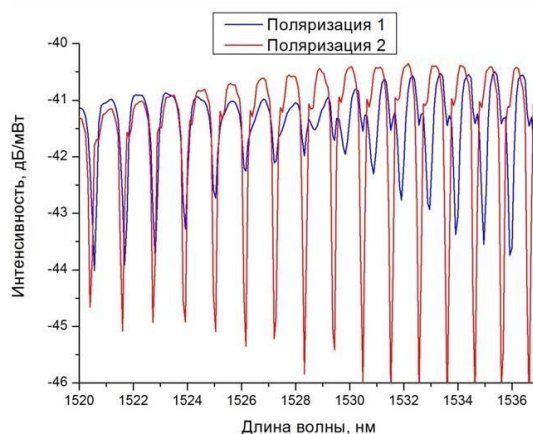


1.18 Сурет - Көлбеу Брэгг торының берілу спектріндегі плазмонды резонанс.

Спектрдегі тартылу орны плазмалық резонанстың толқын ұзындығына сәйкес келеді. Сыртқы орта сипаттамаларының өзгеруі салдарынан беттік плазмонның таралу жағдайлары өзгерген кезде спектрдегі тартылу жағдайы да өзгереді. Спектрдегі белдің орнын есептей отырып, сыртқы ортада болып жатқан өзгерістерді анықтауға болады.

Көлбеу торларда беткі плазмонды қоздыру талшықты плазмоникадағы ең перспективалы тәсілдердің бірі болып табылады. Әр түрлі схемалар мен қосымшалар келесі жұмыстарда кездеседі [6]. Сезімталдық сипаттамасының салыстырмалы түрде аз көлбеуіне қарамастан (орта есеппен 500 нм/RIU), мұндай сенсорлар ажыратымдылықтың ең жақсы параметрлерін көрсетеді (10-5 RIU және одан да жақсы) және сыну көрсеткішінің шағын диапазондағы өзгерісін дәл өлшеу үшін өте қолайлы. Осы құрылымның негізінде әртүрлі салаларда қолдану үшін сыну көрсеткішінің сенсорлары жасалады. Биосенсорика әсіресе "чиптегі зертхана" тұжырымдамасын жасау аясында танымал.

Кез келген схема сияқты, мұндай құрылым да кемшіліктерсіз емес. Негізгі мәселелердің бірі - плазмондық резонанстың үлгісіне қозғаушы оптикалық сәулеленудің поляризациясының әсері. Шынында да, көлбеу Брэгг торы оптикалық талшықтың цилиндрлік симметриясын бұзатындықтан, оптикалық сәулеленудің әртүрлі сызықтық поляризация компоненттері тормен басқа қатынаста әрекеттескеннен кейін талшық бетіне жетеді. Біздің есімізде, екі сызықтық поляризация құрамдастарының біреуі ғана беттік плазмонды қоздыруға қабілетті, сондықтан бұл екі поляризацияның спектрлік үлгісі айтарлықтай ерекшеленеді. Төмендегі суретте сәйкесінше талшықтың бетіне параллель және ортогональды полярланған сәулелену үшін көлбеу Брэгг торына негізделген плазмалық сенсордың берілу спектрі көрсетілген.



1.19 Сурет - Екі ортогональды поляризация күйі үшін бел аймағындағы плазмоникалық сенсордың берілу спектрі. 1 – ортогональды бүйір беті, 2 - параллель.

Көріп отырғанымыздай, параллельді поляризация жағдайында плазма резонансы мүлдем болмайды. Іс жүзінде бұл еңкейтілген Брэгг торларына негізделген жүйелерді эксперименттік қондырғы пайдаланылған сайын алдын ала баптау қажет дегенді білдіреді. Осы мақсатта механикалық поляризация реттегіші сияқты арнайы көмекші құрылғылар қолданылады.

Поляризацияны реттеудің өзі эксперименттік қондырғыда пайдаланылған кезде зертханалық жағдайларда салыстырмалы түрде қарапайым, бірақ жұмыс жағдайында нақты сенсор жағдайында түбегейлі қолданылмайды. Сонымен қатар, резонанс параметрлерінің поляризацияға тәуелділігінің тереңірек салдары бар, талшықтағы поляризацияның асқынуымен байланыстырылған аралық тор желісіндегі ақаулар және қалдық механикалық деформациялар мен уақыт бойынша микробүгілулер. Тәжірибеде бұл тәжірибелік қондырғыдағы тамаша реттелген поляризацияның өзі үнемі шағын өзгерістерге ұшырайтынын білдіреді, соған қарамастан, қағазда көрсетілген дәлдік шегінде сенсор көрсеткіштеріне елеулі бұрмаланулар әкеледі.

Егжей-тегжейлі көзқарасты қажет ететін тағы бір мәселе - көлбеу Брегг торының берілу спектріндегі плазмондық резонанстың орнын анықтау. (1.18) суреттен көрініп тұрғандай, спектрдің өзі көптеген жергілікті экстремалары бар біршама күрделі құрылым. Алайда, бұл экстремумдардың ешқайсысы спектрдегі резонанстың тікелей көрінісі емес. Керісінше, экстремум нүктелерінің жиынтығы бірігіп плазмондық резонанс жағдайындағы өзгерістерге жауап беретін конверт сипаттамасының суретін құрайды. Осы себепті резонанстың орнын анықтау бөлек қарастыруды қажет ететін тривиальды емес міндет болып табылады. Талшықты сенсордың спектріндегі резонанстың орнын анықтау дәлдігі көбінесе сенсордың дәлдігін анықтайды.

[5] сияқты жұмыстарда резонанс орнының өзгеруін анықтаудың негізгі механизмі резонанстық толқын ұзындығына жақын жатқан тордың бір немесе екі спектрлік шыңдарын пайдалану болып табылады. Бұл жағдайда өлшенетін параметр жеке шыңның амплитудасы, спектрдегі өзіндік орны немесе таңдалған

екі шыңның биіктік айырмашылығы болуы мүмкін. Нақты шыңдарды таңдау принципі логикалық түрде негізделген - сенсордың жұмыс диапазонындағы өзгерістердің ең үлкен амплитудасы бар шыңдар таңдалады. Бұл тәсіл сенсордың сезімталдық сипаттамасының максималды енісін, яғни қоршаған ортаның шамалы өзгеруіне ең үлкен реакцияны алуға мүмкіндік береді. Шынында да, қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің шамалы өзгерістері үшін мұндай әдістер салыстырмалы түрде жоғары ажыратымдылық пен анықтау шегін, 10^{-5} -ке дейін қамтамасыз ете алады [17].

Екінші жағынан, сыну көрсеткішінің үлкен өзгерістері үшін мұндай әдістерді қолдану елеулі қателіктерге әкелуі мүмкін, өйткені плазмонның резонанс толқын ұзындығының өзгеруіне байланысты басқа спектрлік шыңдарға ауысу қажет болады. Нәтижесінде сенсор көрсеткіштеріндегі монотондылық бұзылады және әдістің өзі әмбебап емес және әрбір сенсор мен әрбір өлшеу диапазоны үшін жеке калибрлеуді қажет етеді. Бұдан басқа, жеке спектрлік шыңдардың қарқындылығын анықтау әдістері көздің де, зонд сәулелену қабылдағышының да спектрлік шуына байланысты шектеулі дәлдік пен қайталану мүмкіндігін көрсете алады.

Плазмон резонансының спектрлік жағдайына айтарлықтай әсер ете алатын тағы бір әсер – сыну көрсеткішінің температуралық дисперсиясы [34]. Шынында да, кез келген ортада сыну көрсеткішінің температураға тәуелділігі бар, ол біздің жағдайда бірдей затты өлшеген кезде, бірақ әртүрлі температураларда НВБР спектріндегі резонанстың айтарлықтай басқа позициясында көрсетілуі мүмкін. Сонымен қатар, тіпті бір өлшеудің уақыт аралығындағы температураның өзгеруі нәтижеге айтарлықтай әсер етуі мүмкін, бұл, әрине, бөлек зерттеуді қажет етеді.

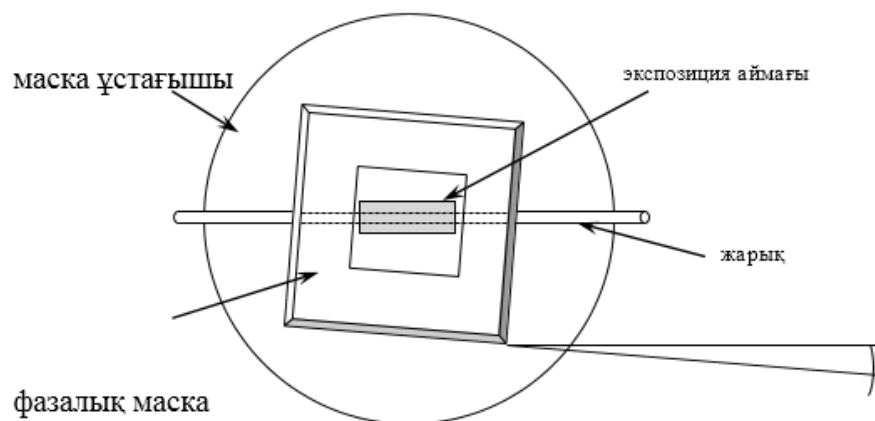
Ақырында, талшықтың цилиндрлік бетін қалыңдығы бірнеше ондаған нм алтын қабатымен біркелкі жабудың өзі жеке шешімді қажет ететін тривиальды емес мәселе болып табылады. Кейбір жұмыстар екі кезеңде екі жағынан біркелкі емес жабу кезінде де плазмоникалық талшықты датчиктердің жақсы өнімділігін көрсететініне қарамастан [25], мәселе өзектілігін жоғалтпайды. Талшықтың металл қабатымен қайталанатын біркелкі жабыны технологиясы трансмиссиялық спектрде байқалатын плазмондық резонанстың максималды контрастына қол жеткізуге мүмкіндік береді, бұл талшықты сенсор арқылы өлшеу дәлдігін арттырады.

2 ПЛАЗМОН РЕЗОНАНСЫН ЗЕРТТЕУДІҢ ТӘЖІРИБЕЛІК ӘДІСТЕРІ

2.1 Эксперименттік үлгілерді дайындау технологиясы

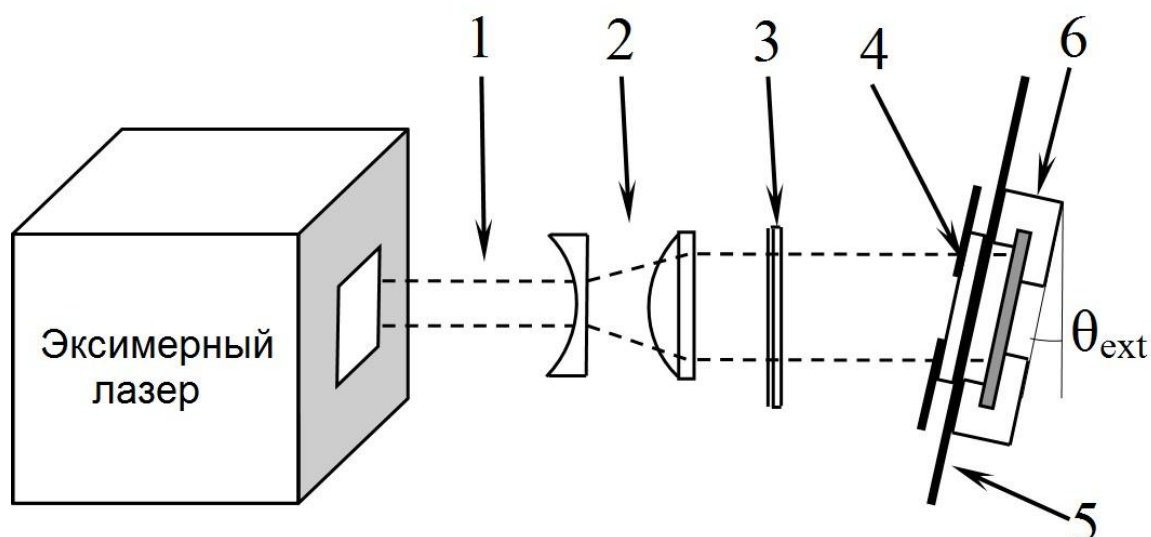
Жұмыста қолданылған талшықты датчиктердің барлық тәжірибелік үлгілері келесі технология бойынша зертханада шығарылды. Біз сенсор дизайнының талшықты бөлігінің негізі ретінде қиғаш штрихтары бар Брэгг торына негізделген оптикалық талшықтарда плазмонды резонансты алудың белгілі технологиясын алдық [6, 23-27]. Тор фазалық масканы пайдаланып толқын ұзындығы 193 нм ArF эксимер лазерінің сәулеленуі арқылы жазылды, ол стандартты Брэгг торларын жазу кезінде де қолданылады [48].

Брэгг торының қиғаш штрихтарын жасау үшін фазалық масканы пайдаланып екі жазу схемасын пайдалануға болады. Олардың бірі оптикалық талшықтың осіне қатысты фазалық масканы еңкейтуді қамтиды (2.1-сурет). Бұл жағдайда тор сызықтарының көлбеуі фазалық маскамен құрылған интерференциялық үлгінің еңісімен қамтамасыз етіледі. Екінші әдіс - маска жазықтығы мен жарық бағыттағышпен бірге лазерлік сәулелену фронтының жазықтығына бұрышпен бұру (2.2-сурет).



β

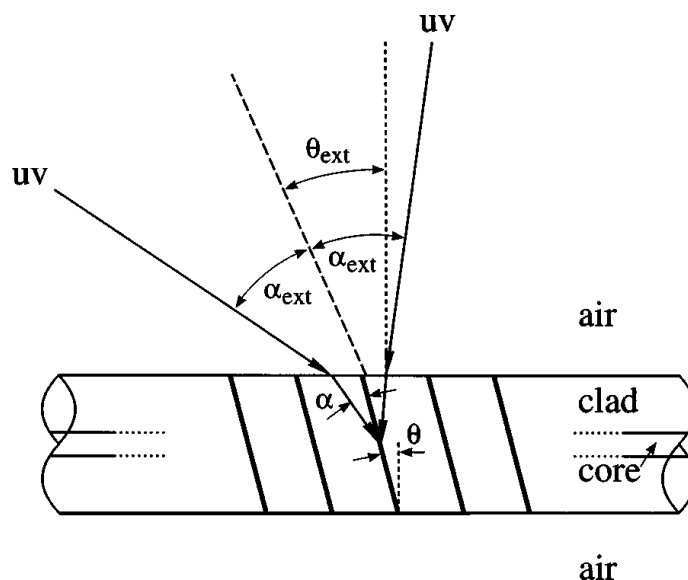
2.1 Сурет - Көлбеу фазалық масканы қолданып, еңкейтілген Брегг торын жазу схемасы.



2.2 Сурет - Брэгг торын қиғаш штрихтармен жазудың оптикалық схемасы. 1 – лазер сәулесі, 2 – сәулені кеңейткіш, 3 – цилиндрлік линза, 4 – фазалық маска, 5 – оптикалық талшық, 6 – ұстағыш, θ_{ext} – ұстағыштың көлденең жазықтықта лазер сәулесінің осіне бекіту бұрышы.

Тәжірибелік мәліметтердің нәтижелерін талдау екінші әдістің (2.2-сурет) тіркеу тиімділігі бойынша біріншіден (2.1-сурет) айтарлықтай жоғары екенін көрсетті. Бірінші әдіспен алынған Брегг торларының контрасты (беріліс спектріндегі жоғалту шырдарының максималды амплитудасы) салыстырмалы түрде аз болып шықты (3 дБ аспайды), сондай-ақ мұндай торларды жазу бойынша тәжірибелердің қажетті қайталану мүмкіндігі де болды. қамтамасыз етілмеген. Бұл лазер сәулесінің кеңістіктік когеренттілігінің шағын мәні факторына байланысты болуы мүмкін. Осылайша, талшықтар осіне қатысты фазалық масканың қисаюы талшық өзегінде кедергі үлгісін қамтамасыз еткенімен, оның контрастын нашарлатуы мүмкін.

Экцимер лазерінің лазер сәулесінің ерекшелігіне байланысты екінші сұлба (2.2-сурет) тиімдірек болып шықты. Маска ұстағышқа оптикалық талшық осіне қатысты еңкеюсіз бекітілді, ал жазылатын тор сызықтарының көлбеулігі ұстағыштың барлық құрылымын лазер сәулесіне қатысты бұру арқылы қамтамасыз етілді. Осылайша, жарық өткізгішінің ұстағышының жазықтығы лазер сәулесінің осіне перпендикуляр емес, көлденең жазықтықта θ_{ext} бұрышында орнатылды (2.2-сурет). Осы жазу әдісімен Брегг торын қалыптастыру схемасы 2.3 суретте көрсетілген. Талшықтар осіне қатысты Брегг торының θ сызықтарының соңғы көлбеу бұрышын мына формуламен есептеуге болады:



2.3 Сурет - Жазу кезінде көлбеу Брегг торының қалыптасу схемасы.

Тор стандартты Corning SMF-28e телекоммуникациялық талшықта жазылған. Торларды жазу тиімділігін арттыру үшін талшықты 48 сағат бойы 70 градус температурада 130 атм қысымда сутегімен алдын ала қанықтырды. Белгілі болғандай, талшықты сутегімен алдын ала қанықтыру тормен жазу үшін фоторефрактивтік әсердің әсерін күшейтудің тиімді әдісі болып табылады [40]. Соққы бұрышы 11° болды, ол фазалық масканың айналу бұрышына $\theta_{ext} = 17^\circ$ сәйкес келді. Айта кету керек, тордың ойық бұрышы болашақ плазмоникалық сенсордың жұмыс ауқымын анықтайды. Сызықшалардың көлбеу бұрышын ұлғайту жұмыс диапазонын Брегг толқын ұзындығының позициясымен салыстырғанда қысқа толқын ұзындықтарына ауыстырады. Бұрышты таңдау дистилденген суға сәйкес келетін сыртқы ортаның сыну көрсеткіші үшін сенсордың өткізу спектріндегі плазмалық резонанс көрінісінің максималды контрастымен негізделді. Сыну көрсеткішін анықтау бойынша эксперименттердің көп бөлігі су мен су ерітінділері негізінде жүргізілгендіктен, қолданылатын көлбеу бұрышы оңтайлы болды.

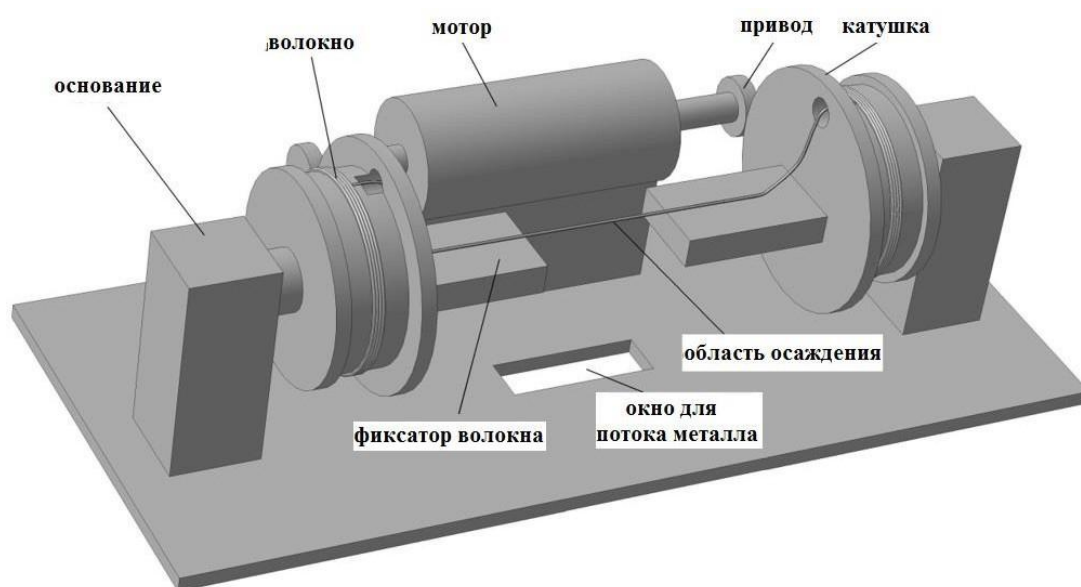
Өндірілген тәжірибелік үлгілердің көлбеу торлардың шыңдарының (1.16-сурет) сипаттамалық амплитудасы 12 - 20 дБ диапазонында жатыр. Кішірек амплитуда резонанс орнын қажетті дәлдікпен анықтау үшін жеткіліксіз контрастты қамтамасыз етті, ал 20 дБ-ден астам амплитуданы алу қабылдағыштың сезімталдық шегіне жетуіне байланысты шағылысқан сигнал бойынша жұмыс істейтін тізбектерде үлгілерді пайдалануға мүмкіндік бермеді. жабдық. Осылайша, көлбеу торлардың шыңдарының оңтайлы амплитудасы 16 дБ болды.

Келесі кезеңде металлды вакуумда термиялық шашырату арқылы торы бар оптикалық талшықтың беті алтын қабатымен жабылған [12]. Майдың диффузиялық сорғысының көмегімен ВУП-5 қондырғысының герметикалық

қақпағы астында (вакуумдық әмбебап пост) қысымы 10^{-5} атм болатын физикалық вакуум жасалды.

Бұрын айтылғандай, талшықтың цилиндрлік бетін металл қабатымен біркелкі жабу мәселесі өте өзекті болып табылады, бұл резонанс сипаттамаларына тікелей әсер етеді. Екі қарама-қарсы жақтан қаптау сияқты қол жетімді компромисстік шешімдер [25] алынған сенсорлардың параметрлерін айтарлықтай нашарлатады.

Біз плазмоникалық міндеттер үшін нысанды инновациялық жаңғыртуды жүзеге асырдық. ВУП-5 капотының астында буландырғыштардың үстіне орналастырылған талшықтың цилиндрлік бетін біркелкі жабу үшін айналмалы механизм жобаланған [12]. Айналу механизмінің схемасы төмендегі суретте көрсетілген.



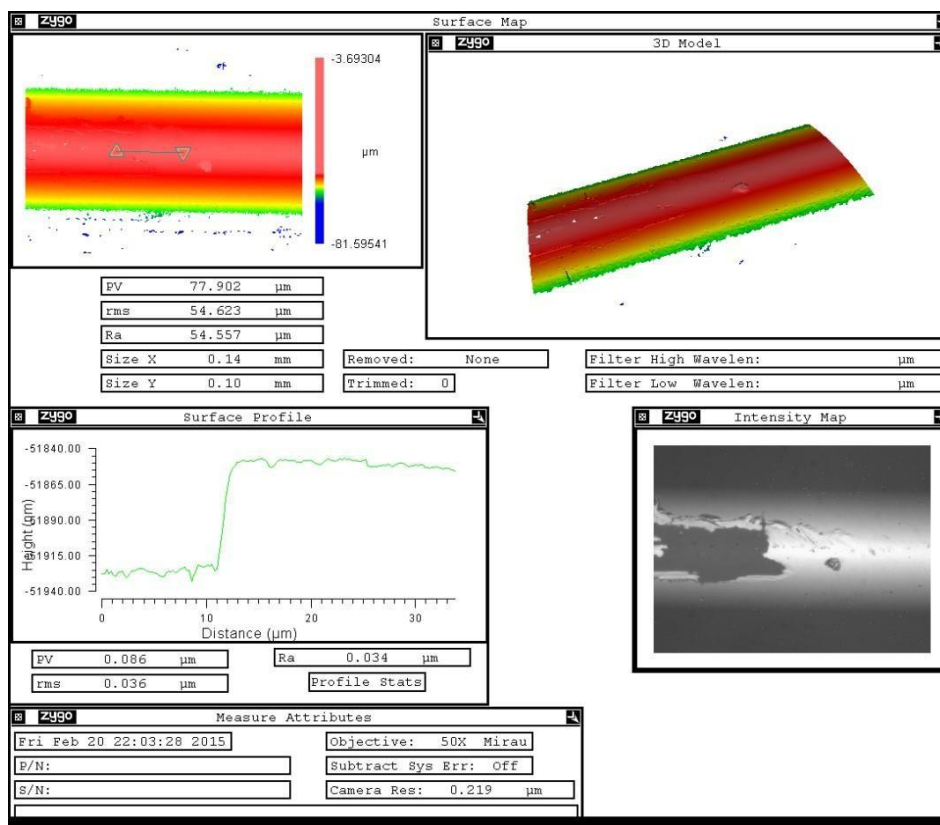
2.4 Сурет - Талшықты металл қабатпен жабудың айналмалы механизмінің схемасы.

Қозғалтқыш жұмыс істеп тұрған кезде тұндыру аймағы бар талшық бөлігі талшық осінің айналасында айналу сезінеді. Механизмнің астында термиялық металды буландырғыштар орналасқан. Буланатын металл ағыны тұндыру аймағына 3×1 см тар тікбұрышты терезе арқылы түседі. Бұл металл айналмалы талшықтың бетіне шөгеді.

Мұндай қондырғы нанометрлік қалыңдықтағы металл жабындарын және талшыққа біркелкіліктің жоғары дәрежесін қоюға мүмкіндік берді. Талшықтың барлық цилиндрлік бетіндегі металл қабатының біркелкілігі тәжірибе қондырғысындағы талшықтың айналу жылдамдығының арқасында қол жеткізілді, бұл кезде металдың булану уақыты бір айналым кезеңінен бірнеше есе көп болды.

Жұмыста қолданылған барлық үлгілер алтынның шыныға адгезиясын жақсарту үшін қалыңдығы 1-2 нм хром қосалқы қабатын пайдаланып,

қалыңдығы 40 нм алтын қабатымен қапталған. Алтын қабаттың оңтайлы қалыңдығы спектрдегі плазмалық резонанстың ең үлкен контрастын алу үшін есептелді. Қолданылатын қабаттың қалыңдығы бойынша Калибрлеу, сондай-ақ алтын жабынның біркелкілігін бақылау Zygo атомдық күш микроскопының көмегімен жүзеге асырылды. Осындай микроскоппен үлгілердің бірін өлшеу кезінде алынған мәліметтер төмендегі суретте көрсетілген.



2.5 Сурет - Атомдық күштік микроскоптың көмегімен алынған алтын қабатының қалыңдығы мен біркелкілігін өлшеу нәтижесі.

Жоғарыда сипатталған технологияны қолдана отырып, жұмыс барысында талшықтардың әртүрлі түрлерінде 300-ден астам датчиктер алынды. Бұл сенсорлар эксперименттер мен өлшемдерде қолданылған, олардың көпшілігі төменде сипатталған.

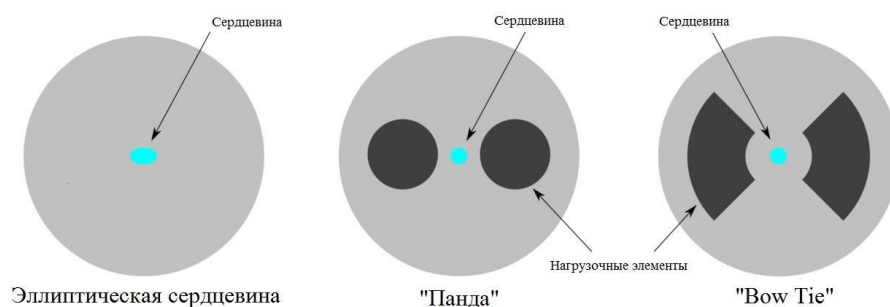
2.2 Талшықты плазмоникалық датчиктердің параметрлерін зерттеудің тәжірибелік әдістемесі

Оптикалық талшықтар базасында плазмалық сенсорлардың параметрлерін жан-жақты зерттеу үшін түрлі эксперименттер сериясы дайындалды және өткізілді. Алғашқы тәжірибелер үлгілердің жұмысын тексеруге және сенсорлардың сыну көрсеткішінің өзгеруіне сезімталдығын бағалауға арналған.

Олар Петри шыныаяқтары сияқты үлкен ашық контейнерлерде өткізілді. Берілетін сигнал спектрі Agilent 86140B зертханалық оптикалық спектроанализаторымен талданды. Оптикалық сигнал көзі ретінде кең жолақты суперолюминесцентті диод қолданылды.

Жоғарыда айтылғандай, қазіргі заманғы сенсорлардың негізгі мәселелерінің бірі - таралатын жарықтың поляризация күйінің сенсор көрсеткіштеріне әсері. Таратушы талшықтың ең аз механикалық деформациялары да таралатын сәулеленудің поляризация күйін өзгерте алады.

Дегенмен, поляризацияланған сәулеленумен жұмыс істеуге арналған талшықтардың арнайы түрлері де бар. Поляризацияны сақтайтын талшық (Polarization maintaining fiber – PMF) – құрылымында жасанды индукцияланған қос сынуы бар оптикалық толқын өткізгіш. Қос сыну дөңгелек (панда) немесе тікбұрышты (“bow-tie”) жүктеме элементтерін қосу арқылы немесе өзек пішінін эллиптикалық етіп өзгерту арқылы қол жеткізіледі. Схемалық түрде поляризацияны сақтайтын талшықтардың негізгі түрлерінің көлденең қима құрылымдары төмендегі суретте көрсетілген.



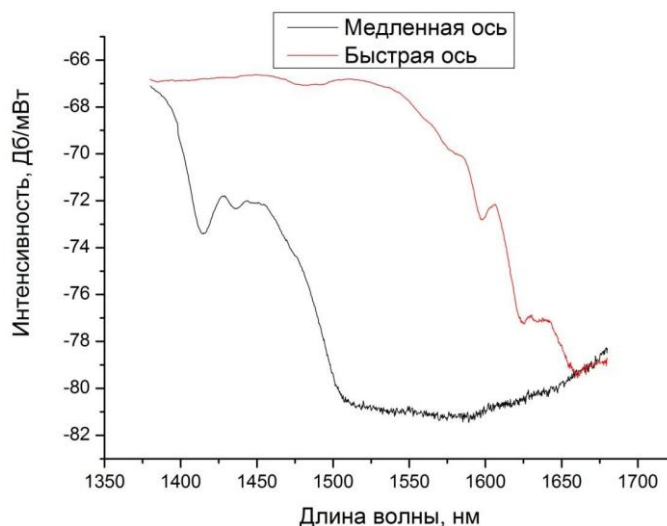
2.6 Сурет - Поляризацияны сақтайтын талшықтардың негізгі түрлері.

Мұндай талшықтардың барлығының жұмыс істеу принципі бірдей – жасанды анизотропияның арқасында оларда жылдам және баяу оптикалық осьтер түзіледі. Егер сызықты поляризацияланған оптикалық сәулеленудің поляризация осі жылдам немесе баяу оське сәйкес келсе, онда поляризация сақталады. Мұндай құрылымда екі поляризацияның оқшаулануы неғұрлым күшті болса, соғұрлым екі жақты сыну шамасы Жарық өткізгіштің құрылымымен қамтамасыз етіледі. Бұл принциптің тиімділігі табиғи ақаулар мен микро-иілімдердің әсері поляризацияны сақтайтын талшықтағы әсерге қарағанда анизотропияны әлдеқайда аз әсер етеді.

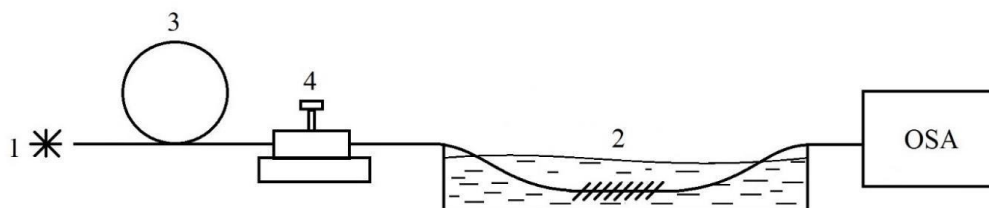
Поляризацияны сақтайтын талшықтардағы Брэгг құрылымдарын жазу жеке күрделі жұмыс болғандықтан, тәжірибелерімізде бірінші кезеңде эксперименттік қондырғының конструкциясының компромисстік нұсқасын қолдандық. Жарық көзінен кейін бақыланатын және тұрақты поляризацияны алу үшін талшықты поляризатор шығарылды және орнатылды, ол жеткізу талшығында поляризатор және поляризациялық тұрақтандырғыш ретінде әрекет етеді.

Жасалған талшықты поляризатор оптикалық сәулеленуді поляризациялайтын арнайы талшық болып табылады. Мұндай талшықтың жұмыс істеу принципі мен құрылымы поляризацияны сақтайтын талшықтармен дерлік бірдей, алайда қос сыну осінің бірінің бойындағы сәулелену басылады, соның арқасында мұндай талшықтың шығуында бір ғана сызықтық поляризация компоненті болады. 2.7-суретте айдалатын жарықтың екі түрлі сызықтық поляризациясы үшін осындай талшықтың өту спектрі көрсетілген.

Ұзындығы шамамен 0,5 м болатын осындай талшықтың кесіндісі қондырғыға енгізілген. Сезімтал элемент поляризатор талшығының шығысына дәнекерленген стандартты изотропты талшықтың қысқа бөлігінде жазылған. Поляризацияны дәл реттеу үшін механикалық зертханалық поляризация реттегіші пайдаланылды. Эксперименттік қондырғының бұл дизайны эксперименттер кезінде сенсор көрсеткіштерінің жеткілікті жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етті. Орнату схемасы 2.8-суретте көрсетілген.



2.7 Сурет - Екі ортогональды поляризация үшін поляризатор талшығының берілу спектрі.



Сурет 2.8 – Ашық Петри табақшасының көмегімен сенсордың сипаттамаларын зерттеуге арналған эксперименттік қондырғы. 1 - кең жолақты сәулелену көзі, 2 - зерттелетін сұйықтықтағы сезімтал элемент, 3 - талшықты поляризатор, 4 - поляризация контроллері, OSA - оптикалық спектр анализаторы (Agilent 86410B).

Орнату сенсордың бейорганикалық сұйықтықтардың сыну көрсеткішіне

сезімталдығын зерттеу үшін пайдаланылды. Бірінші кезеңде өлшеулер 10 мл тазартылған суда жүргізілді. Әрбір өлшеуден кейін ыдысқа 40 мкл изопропанол (судың бастапқы көлемінің 0,4%) қосылды. Алынған ерітіндінің көлемдік концентрациясы келесі формула бойынша есептелді:

$$\varphi = \frac{0,004 * k}{1 + 0,004 * k}, \quad (2.1)$$

мұндағы k – бастапқы сұйықтық көлемінің 0,4% тең көлемдегі изопропанол қоспаларының жалпы мөлшері. w массалық үлесін есептеу үшін (4) формула аралас сұйықтықтардың тығыздықтарын ескере отырып түрлендіріледі:

$$w = \frac{0,004 * k * \rho_i}{1 * \rho_w + 0,004 * k * \rho_i} \quad (2.2)$$

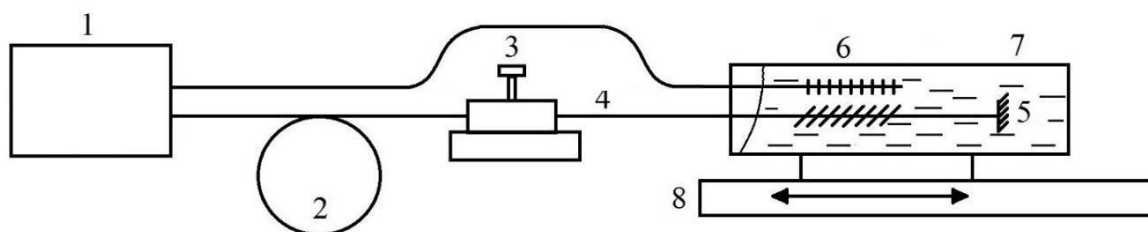
қайда ρ_i ж ρ_w сәйкесінше изопропанол мен судың тығыздығы. Әртүрлі концентрациялар үшін сыну көрсеткішіндегі сәйкес өзгерістер әдебиеттерден алынды [37]. Әдебиеттерде изопропил спиртінің сулы ерітінділерінің ИК диапазоны үшін сыну көрсеткішінің абсолютті мәндері туралы ақпарат жоқ екенін атап өткен жөн. Дегенмен, сыну көрсеткішіндегі салыстырмалы өзгерістерді жұмыста орындалған көрінетін диапазонға арналған деректерден ИК аймағына экстраполяциялауға болады.

Эксперименттер жүргізу үшін Петри тостағандары сияқты ашық сыйымдылықтарды пайдалану зерттелетін сұйықтықтың құрамына датчикті алып тастамай жедел өзгерістер енгізу үшін ыңғайлы. Алайда, жоғарыда айтылғандай, ашық ұяшықтарды пайдалану эксперименттердің төмен дәлдігіне әкелуі мүмкін бірқатар кемшіліктерге ие. Мысалы, сенсорды бекітудің екінші нүктесі бекіту нүктелері арасында орналасқан талшық бөлігінің механикалық тербелістеріне байланысты сигналдың бұрмалану көзі болуы мүмкін. Сонымен қатар, жабық контейнерлердегі сұйықтықтың аз мөлшерімен жұмыс істеу үшін екі терминалы бар сенсорды пайдалану мүмкін болмайды. Бұл мәселені шешу үшін біз сенсордан шағылысқан сигналды сканерлеу үшін орнатуды одан әрі өзгерттік. Бұл бізге сенсорды бекітудің екінші нүктесінен аулақ болуға мүмкіндік берді, ал сенсордың өзі кішкентай ыдыстарда терминал зонд ретінде пайдаланылды. Екінші бекіту нүктесі бекіту нүктелері арасында орналасқан талшық бөлігінің механикалық тербелістеріне байланысты сигналдың бұрмалану көзі болуы мүмкін.

Орнату схемасы 2.9 суретте көрсетілген. Көлемі 0,7 мл цилиндрлік түтік зерттелетін ерітінді үшін жұмыс сыйымдылығы ретінде пайдаланылды. Сенсор спектрін талдау үшін жұмыс үстеліндегі оптикалық спектр анализаторының орнына портативті спектрометр қолданылды-MicronOptics sm-125-200 талшықты интеррогатор (1 суретте.2.9). Интеррогатор шағылысқан сигналмен

жұмыс істейді. Оптикалық сигнал көзі ретінде кірістірілген сканерлеу лазері қолданылды. Интеррогаторда 4 тәуелсіз оптикалық канал бар, олардың біреуіне плазмалық сенсор қосылған. Стандартты тікелей Брэгг торы басқа арнаға қосылды. Бұл тор резервуар ішіндегі плазмалық сенсордың жанында болды және температура сенсоры ретінде пайдаланылды. Жеткізу талшығының конфигурациясы өзгеріссіз қалды. 2.8-суретте көрсетілген қондырғының алдыңғы нұсқасындағыдай, жаңа модификацияда талшықты поляризатор (2) және зертханалық поляризация контроллері (3) қолданылды. Датчикті пробиркаға бір мәнді және қайта жаңғыртылатын енгізу үшін соңғысы механикалық моторлы қозғалтқышқа орнатылды (8).

Жоғарыда бірнеше рет айтылғандай, НВБР негізіндегі сенсордың берілу спектрінде плазмондық резонансты дәл байқауға болады. Шағылысқан сигнал бойынша өлшеулерді жүргізу үшін схемаға қосымша элемент, талшықты айна (5) қосылды. Бұл айна шашыраған мыс қабықшасы бар тегіс ұшы. Айнаны механикалық зақымданудан қосымша қорғау үшін ол лак қабатымен жабылған. Бұл конфигурация сенсорды сұрау үшін сұраушы арнаны пайдалануға мүмкіндік берді.



2.9 Сурет - Шағылған сигнал бойынша жұмыс істейтін датчигі бар эксперименттік қондырғының схемасы. 1 – төрт каналды сұраушы, 2 – талшықты поляризатор, 3 – механикалық поляризация реттегіші, 4 – плазманикалық датчигі бар талшық, 5 – талшықтың соңындағы металл айна, 6 – температура датчигі бар талшық, 7 – пробирка, 8 - моторлы сырғытпа.

Қосымша Брэгг сенсорын қолдана отырып, біз температураның плазмалық сенсор көрсеткіштеріне әсерін анықтай алдық, сонымен қатар сенсор осы конфигурацияда тіркей алатын сұйықтықтың сыну көрсеткішінің минималды өзгеруін анықтай алдық. Кез-келген ортада сыну көрсеткішінің температуралық дисперсиясы болатыны белгілі. Біздің сенсорымыз үшін бұл зерттелетін сұйықтықтың температурасы өзгерген кезде оның сыну көрсеткіші сөзсіз өзгереді, бұл плазмалық резонанстың спектрлік орнын өзгерту арқылы сигнал спектріне әсер етеді. Барлық плазмалық датчиктер сыну көрсеткішінің температуралық дисперсиясы бар ортамен қандай-да бір түрде жұмыс істейтіндіктен, мұндай датчиктер үшін температураның өзгеруіне нақты реакция емес, бүкіл жүйенің реакциясы сенсор болып табылады. Осылайша, 2.9 -суретте келтірілген қондырғы зерттелетін сұйықтықтың сыну көрсеткішінің өзгеруін де,

қоршаған ортаның температуралық өзгерісін де ескеруге мүмкіндік берді.

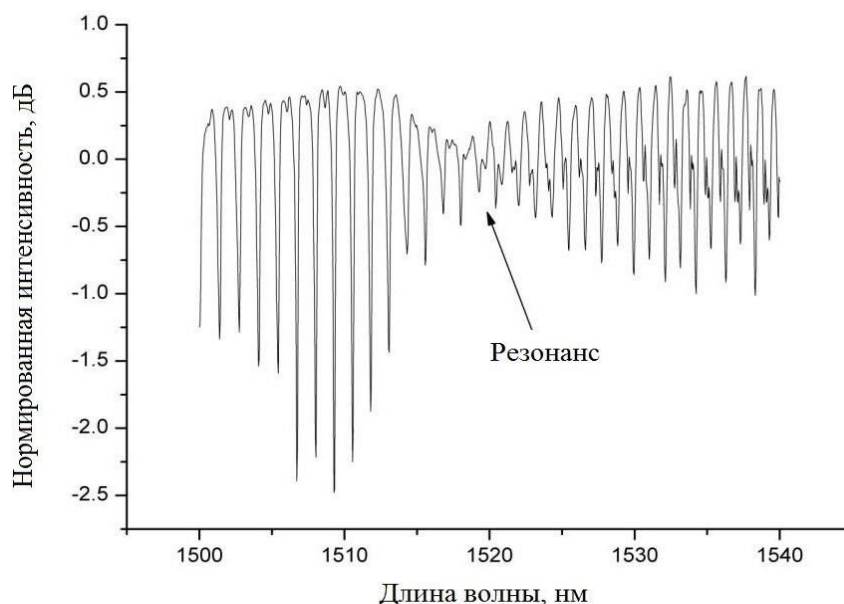
Плазмоникалық талшықты датчиктерді практикалық қолдану үшін олардың зертханалық жағдайлардан тыс жоғары тұрақтылығын алу өте маңызды. Бұл аспектіде зертханалық поляризация реттегішін пайдалану мүмкін емес, өйткені ол өлшеулердің әрбір сериясы алдында және сенсордың орнын өзгерткен кезде поляризацияны үнемі дәл реттеуді қажет етеді. Бұл мәселенің шешімі стандартты телекоммуникацияның орнына поляризацияны сақтай отырып, талшықты жарық өткізгішті пайдалану болуы мүмкін. Жоғарыда айтылғандай, мұндай талшықтарға көлбеу соққылармен Брэгг құрылымдарын жазу өте қиын. Бұл, ең алдымен, жазу кезінде талшықты жарық өткізгішті дәл бағдарлау қажеттілігіне байланысты. Мәселе талшықты жарық өткізгіштің әртүрлі бағытта деформациясы кезінде иілу шығынын талдау арқылы шешілді, бұл Брэгг торын жазу кезінде жарық өткізгішті ұстағышқа бағыттауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің басым міндеттерінің бірі поляризациялық дрейфтің байқалатын резонанс сипаттамаларына әсерін барынша азайту болды. Әдебиетті шолу кезінде анықталғандай, авторлардың басым көпшілігі SMF-28 сияқты стандартты телекоммуникациялық талшықтарды пайдаланған. Мұндай талшықтарда поляризация шыны тордағы көптеген ақауларға, сондай-ақ кез келген ұзындықтағы талшықты кесінді төсеу кезінде сөзсіз пайда болатын көптеген микробұйымдар мен кернеулерге хаотикалық түрде өтеді. Бұл мінез-құлықтың табиғилығы талшықтың изотропиясымен, оның цилиндрлік симметриясымен байланысты.

Плазмондық резонансқа поляризация әсерін азайту мақсатында жұмыс барысында қабылданған шешімдердің бірі поляризацияны сақтайтын талшықта плазмонды резонансты тудыруға жағдай жасау болды. Бұл шешім, ең алдымен, поляризацияны сақтайтын талшықта НВБР жазуын білдіреді. Талшықтардың қос сыну осьтерінің өзара бағдарына және Брэгг торының көлбеу жазықтығына ерекше назар аудару керек. Сонымен қатар, мұндай талшықтардағы көлбеу тордың жазылуы соңғысының апертурасының жоғарылауымен қиындайды, бұл сайып келгенде спектрлік үлгінің контрастына әсер етуі мүмкін.

Поляризацияны сақтайтын талшықта НВБР-ді сәтті жазу қисайған Брэгг торларына негізделген жоғары тұрақты плазмалық талшықты датчиктерді дамыту үшін кең перспективаларды ашады. Мұндай тәсілді пайдалану мұндай сенсорлардың рұқсаты мен дәлдігін айтарлықтай арттыруы мүмкін.

2.10-суретте поляризацияны сақтайтын талшықта жасалған талшықты плазмоникалық сенсордың өткізу спектрі көрсетілген. Спектрдің орталық аймағында сенсорлардың осы түріне тән спектрлік «таралу» бар. Айта кету керек, мұндай сенсор үшін спектрлік үлгінің сапасы мен контрасты SMF-28-де жазылған сенсорға қарағанда айтарлықтай төмен. Дегенмен, поляризацияны сақтайтын талшық әртүрлі бөгде әсерлерге әлдеқайда тұрақты сенсорды алуға мүмкіндік береді.



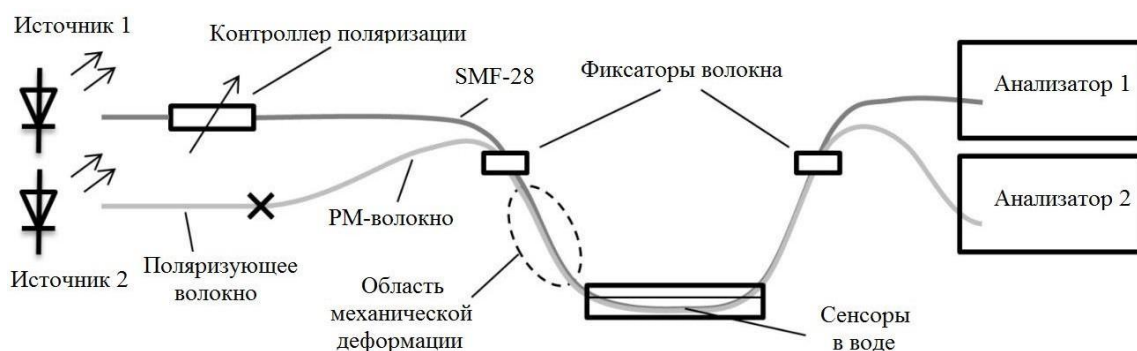
2.10 Сурет - Поляризацияны сақтайтын талшыққа негізделген талшықты плазмоникалық сенсордың берілу спектрі.

Талшықта поляризацияны сақтаумен қатар, оптикалық сәулеленуді поляризациялаудың өзі плазмонды қолдану үшін де өзекті мәселе болып табылады. Мәселенің өзектілігі спектрді талдаудың зертханалық құралдарында қолданылатын полярланған көздердің көпшілігінің жетілмегендігімен байланысты. Шынында да, мұндай көздердің поляризациясы сызықтық емес, эллиптикалық болып табылады, бұл оптикалық жарық өткізгіште қозған резонанс параметрлеріне айтарлықтай әсер етеді. Поляризацияны сақтайтын талшықтың екі жақты сыну осіне қатысты поляризация эллипсінің сәтті бағыты болса да, резонанстық суреттің контрастын төмендететін және резонанстық тұрақтылықты едәуір нашарлататын бастапқы эллипстегі соққылар сөзсіз.

Егер көлбеу тор жазылған поляризацияны сақтайтын талшық аймағының алдында поляризатор талшығының бір бөлігін орнатса, онда мұндай жүйе поляризациялық секірулер нәтижесінде плазмалық резонанста пайда болатын барлық жағымсыз салдарды толығымен шешуі керек.

Жоғарыда сипатталған тәсілдер зертханалық жағдайларда пайда болатын поляризация әсерлерімен күресу үшін ғана емес, сонымен қатар механикалық поляризация реттегіші сияқты зертханалық құрылғының қажеттілігін толығымен жою үшін жасалғанын атап өткен жөн. Мұндай жетістіктің әлеуеті мұндай құрылғылардың қозғалғыштығын айтарлықтай арттыруда және оларды зертханадан тыс жерде пайдалану мүмкіндігінде жатыр.

Қос сынғыш талшықта қиғаш торды жазу мүмкін болғаннан кейін поляризацияны сақтайтын талшықта жазылған сенсор әрекетінің тұрақтылығына зерттеу жүргізілді және бұл тұрақтылықты изотропты SMF-28 талшығында жазылған датчиктермен салыстыру. Салыстырмалы өлшемдерді жүргізуге арналған қондырғы 2.11-суретте көрсетілген.



2.11 Сурет - Әртүрлі оптикалық талшықтардағы плазмонды резонанс тұрақтылығын салыстырмалы өлшеуге арналған қондырғының схемасы.

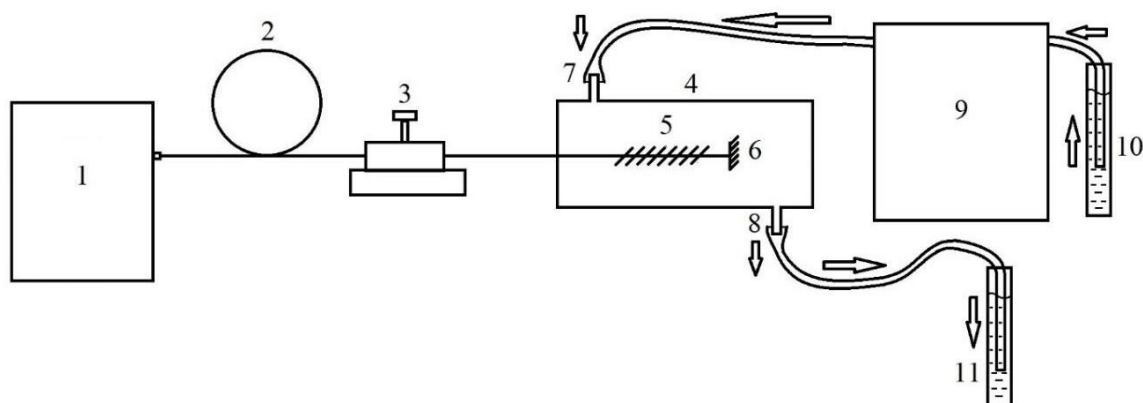
Тәжірибелік қондырғыны құрастыру алдында екі сенсор үлгісі дайындалды, олардың бірі стандартты SMF-28 талшығында, ал екіншісі поляризацияны сақтайтын талшықта жазылған. Орнату екі тәуелсіз талшықты желіні қамтиды, олардың әрқайсысы кірістегі суперлюминесцентті диодқа және шығыстағы спектр анализаторына қосылған. Бұл жағдайда бір желі сенсорларды кәдімгі талшыққа, ал екіншісі қос сынғышқа орнатуға арналған. Сондай-ақ бірінші жолға механикалық поляризация реттегіші қойылды, ол жоғары сапалы спектрлік үлгіні алу үшін қажет. Поляризатор үлкен дәрежеде бір поляризация компонентін тандауға, сондай-ақ сенсордың дұрыс жұмыс істеуі үшін талшықтағы E векторының бағытын дәл реттеуге мүмкіндік берді. Екінші жолда оның орнына поляризациялаушы талшық болды диодтық сәулеленудің жалпы эллиптикалық поляризациясы үшін сызықтық дәрежесін арттыру. Бұл схемада поляризация контроллерін қолдану қажет болмады, өйткені сенсорлық талшықтағы поляризация күйі бастапқыда сенсорлық талшықпен поляризатор талшығын дәнекерлеу кезінде орнатылды және талшықтардың анизотропты құрылымының арқасында эксперимент барысында оның жағдайы іс жүзінде өзгерген жоқ. Сенсорлар дистилденген суға батырылды.

Тәжірибе принципі – сезімтал бөлікке тікелей жақын жерде талшықтар қимасының механикалық деформациясына екі датчиктің реакциясын бір уақытта тіркеу. Бұл жағдайда енгізілген механикалық деформация нақты жағдайларда қалдық кернеулердің босаңсуы және талшықтардың иілуі арқылы жүйеде өндірілген әртүрлі жүктемелерді тиімді түрде имитациялады. Осындай тәжірибелік қондырғының көмегімен қос сынғыш талшықтарда жазылған датчиктердің тұрақтылығы стандартты талшықта жазылған датчиктермен салыстырылып, механикалық деформацияның жалпы спектрлік резонанс үлгісінің тұрақтылығына әсері зерттелді.

Зерттеу барысында сенсорды өлшенетін стационарлық сұйықтықпен ашық немесе жабық контейнерде табу жоғары дәлдікті өлшеу үшін нашар жұмыс істейтіні атап өтілді. Сұйықтықтың құрамына өзгерістер енгізуге тырысқанда, сенсордың оқулары көлемде диффузия процесінің хаотикалық сипатына байланысты тән толқулар мен релаксацияларға ие. Сонымен қатар, биологиялық ерітінділер сияқты күрделі жүйелерді талдауға тырысқанда, әртүрлі

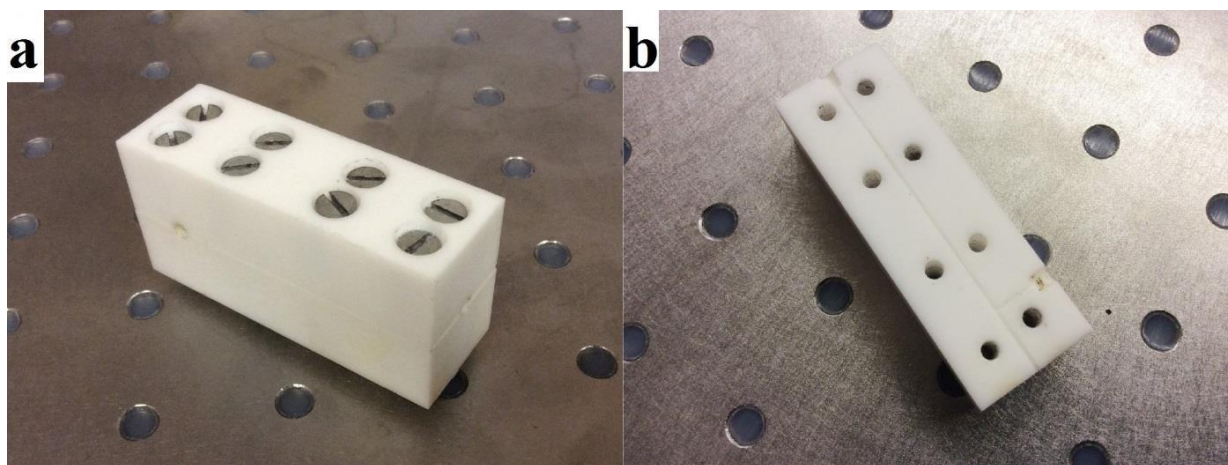
тығыздықтағы сұйықтықтардың тұндыру және стратификациясы сияқты қосымша процестер де жүреді. Биосенсорларда талшықты плазмоникалық сенсорларды қолдануға ерекше қызығушылықты ескере отырып, жоғарыда аталған мәселелер өте өткір болып табылады. Осы себепті арнаға біріктірілген талшықты сенсоры бар ағындық жүйені әзірлеу туралы шешім қабылданды.

2.12-суретте концентрациясы төмен ерітіндідегі оның бетіндегі ақуыз молекулаларының адсорбциясына сенсордың реакциясын зерттеуге арналған қондырғының диаграммасы көрсетілген.



2.12 Сурет - Ағындық ұяшықтағы өлшемдерге арналған тәжірибелік қондырғының схемасы. 1 - сұраушы, 2 - талшықты поляризатор, 3 - механикалық поляризация реттегіші, 4 - ағын ұяшығы, 5 - сезгіш элемент, 6 - талшықты оптикалық айна, 7 - сұйықтық ағынының кірісі, 8 - сұйықтық ағынының шығысы, 9 - перистальтикалық сорғы, 10 - зерттелетін сұйықтығы бар резервуар, 11 - қалдық сұйықтық бар ыдыс.

Болашақ микрофлюидтік чиптің бірінші прототипі ретінде схемада диаметрі 1 мм арналары және кіріс (7) және шығыс (8) саптамалары бар тефлон ұяшығы (4) пайдаланылды. Орталық арнаға талшықты плазмалық сенсор салынған. Зерттелетін сұйықтықтың ағыны сыртқы перистальтикалық сорғымен жасуша арқылы сорылды (9). Ұяшық сорғыға ішкі диаметрі 1 мм (10) силикон түтіктерімен қосылды. Ұяшық арнасы арқылы сұйықтық ағыны талшықты сенсор бойымен бағытталды. Плазмоникалық сенсорды сұраудың оптикалық схемасы 2.9-суретте көрсетілгенге ұқсас болды. Жасушаның сыртқы түрі 2.13-суретте көрсетілген.

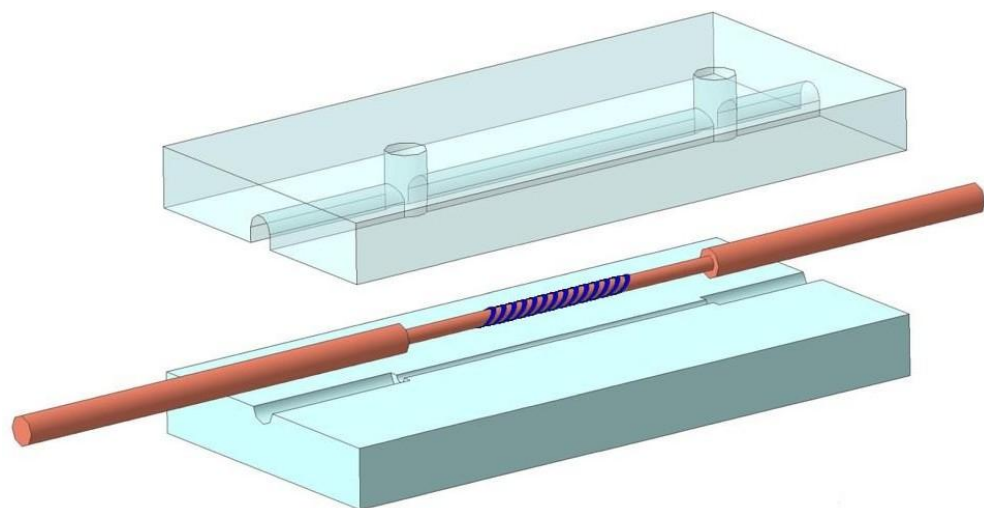


2.13 Сурет - Ағын ұяшығының сыртқы түрі. а - құрастырылған, б - төменгі бөлік (негіз).

Ұяшыққа орнатылған сенсордың тұрақтылығы ең алдымен изопропил спиртінің сулы ерітінділерінде сыналған. Жоғарыда сипатталған қондырғының көмегімен маңызды эксперименттік нәтижелер алынды, бірақ өлшеу дәлдігі әлі де жеткіліксіз болды. Негізгі себеп ұяшық арналарының дизайнының жетілмегендігі және олардың салыстырмалы түрде үлкен диаметрі болды, бұл сенсорды ұяшық арнасында қайталанатын орнатудың қиындығына және нәтижесінде осы арқылы енгізілген нәтижелердің шашырауына әкелді. Сонымен қатар, сұйықтық ағынындағы датчиктің бос орналасуы жылдамдық пен ағынның біркелкі еместігі сенсор үшін механикалық тербелістердің көзі болып табылады, бұл күшті теріс фактор болып табылады. Осының бәрі ағындық жүйенің микрофлюидтік чип бағыты бойынша одан әрі дамуына әкелді, оның арнасына талшық сенсоры енгізілген.

Кірістірілген талшықты сенсоры бар әзірленген микрофлюидтік чип төмендегі суретте схемалық түрде көрсетілген. Чип полиметилметакрилаттан (ПММА) жасалған және екі бөліктен тұрады - негіз және қақпақ. Чиптің негізіндегі цилиндрлік арна шеттердің жанында кеңейеді - сенсорды желімдеу арқылы полимер қабығына бекіту үшін. Кіріс және шығыс (тік) бар негізгі микрофлюидтік арна (диаметрі 300 мкм) чип қақпағында шоғырланған. Датчик чиптің негізіне желімделгеннен кейін, чиптің өзі желімделіп, мөрленеді.

Чиптің арнасындағы сенсорды одан да көп тұрақтандыру үшін сенсорды арнаның бүкіл ұзындығы бойынша негізге желімдеу ұсынылды. Бұл жағдайда контрастың жоғалуын азайту үшін желімнің сыну көрсеткіші сынақ ерітінділерінен айтарлықтай жоғары болуы керек. Дегенмен, сенсордың жұмыс бетінің бір бөлігінің жоғалуы байқалатын резонанстың контрастына теріс әсер ететіні анық. Ұқсас конструкциясы бар эксперименттердің нәтижелері оны пайдаланудың орындылығы туралы шешім қабылдауға мүмкіндік береді.



2.14 Сурет - Желімделген сенсоры бар микрофлюидтік чиптің схемалық бейнесі.

3 МАТЕМАТИКАЛЫҚ СИГНАЛДЫ ӨНДЕУ

Алдыңғы тарауларда бірнеше рет айтылғандай, талшықты плазмоникалық датчиктердің жұмыс істеу принципі сыртқы жағдайлар өзгерген кезде пайда болатын датчиктің берілу спектріндегі плазмонды резонанс жағдайының өзгерістерін анықтау болып табылады. Сонымен қатар, ажыратымдылық пен анықтау шегі сияқты сенсордың параметрлері спектрдегі резонанстың орнын анықтау дәлдігіне тікелей байланысты екені анық.

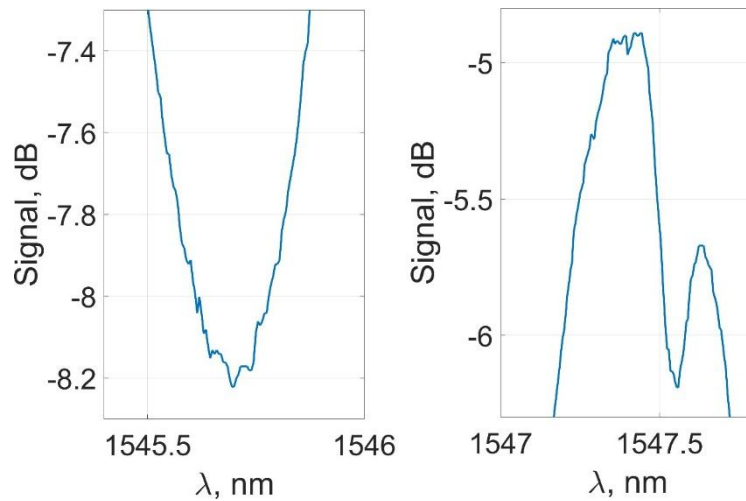
Біздің көлбеу Брегг торы бар схемада спектрдегі резонанстың орнын анықтау маңызды емес мәселе болып табылады. Өздігінен резонанстық шың айқын түрде жоқ, ал қозудың резонанстық сипатының көріністері сенсорлық спектрдің конвертінде көрінеді. Дегенмен, сенсордың ең жақын ортасының күйіндегі өзгерістерді тіркеуден тұратын практикалық тапсырмалар резонанстық позицияның абсолютті мәндерін анықтауды қажет етпейтінін, тек оның салыстырмалы өзгерістерін ескеру қажет. Осы себепті әдебиетте спектрдегі резонанс орнының өзгеруін жанама анықтау әдістері кең таралған.

Біздің жұмысымызда нүктелер жиынының позицияларын талдауға негізделген жалпы математикалық идеямен біріктірілген плазмондық резонансты толқын ұзындығын анықтаудың әмбебап әдістерінің жиынтығы болып табылатын басқа, принципті жаңа көзқарас ұсынылды. сенсорлық спектр. Біз өз әдістерімізбен сыну көрсеткішін анықтаудың дәлдігін және жеке спектрлік шыңның биіктігін өлшеуге негізделген «дәстүрлі» әдісті салыстырдық.

3.1 Математикалық аппараттың жұмыс істеу тәсілі мен алгоритмдерін сипаттау

Жаңа өңдеу әдістерінің идеясы аналитикалық қисықтың қарқындылығын жақындату арқылы плазмалық резонанстың толқын ұзындығына жақын сенсор спектріндегі шыңдар жиынтығының суперпозициясын анықтау. Дәл осы қисықтың параметрлері бойынша плазмондық резонанстың толқын ұзындығы есептеледі. Бұл жағдайда көптеген спектрлік шыңдар бір уақытта берілген толқын ұзындығын анықтауға қатысатындықтан, есептеу қателігі айтарлықтай төмендейді [38].

Бастапқы түрінде сенсордың эксперименттік өткізу спектрі шыңдардың орналасуы мен тереңдігін анықтау үшін нашар жұмыс істейді, өйткені әр жеке шың шуылға өте сезімтал (сурет. 3.1.а) және қабықтың және өзектің өзара әрекеттесу ерекшеліктеріне байланысты ерекше спектрлік бифуркация [99] (сурет. 3.1.б).



3.1 Сурет - Датчиктің спектрлік шыңдарының пішінінің ерекшеліктері.

Шыңдардың орнын анықтаған кезде мұндай ерекшеліктер айтарлықтай бұрмаланулар тудыруы мүмкін. Осы артефактілердің әсерін теңестіру үшін шыңдардың әрқайсысы өзіне тән спектрлік максимумға ие аналитикалық қисыққа жақындауы мүмкін (мысалы, гауссиана немесе параболаның бөлігі) немесе сигналды сүзуге болады. Әр түрлі әдістермен жүргізілген тәжірибелер біздің жұмысымызда қолданған сигналды сүзу әдісін қолдануды көрсетті. Спектрлік артефактілердің әсері төменде егжей-тегжейлі сипатталған алдын-ала өңдеу процесінде толықтай тегістеледі.

3.2 Сигналдарды алдын ала өңдеу

Спектрді өңдеудің бірінші кезеңінде спектрлерді Фурье сүзгілеуі жүреді. Бұл кезде шың пішінінің ерекшеліктері тегістеледі, ал спектр көлденең түзу сызыққа қатысты теңестіріледі.

Сүзгілеуге ұқсас уақытша сигналдар болса, Фурье кеңістігін жалпыланған жиіліктер кеңістігі деп атаймыз [10]. Мыналарды ескеріңіз жалпыланған жиіліктер оптикалық зондтық сәулелену жиілігіне байланысты емес және спектрлік үлгідегі қарқындылықтың өзгеруінің сипаттамалық кезеңіне жатады.

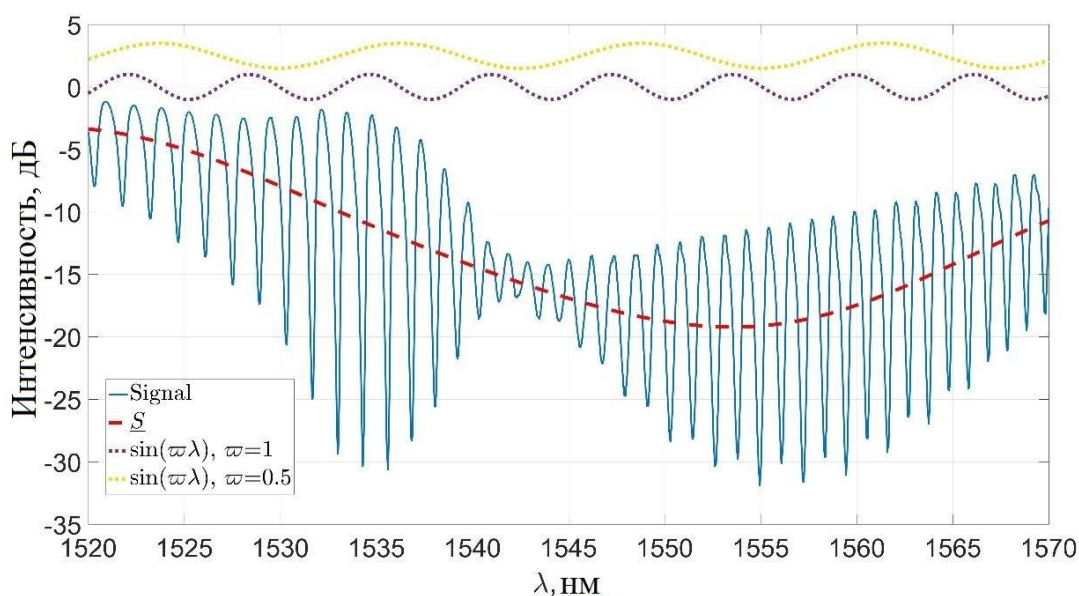
$$S_f = \frac{1}{2\pi} \int_{\zeta \leq 0} \int_{\xi \geq +\infty} S \exp(-i\lambda\varpi) d\lambda \exp(i\lambda\varpi) d\varpi \quad (3.1)$$

Мұнда S – датчик сигналының спектрі, λ – нанометрдегі толқын ұзындығы, ϖ – жалпыланған жиілік, ζ – төменгі жалпыланған сүзу жиілігі, ξ – жоғарғы жалпыланған сүзу жиілігі.

Бағдарламалық қамтамасыз етуді іске асыруда жылдам Фурье түрлендіруі қолданылады, ал сүзгілеу тікбұрышты тереземен терезелі Фурье түрлендіруіне сәйкес келетін жалпыланған жиілік кеңістігіндегі үлгілер үлгісін шектеу арқылы, яғни сәйкес жалпыланған жиіліктердің құрамдастарын нөлге келтіру арқылы орындалады.

Төмен жалпыланған жиіліктерді басу арқылы Фурье сүзгісінде спектр көлденең сызыққа қатысты тураланады. Бұл жағдайда жалпыланған жиіліктің төменгі шегі плазмонды резонанстық толқын ұзындығы аймағындағы фильтрленген сигналдың сызықтылық шартынан анықталады.

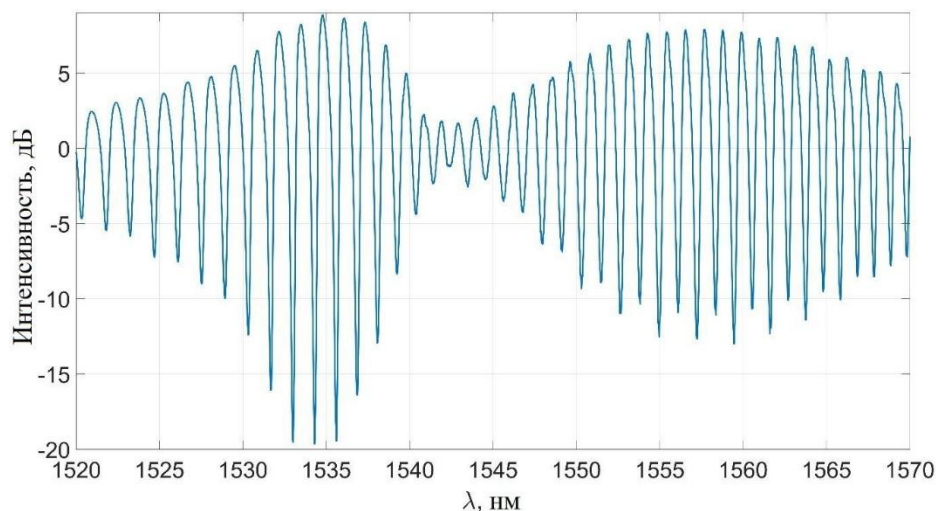
Төмендегі суретте бастапқы сигнал және оның сүзгіленетін s компоненті кезде $\zeta = 0,5$ шегі көрсетілген, бұл біздің тәжірибелеріміз көрсеткендей біз қолданатын сенсорлардың спектрлері үшін оңтайлы мән. Сондай-ақ, пайдаланылған параметрді көрнекі түрде көрсету үшін суретте көрсетілген жалпыланған жиіліктерге сәйкес келетін компоненттер $\varpi = 0.5$ және $\varpi = 1$ -ші сілтемелер.



3.2 Сурет - Көлденең оське (қызыл сызықша қисығы) және жалпыланған жиіліктері бар құрамдас бөліктерге қатысты сигналды туралау процесінде сүзілген бастапқы сигнал (тұтас көк қисық) және оның S компоненті (нүктелі қисық, сары) және тиісінше күлгін).

Оңтайлы төменгі сүзгі жиілігін таңдау пайдаланылатын сенсордың қасиеттеріне, атап айтқанда, Брегг торының сызықтарының көлбеу бұрышына байланысты болуы мүмкін. Төменгі сүзгілеу жиілігін таңдағанда, плазмонды резонанстық толқын ұзындығы аймағындағы сүзілген компоненттің тегістігіне көшу керек. Тым төмен мәнді таңдау жеткіліксіз тиімді болуы мүмкін, ал берілген параметрдің шамадан тыс мәнін таңдау плазмалық резонанстың жанындағы шыңдардың салыстырмалы қарқындылығының өзгеруіне әкелуі мүмкін, бұл плазмалық резонанстың толқын ұзындығының ығысуын

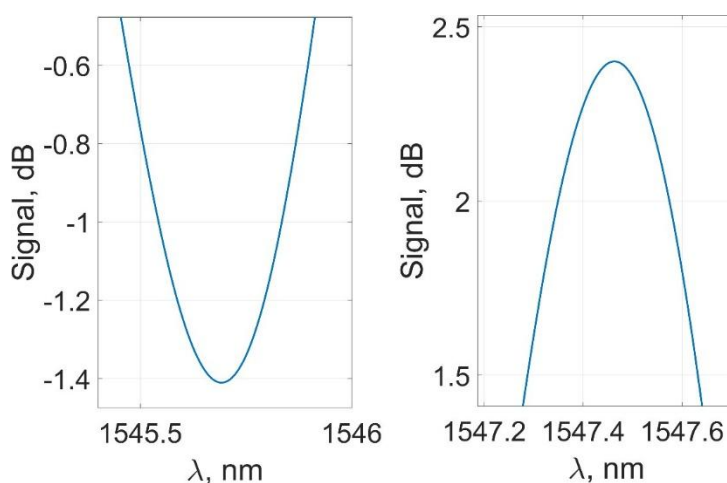
анықтаудың дәлдігі мен сызықтығына нашар әсер етеді. Төмен өту сүзгісінің нәтижесі 3.3 суретте көрсетілген:



3.3 Сурет - Көлденең оське қатысты туралаудан кейінгі датчик сигналы.

Төмен жиілікті сүзуді қолдану арқылы сигналды теңестіргеннен кейін спектрлік шыңдарда әлі де шу бар екенін ескеріңіз. Оларды тегістеу үшін жоғары жалпыланған жиіліктерді кесу арқылы Фурье сүзгілеуі жүргізіледі:

Біз қолданатын датчиктер үшін эксперименталды түрде жоғарғы жалпыланған сүзу жиілігінің оңтайлы мәні сенсордың спектрлік сипаттамаларына байланысты $\xi = 7 - 8$ диапазонында болатындығы анықталды және спектрлік зерттеу аспабы. Мұндай шамада барлық ξ шу мен интермодтық өзара әрекеттесудің артефактілері тегістеледі, бірақ 3.4-суретте және 3.5-суретте көрсетілгендей плазмонды резонанс әсеріне тән спектрдің барлық тән белгілері сақталады.



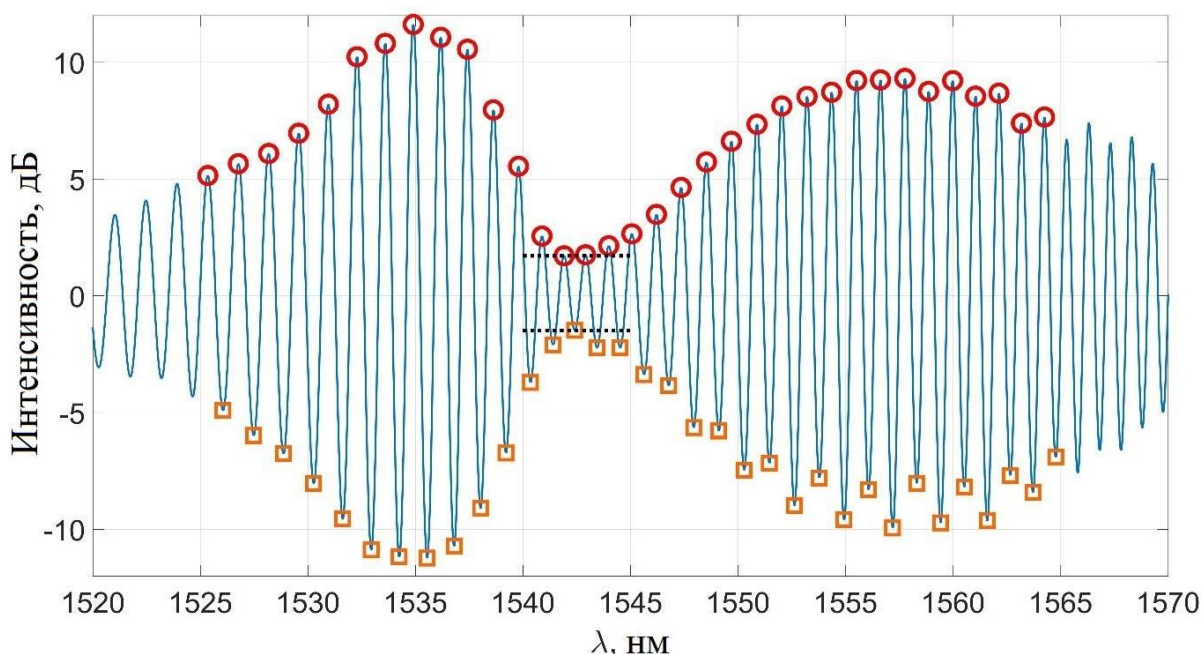
3.4 Сурет - Сүзгіден кейінгі сигнал шыңдары.

3.3 Плазмонның резонанс толқын ұзындығын анықтау

Бастапқы фильтрлеуден кейін плазмонның резонансты толқын ұзындығы бірнеше кезеңде анықталады.

Бірінші кезеңде спектрдегі шыңдардың позициялары анықталады. Сүзгіден кейін спектр тегіс қисық болып табылады және туындының белгісі өзгеретін нүктелер ретінде шыңдық позицияларды есептеу ыңғайлы. Туынды сандық әдіспен есептеледі. Плазмон резонансының толқын ұзындығына жақын спектр аймағы ең маңызды болып табылады. Біз желі спектрінің осы бөлігін белгілейміз. Экспериментте ығысу мәні әдетте әр бағытта 10 нм-ден аспайды, сондықтан сенсор үшін, оның спектрі 3.3 – суретте көрсетілген $\Lambda = 1530 - 1570$ нм аймағын алу жеткілікті. Плазмалық резонанстың толқын ұзындығын одан әрі анықтау алгоритмі үшін іздеу аймағы Λ спектрдің тарылуы оған енетіндей етіп орнатылады, ал бүкіл Λ аймағында спектрлік шыңдардың амплитудасы плазмалық резонанстың толқын ұзындығының айналасында минималды болады.

3.5-суретте қызықтыратын аймақтағы шыңдардың табылған координаталары бар датчиктің спектрі көрсетілген. Спектрдегі барлық шыңдар Ext . Ext^{top} шыңдарының жоғарғы тобы, Ext^{bot} шыңдарының төменгі тобы. Олардың координаттары, сәйкесінше, $Ext\ x$ және $Ext\ y$.



3.5 Сурет - Плазмондық резонанстық толқын ұзындығы аймағында жатқан анықталған шыңдары бар датчик сигналының фильтрленген спектрі. Жоғарғы топ Ext^{top} (шеңберлер), төменгі топ Ext^{bot} (квадраттар) және тартылу амплитудасы (нүктелік сызық).

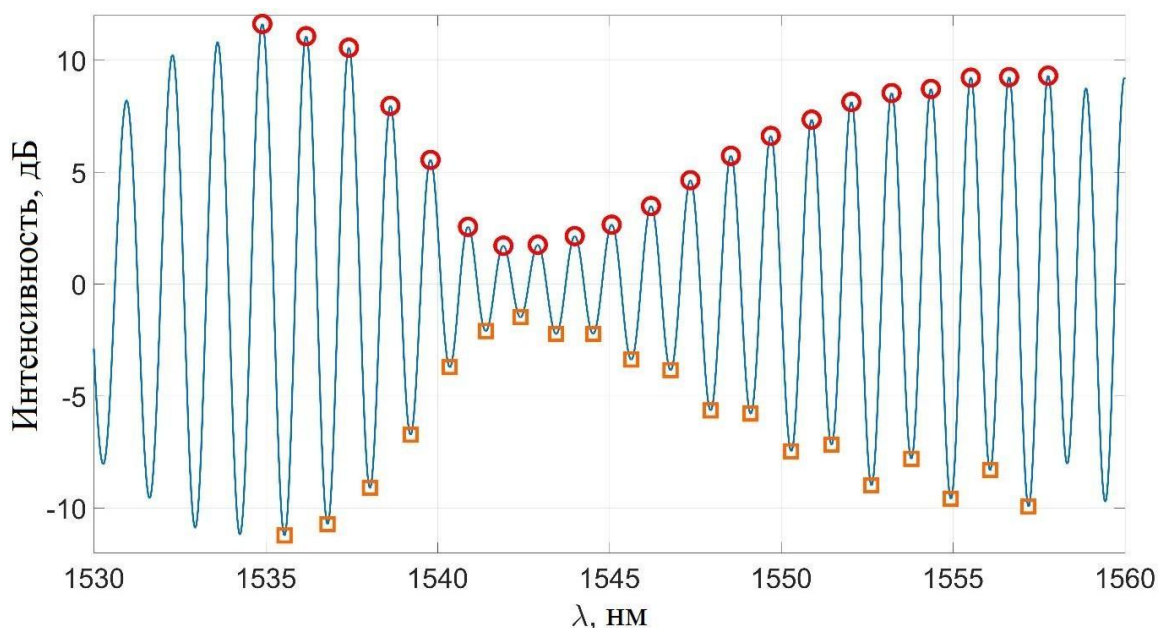
Келесі қадам спектр белдеуіне жақын шыңның x координатасын анықтау арқылы плазмонды резонанстық толқын ұзындығы аймағын алдын ала анықтау болып табылады. Осылайша, алдын ала әдіс ең кіші ордината мәні бар жоғарғы топтан шыңның абсциссасы ретінде беріледі.

$$\lambda^{SPR} = Ext^{top}(Ext^{top} = \min(Ext^{top})) \quad (3.4)$$

Бұл әдістің дәлдігі спектрдегі шыңдар арасындағы орташа қашықтықтан аспайды және шамамен 1 нм құрайды. Ол басқа әдістер үшін бастапқы жуықтау ретінде ғана қолданылады.

Дәлірек әдістер λ^{SPR} плазмалық резонансының толқын ұзындығына жақын Λ спектрінің бұрын таңдалған аймағында орналасқан шыңдардың координаттарын жақындатуға негізделген. Біз осындай жуықтаудың бірнеше әдістерін қарастырдық.

Әрі қарай өңдеу үшін Ext^{top} және Ext^{bot} тобынан Ext^{top} және Ext^{bot} кіші топтарын бөліп алу ыңғайлы, оларды біз спектрдің "ішкі беткейлеріндегі" шыңдар топтарын анықтаймыз. Ext^{top} және Ext^{bot} кіші топтары төмендегі суретте көрсетілген.



3.6-сурет- Сүзгіден кейінгі сенсорлық сигналдың спектрі және топша Ext^{top} (шеңберлер) және Ext^{bot} (квадраттар) .

Біз бұл топшаларды тегіс қисық сызықтармен жақындаттық.

Айта кету керек, әдетте, экспериментте плазмалық резонанстың толқын ұзындығының ығысу шамасын өлшеу маңызды, оның абсолютті мәні емес. Біздің тәжірибелерімізде біз үш ұқсас әдіспен өңделген спектрлер жиынтығын

қолдандық.

Бірінші әдіс - Ext^{top} шыңдардың кіші тобын түрдің функциясымен жақындастыру:

$$f_1(x) = h_1 - \beta_2 \exp(-\beta_3 (x - \beta_3)^2) \quad (3.5)$$

Мұнда h -көлденең асимптотаның биіктігі сериядағы барлық спектрлер үшін берілген параметр, ал i қосындысы-әр спектр үшін ең кіші квадраттар әдісімен анықталған параметрлер. N параметрі (1.9) функциямен жуықтау кезінде ең кіші квадраттар әдісімен анықталады, бірақ тек серияның бірінші спектрі үшін. Осылайша, қисықтар (1.9) инверттелген гауссиан болып табылады және 3 тәуелсіз параметрмен беріледі.

Аналитикалық функцияның минимумы (1.9) және $f(1)$ әдісімен анықталған плазмалық резонанстың толқын ұзындығы деп атаймыз.

$$\lambda_1^{SPR} = \arg(f_1(x) = \min(f_1(x))) = \beta_3 \quad (3.6)$$

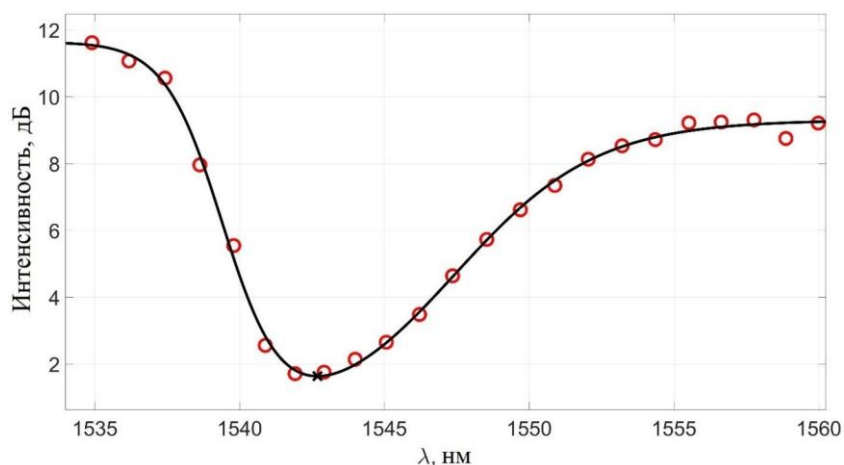
Бұл әдіс спектрдегі оң және сол жақ беткейлердің еңістерінің өзгерістеріне сезімтал емес, дегенмен, тұтастай алғанда спектр белдеуінің ығысуын бақылауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс жақсы жұмыс істейді, егер белдің пішіні плазмондық резонанс толқын ұзындығының ығысуымен өзгермесе, ал спектрдің белі тұтастай ауысады. Бұл әдістің артықшылығы оның салыстырмалы қарапайымдылығы және айнымалы параметрлердің аздығына байланысты есептеудегі шу деңгейінің төмендігі болып табылады.

Спектрдегі белдің позициясының айтарлықтай өзгеруімен (1 нм-ден астам ығысу) оның конвертінің ұзындығы айтарлықтай өзгерістерге ұшырауы мүмкін екенін атап өткен жөн. Бұл жұмыс диапазонындағы көлбеу тордың шыңдарының амплитудасының табиғи біркелкі еместігіне байланысты.

Осылайша, бірінші әдіс кең жұмыс диапазонында өлшеу кезінде сигналды өңдеу үшін қолданылмайды.

Есептеулер үшін қолдануға болатын екінші, альтернативті әдіс - форманың аналитикалық қисығының экстремумының жоғарғы бөлігіне жуықтау:

Көрініс қисықтары (1.11) конверт графигінің кедергінің оң және сол жағына беріктігін ескереді және әдетте 20-25 нүктеден тұратын Ext^{top} тобына жақындайды:



Сурет 3.7 - Қосымша топ Ext^{top} (шеңберлер), жуықтау оның тегіс функциясы $f(2)$ және оның минимумы (крест).

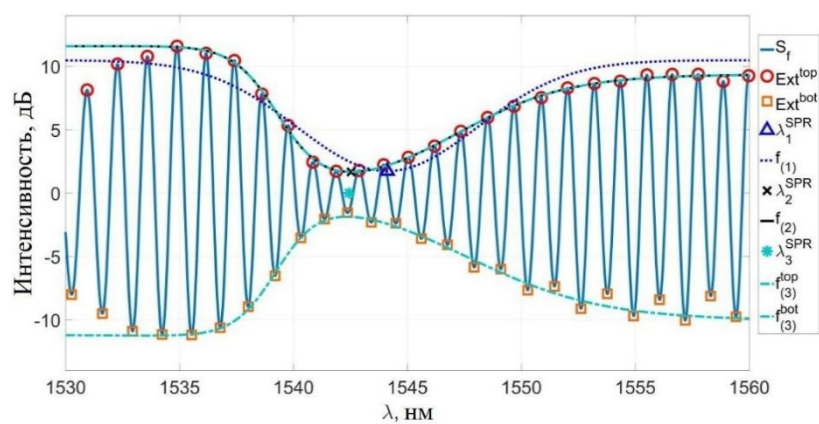
Бұл әдіс спектрлік құлдырауда оң және сол жақ беткейлердің пішінін (еңістерін) ескеруге мүмкіндік береді, сонымен қатар $f(1)$ әдісі жағдайындағыдай тіркелген h параметрін қолданбайды, ол күтілуде, сыну көрсеткіштерінің кең ауқымында дәлірек өлшеуге мүмкіндік береді.

Біз басқа әдісті енгіздік, ол енгізу ретінде параметрлердің екі тобын Ext^{top} және Ext^{bot} пайдаланады және бір мезгілде 12 тәуелсіз параметр бар.

β_{ij} параметрлерін анықтау Нелдер-Мид әдісімен екі қисықтың да оларға сәйкес топтардан орташа квадраттық ауытқуын азайту арқылы жүзеге асырылады. Бұл әдіс шамамен 40 нүктені екі қисықпен бекіту үшін 12 тәуелсіз параметрді қолданады.

Нөлдік көлденең сызықтың қиылысу нүктесі және функциялардың экстремумдарын (f^{top}) және (f^{bot}) байланыстыратын кесінді $f(3)$ әдісімен анықталған плазмалық резонанстың толқын ұзындығы деп аталады.

Төмендегі суретте сенсордың сүзгіленген спектрі, шыңдардың топтары, сондай-ақ оларды жақындататын функциялар және жоғарыда сипатталған әдістермен анықталған плазмондық резонанс толқындарының ұзындықтары көрсетілген. Суреттен жақындау қисықтарының минимумдары бір-бірінен айтарлықтай ерекшеленетінін көруге болады, алайда бұл бір немесе басқа функцияны есептеулер үшін пайдаланудың мүмкін еместігін немесе оның тиімділік дәрежесін көрсетпейді. Жоғарыда атап өтілгендей, плазмонның резонанстық толқын ұзындығының абсолютті мәні емес, қоршаған ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруімен оның өзгеруін барынша дәл өлшеу мүмкіндігі маңызды.



3.8 Сурет – Датчик сигналының фильтрленген спектрі, топшалар Ext^{top} (шеңберлер) және Ext^{bot} (квадраттар) және әртүрлі әдістерге сәйкес келетін қисық сызықтар.

Сипатталған әдістер плазмалық резонанстың толқын ұзындығын анықтаудың ұқсас принциптеріне ие. Бірінші әдіс параметрлердің ең аз санын қолданады және экстремалардың жоғарғы тобын жақындатады. Бұл үлкен диапазонда өлшеу кезінде плазмалық резонансқа жақын сенсордың өткізу спектрінің пішінінің өзгеруін бақылауға мүмкіндік бермейді. Ол тартылыстың жылжуын біртұтас тұтас деп сипаттайды. Алайда, бұл әдіс салыстырмалы қарапайымдылыққа ие және оны қоршаған орта сенсорының сыну көрсеткішіндегі кішкентай өзгерістерді бақылау үшін пайдалануға болады.

Екінші әдіс шамамен 20 нүктені жақындатуға арналған 6 параметрге ие. Ол тартылыстың жоғарғы бөлігінің пішінін жақсы сипаттайды, сонымен қатар плазмалық резонанстың толқын ұзындығының оң және сол жағындағы конверт спектрінің әртүрлі көлбеуін және конверт формасының плазмалық резонанстың спектрлік жағдайына тәуелділігін ескереді. Бұл екінші әдісті сенсордың ажыратымдылығын жоғалтпай сыну көрсеткішінің үлкен өзгерістерінде қолдануға мүмкіндік береді.

Соңында, үшінші әдіс экстреманың жоғарғы және төменгі топтарының көлденең асимптоттарының пішіні мен биіктігінің өзгеруін бақылауға мүмкіндік береді, бұл сонымен бірге бұл әдіс плазмондық резонанс толқын ұзындығының үлкен өзгерістерімен жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Соңғы әдіс әр спектрде шамамен 40 нүктеге сәйкес келу үшін 12 тәуелсіз параметрді пайдаланады. Пайдаланылатын айнымалылардың көп санына және соған байланысты есептеулердің күрделілігіне қарамастан, бұл әдісті пайдалану кезінде жоғары дәлдікті күтуге болады, өйткені екі спектрлік конверт, жоғарғы және төменгі, маңызды спектрлік анықтамалық нүктелердің көбірек санын пайдаланып талданады.

4 МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӨНДЕУДІ ҚОЛДАНУ НӘТИЖЕЛЕРІ

4.1 Ерітінді концентрациясын өлшеу және сезімталдықты бағалау

Тәжірибелерде талшықты датчиктердің сыртқы ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруіне сезімталдығы изопропил спиртінің сулы ерітінділерінің концентрациясын өлшеу арқылы зерттелді. Изопропанолдың сулы ерітіндісі оңай есептелетін сыну көрсеткіші бар тамаша модельдік сұйықтық болып табылады. Сонымен бірге изопропил спиртінің өзі суда жақсы ериді, уақыт өте келе тұнбады және сенсордың алтын бетімен, сондай-ақ талшықтың полимерлі жабынымен химиялық реакцияға түспейді. Тәжірибе 2.8-суретте көрсетілген қондырғы арқылы жүргізілді.

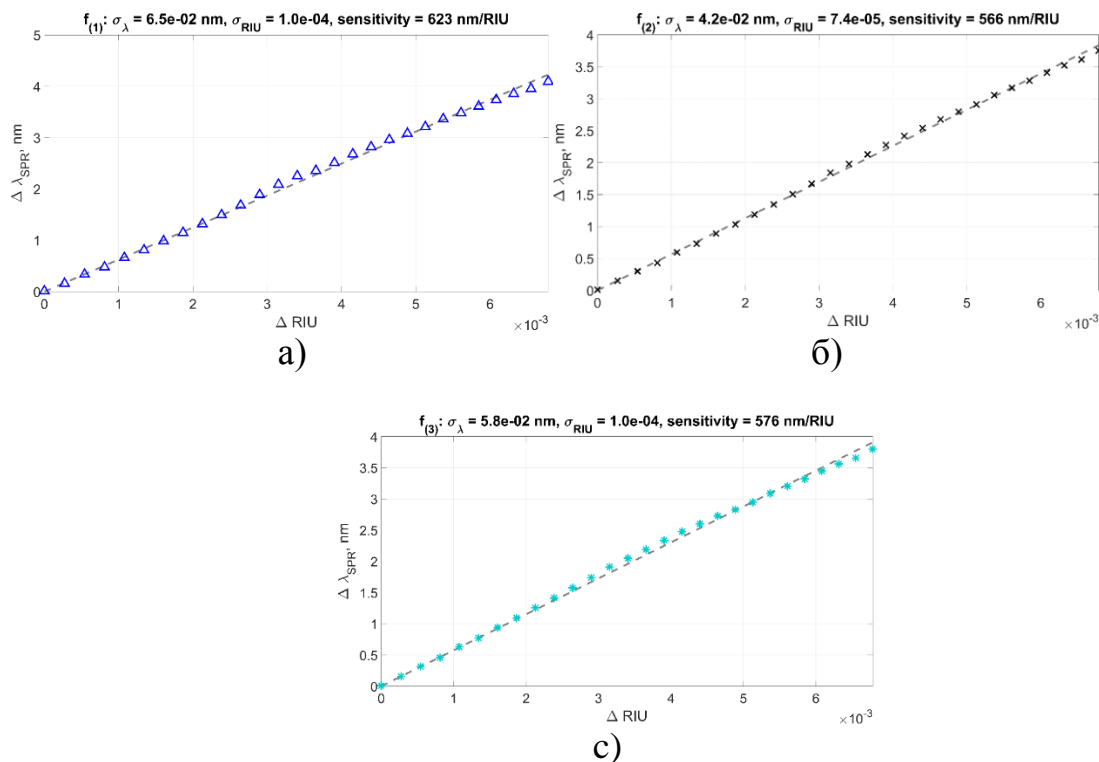
Бірінші жағдайда өлшеулер тәжірибе нүктелері арасындағы шағын қадаммен шағын концентрация диапазонында жүргізілді. Массалық концентрация 0-ден 0,078-ге дейін өзгерді, бұл ерітіндінің сыну көрсеткішінің $6,8 \cdot 10^{-3}$ шегінде өзгеруіне сәйкес келеді. Тәжірибелерімізде қолданылған ерітінділердің сыну көрсеткіштері [47] берілген мәліметтер бойынша (5) формула бойынша есептелген ерітінді концентрациясына сәйкес есептелді.

Өкінішке орай, басқа авторлар атап өткен ИК диапазонына арналған изопропанол ерітінділерінің сыну көрсеткіші туралы әдебиетте деректер жоқ [42]. Екінші жағынан, көрінетін ауқым үшін белгілі деректер өте әртүрлі [43]. Біз [47] - де берілген деректерді жақын орналасқан IR аймағына экстраполяцияладық, бұл, әрине, сыну көрсеткішін есептеуде қосымша қателіктер тудыруы мүмкін, алайда дамыған сенсорлардың сезімталдығын тиімді бағалауға мүмкіндік береді.

Өлшеу сериясында әр спектр өрнектерге сәйкес келетін 3-тарауда сипатталған 1-3 әдістеріне сәйкес өңделді (11), (13), (15). Салыстыру үшін "классикалық" әдістің нәтижелері келтірілген, онда ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруі таңдалған шыңның биіктігінің өзгеруімен өлшенеді (3.1-бөлімді қараңыз). Эксперименттердің бірінші сериясында қолданылатын сенсор үшін бастапқы сигналдың шыңы шамамен 1541 нм болды, өйткені ол конверт графигінің баурайында орналасқан және оның биіктігі ерітіндінің концентрациясының нақты диапазонындағы плазмалық резонанстың толқын ұзындығының өзгеруімен айтарлықтай өзгереді (сурет.3.2).

4.1-суретте үш түрлі әдіспен есептелген плазмалық резонанстың толқын ұзындығының ығысуының ΔRIU мәндеріне тәуелділігі көрсетілген. Тәжірибелік деректер таза суға сәйкес келетін нөлдік нүктеден өтетін сызықтық функциямен жуықталды. Төмен концентрациядағы ерітінділер жағдайында изопропанол фракциясының сыну көрсеткішінің өзгеру сызықтығы әдебиеттен алынған деректермен расталады [47]. Айта кету керек, эксперименттік нүктелердің жуықтау сызығынан ауытқуы спирттің сулы ерітінділерін дәйекті сұйылту қателіктеріне байланысты, бұл стандартты ауытқудың орташа мәніне айтарлықтай үлес қосады. Алайда, біз деректерді өңдеудің әртүрлі әдістерін

салыстырмалы талдау үшін толық RMS ауытқуын қолдана аламыз. Жуықтау сызығының көлбеуі деректерді өңдеудің әр әдісі үшін алынған сенсордың сезімталдық мәнін анықтады.



4.1 Сурет - Бірінші эксперимент деректерінен $f(1)$ (a), $f(2)$ (b), $f(3)$ (c) әдістері бойынша есептелген плазмалық резонанстың толқын ұзындығының ығысуының сыну көрсеткішінің өзгеруіне тәуелділігі.

Бірінші әдіс (11) үшін нүктелердің түзуден стандартты ауытқуы 0,065 нм құрады, сенсордың сезімталдығы 623 нм / RIU.

Осылайша, сыну көрсеткішінің өлшем бірліктерінде стандартты ауытқу 10^{-4} RIU құрады.

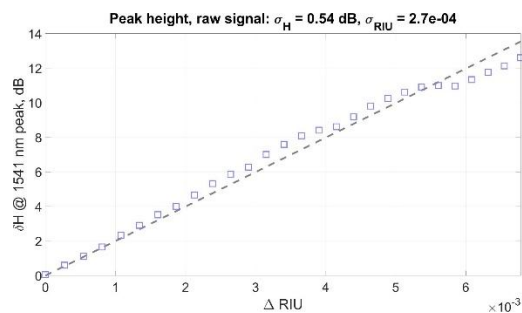
Екінші әдіс (13) нүктелердің түзу сызықтан стандартты ауытқуының ең жақсы мәнін көрсетті, ол $\sigma(2) = 0,042$ нм, қисықтың есептелген көлбеуі 566 нм / RIU, бұл сыну көрсеткіші бойынша шамамен $7,4 \times 10^{-4}$ RIU құрайды.

Үшінші өңдеу әдісі (15) стандартты ауытқу үшін аралық нәтижені көрсетті, ол $\sigma(3) = 0,058$ нм шамасын құрады және 576 нм / RIU есептік сезімталдықта сыну көрсеткішінің бірліктерінде 10^{-4} RIU ауытқу мәнін көрсетті.

Екінші және үшінші әдістермен есептелген сенсордың сезімталдық мәндері бір-біріне жақын және белгілі әдебиет деректеріне сәйкес келеді [8, 10]. Бірінші әдісте жоғары сезімталдық, 3-бөлімде атап көрсетілгендей, оның математикалық аппаратының ерекшеліктерімен түсіндіріледі, ол NVBR беру спектрінің конвертінің пішінін ескермейді және сәйкесінше есептеу кезінде қате бере алады. плазмонның резонанс толқын ұзындығының өзгеруі.

4.2 суретте -1541 нм-ге жақын спектрлік шыңның амплитудасын қолдану

арқылы эксперименттік мәліметтерді өңдеу нәтижелері көрсетілген.



4.2 Сурет – 1541 нм аймағындағы шыңның биіктігінің сыну көрсеткішінің өзгеруіне және бастапқы сигналға қолданылатын «классикалық» әдіс үшін жуықтау түзуіне тәуелділігі.

Графиктен эксперименттік тәуелділіктің сызықтық мінез-құлқынан айтарлықтай ауытқулар байқалғанын көруге болады. Бұл жағдайда нүктелердің түзу сызықтан орташа квадраттық ауытқуы сыну көрсеткішінің бірлігінде $\sigma_{\Delta B} = 0,54$ немесе $2,7 \times 10^{-4}$ болды, бұл ұсынылған әдістердің кез-келгеніне қарағанда едәуір нашар.

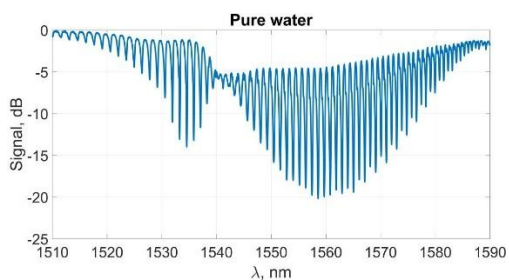
Плазмондық резонанс толқын ұзындығының өзгеруін жақын маңдағы шыңның амплитудасы мен оның вариациялары арқылы бақылау әдісі тек шағын өлшем диапазоны үшін ғана жақсы нәтиже бере алатыны анық, сонымен қатар осы жұмыста ұсынылған әдістердің біріншісі.

1-кестеде әртүрлі әдістермен өңделген бір эксперименттік мәліметтердің нәтижелері үшін сыну көрсеткішінің стандартты ауытқулары көрсетілген. Стандартты ауытқудың бұл мәндері сенсорлық жүйенің сипаттамасы емес және оның ажыратымдылығын немесе анықтау шегін көрсетпейді, бірақ эксперимент пен есептеу әдісінің жалпы қатесі болып табылатынын тағы да ескереміз. Берілген деректер есептеу әдістерін бір-бірімен салыстыру үшін ғана қолданылады.

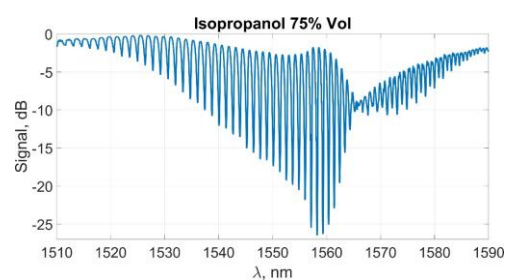
4.1 Кесте - Сыну көрсеткішінің өзгеруін анықтау әдістерінің дәлдігіне қатысты салыстыру.

Әдіс	$f(1)$	$f(2)$	$f(3)$	«Классикалық»
Гуыстық дәлдік	$1 \cdot 10^{-4}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$27 \cdot 10^{-5}$

Екінші эксперимент өңдеу әдістерінің сенсордың параметрлерінен тәуелсіздігін көрсету үшін басқа ұқсас сенсормен жүргізілді. Эксперимент таза судан 75% изопропил спирті ерітіндісіне дейін ерітінді концентрациясының кең спектрін қолданды. Бұл эксперименттегі өңдеудің күрделілігі ерітіндінің сыну көрсеткішінің екі түбегейлі әр түрлі мәні үшін плазмалық резонанстың толқын ұзындығы саласындағы спектрлік сипаттаманың түбегейлі әр түрлі формасына байланысты (сурет. 4.9).



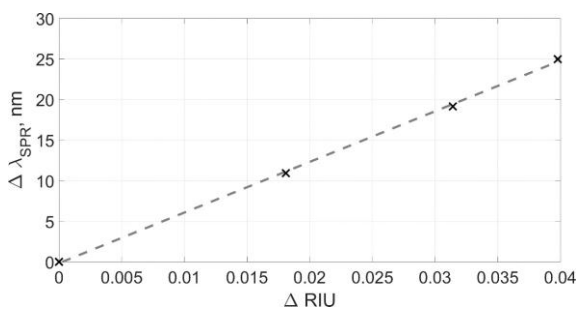
a)



b)

4.3 Сурет - Изопропил спирті ерітінділерінің екі түрлі концентрациясы үшін сенсордың берілу спектрі: 0% (a), 75% (b).

Экспериментте әртүрлі концентрациялары бар төрт эксперименттік нүкте өлшенді. Тәжірибелік деректерді екінші әдіспен өңдеу нәтижелері төмендегі суретте көрсетілген.



4.4 Сурет – (f_2) әдісін қолдана отырып, екінші эксперименттің деректері бойынша есептелген плазмалық резонанстың толқын ұзындығының ығысуының тәуелділігі.

Соған қарамастан, түбегейлі әртүрлі спектрлерді өңдеудің күрделілігіне қарамастан (4.3-сурет), әдіс күткендей жақсы нәтиже көрсетті. Үшінші әдіс ұқсас нәтижелерді көрсетті, бірақ сәл сәтті болмады. Шамасы, бұл ұзақ толқын ұзындығы диапазонындағы шыңдардың төменгі тобының амплитудасының көбірек таралуына байланысты (4.3 б-сурет).

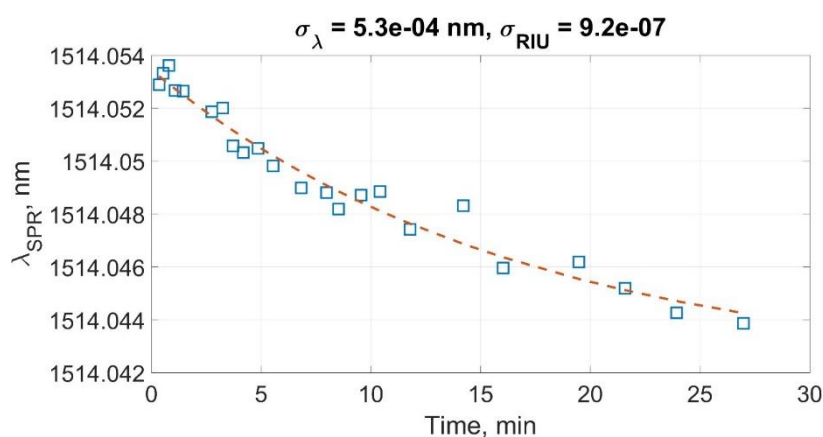
Бір шыңның биіктігін пайдаланатын «классикалық» әдіс, күткендей, ортаның сыну көрсеткішіндегі үлкен өзгерістерді талдау үшін жарамсыз. Оның амплитудасының азды-көпті болжамды өзгерістері сыну көрсеткіші 0,007–0,008-ден аспайтын ауқымда өзгерген кезде байқалады.

4.2 Сенсор ажыратымдылығын бағалау

Сенсордың ажыратымдылығы мен анықтау шегін дәйекті бағалау үшін тағы бір эксперимент жүргізілді. Бұл эксперименттің қажеттілігі, соның ішінде

пайдаланылған толқын ұзындығы үшін изопропанол ерітінділерінің сыну көрсеткіші туралы нақты мәліметтердің болмауына байланысты болды. Бұл эксперименттің мақсаты зерттелетін ерітіндінің құрамында өзгерістер болмаған кезде сенсор көрсеткіштерінің тұрақты деңгейден ауытқу мәнін анықтау болды. Тәжірибе барысында сенсордың көрсеткіштері тазартылған суы бар кюветада алынды. Спектрлер 30 секундтан 3 минутқа дейінгі аралықпен 27 минут бойы өлшенді. Эксперимент нәтижелері 4.5. суретте көрсетілген.

Бастапқы кутулерге қарама-қарсы, плазмалық резонанстың есептелген спектрлік позициясының уақытқа тәуелділігі айқын экспоненциалды сипатқа ие, ол төменде көрсетілгендей, табиғи жағдайда дистилденген суды жылытуға шамамен 1 °C сәйкес келетін эксперимент кезіндегі температураның ауытқуымен байланысты болады. Мұндай физикалық процесті моно-экспоненциалды тәуелділікпен жақындатуға болады, ал сенсордың ажыратымдылығын анықтау үшін эксперименттік нүктелердің жуықтау қисығынан стандартты ауытқуын қолдануға болады.



4.5 Сурет – Уақыт бойынша судағы плазмондық резонанс орнының өзгеру динамикасы туралы эксперименттік мәліметтер.

Бөлме температурасында тазартылған су үшін сыну көрсеткішінің дисперсиясы $(-1) \times 10^{-4} \text{ RIU}/^{\circ}\text{C}$ тәртібінде болатыны белгілі [34]. Сондай-ақ спектрдегі резонанс позициясының өзгеруіне әсер ететін көлбеу Брегг торының шыңдарының температуралық ығысуын атап өткен жөн.

Бұл жағдайда ол әсердің 20% -дан аспайды және трендтің жалпы сипатын өзгертпейді. Жоғарыдағы суретте көрсетілген ең жақсы өңдеу нәтижелері 3 (15) әдіспен алынғаны ерекше қызығушылық тудырады. Тәжірибе нүктелерінің жуықтау қисығынан стандартты ауытқуы $5,3 \times 10^{-4} \text{ нм}$ болды, ол $576 \text{ нм} / \text{RIU}$ датчик сезімталдығын ескере отырып, $9,2 \times 10^{-7}$ тең сыну көрсеткішіндегі стандартты ауытқуды анықтайды. Үш еселік стандартты ауытқу негізінен сенсордың ажыратымдылығына сәйкес келеді [46, 47], сондықтан сенсордың ажыратымдылығын бағалау $2,8 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ құрайды. Бұл мән белгілі аналогтық сенсорлармен алынған нәтижелерден әлдеқайда жақсырақ [47]. Біздің көзқарасымызды басқа металдардың немесе полимерлердің жұқа қабаттарымен

алтын бетін жабу сияқты сенсордың сезімталдығын арттыру әдістерімен біріктіру [18] *ceteris paribus* анықтау шегін одан әрі жақсартады.

Осылайша, NVBR негізіндегі плазмоникалық сенсордың көрсеткіштерін интерпретациялау үшін бірнеше спектрлік шыңдарды және сенсордың толық беру спектрінің конвертін есепке алуға негізделген спектрлік талдауға кешенді тәсілді қолдану қажет деген қорытынды жасауға болады. .

4.3 Температураның өзгеруінің әсері

Зерттелетін ерітіндінің тұрақты құрамындағы плазмондық резонанс орнының уақытқа тәуелділігінің экспоненциалды сипаты жүйенің температуралық дрейфінің болуы туралы болжам жасауға мүмкіндік берді. 4.1.2 бөлімінде айтылғандай, кез келген заттың сыну көрсеткіші оның температурасымен тікелей байланыста болады, оны сыну көрсеткішінің температуралық дисперсиясы деп атайды. Температура дисперсиясының болуы, сәйкесінше, жүйе температурасының өзгеруімен сенсор көрсеткіштерінің өзгеруін білдіреді, бұл нақты өлшеулер кезінде сенсордың рұқсатын айтарлықтай төмендететін елеулі теріс фактор болуы мүмкін.

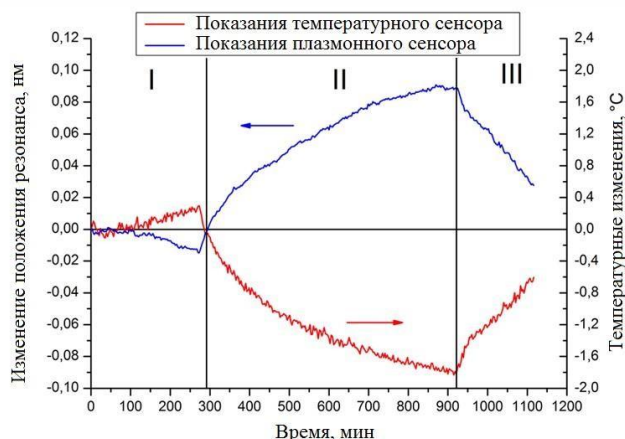
Келесі экспериментте (2.9) суретте көрсетілген қондырғыны қолдана отырып, дистилденген судағы сенсор көрсеткіштерінің температураға тәуелділігі зерттелді, бұл температураның өзгеруі арқылы сыну көрсеткішінің өзгеруін байқауға мүмкіндік берді. Эксперименттің өзі дистилденген судың сыну көрсеткішінің өзгеруін ұзақ уақыт бақылау болды, содан кейін оның температурасын жеке тәуелсіз сенсормен бақылау болды. Эксперимент кезінде бөлмедегі температура өзгерді. Ауа күндіз жылынып, түнде салқындады. Температура өлшеу дәлдігі $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ болатын классикалық Брэгг температуралық сенсорының көмегімен бақыланды. Бүкіл эксперименттің ұзақтығы 19 сағаттан сәл аз болды.

Көптеген сұйықтықтар үшін сыну көрсеткішінің температуралық дисперсиясы белгілі параметр болып табылады. Осы себепті, эксперимент барысында сұйықтықтың температурасын дәл өлшеу сенсор көрсеткіштерінің температуралық ауытқуын өтеу үшін қолданылуы мүмкін. Бөлме температурасындағы дистилденген су үшін сыну көрсеткішінің дисперсиясы

$(-1) \cdot 10^{-4} \text{ RIU}/^{\circ}\text{C}$ [14]. Көптеген су негізіндегі биологиялық ерітінділер үшін температура дисперсиясын ұқсас деп санауға болады, бұл сенсор көрсеткіштерін температуралық өтеу үшін әмбебап әдісті қолдануға мүмкіндік береді.

Температураға тәуелділікті өлшеу бойынша деректер 4.6-суретте келтірілген. Абсцисса осі бойынша уақыт минутпен кейінге қалдырылады. Сол жақ ординат осі плазмалық резонанстың толқын ұзындығының өзгеруін (көк қисық) көрсетеді, температура ординаттың оң осі бойымен кейінге қалдырылады. Брэгг температура сенсорының көрсеткіштері қызыл қисықты

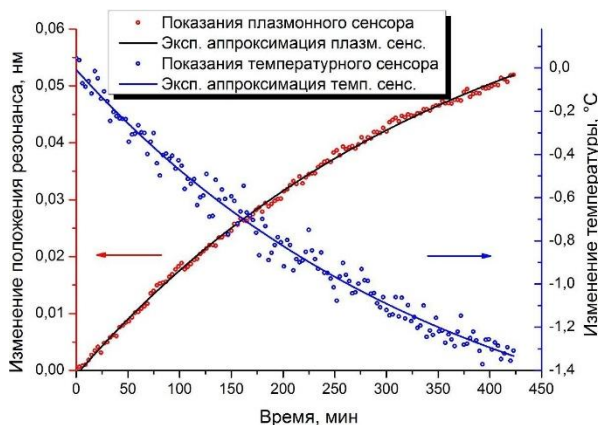
көрсетеді.



4.6 Сурет – Температуралық тәжірибенің нәтижелері.

Эксперименттің бірінші кезеңіндегі температура сенсорының көрсеткіштері бойынша (I аймақ, сурет. 4.6), қоршаған ортаның температурасы $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа өсті, бұл бөлме жағдайында судың сыну көрсеткішінің шамамен $3 \cdot 10^{-5}$ төмендеуіне теориялық тұрғыдан сәйкес келуі керек [44]. Екінші кезеңде зерттелетін сұйықтықтың температурасы $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа төмендеді, бұл сәйкесінше сұйықтықтың сыну көрсеткішінің жоғарылауына әкелді. Бұл плазмалық сенсормен бекітілген (II аймақ, сурет. 4.6). Үшінші кезеңде (III аймақ, сурет. 4.6) бөлмедегі ауаның қызуы қайтадан байқалды және келесі 3,4 сағаттық эксперимент кезінде сұйықтықтың температурасы $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа жоғарылады.

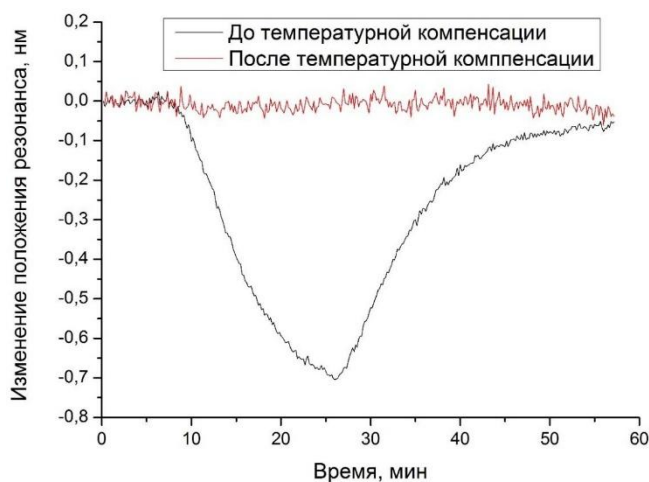
Тәжірибе деректері сенсордың ажыратымдылық параметрін нақтылау үшін де пайдаланылды. Ол үшін II бөлім пайдаланылды сурет. 4.6, судың ұзақ салқындауына сәйкес келеді. Жуықтау нәтижелері 4.7. суретте көрсетілген.



4.7 Сурет – Температуралық тәжірибенің мәліметтерін жуықтау нәтижелері. Жаңартылған деректерге сәйкес сенсордың рұқсаты 3×10^{-6} RIU құрайды, ол бастапқы бағалаудан сәл ғана ерекшеленеді.

Плазмалық резонанс позициясының температураға тәуелділігі маңызды фактор болып табылады, өйткені кварц әйнегі де, зерттелетін сұйықтық та сыну

көрсеткішінің өзіндік температуралық дисперсиясына ие. Бұл сонымен қатар температуралық эксперименттерде сенсордың сезімталдығының аздап төмендеуінен көрінеді, бұл әдебиетте келтірілген фактілерге сәйкес келеді [26]. Сонымен қатар, қоршаған ортаның температурасын бақылау температураның өзгеруінің сыналатын ерітіндінің сыну көрсеткішіне әсерін толығымен ескеруге және өтеуге мүмкіндік береді, бұл биосенсор ретінде жүйенің дәлдігін едәуір жақсарта алады. Тазартылған су үшін температуралық ығысу өте мақсатын қолдану мысалы 4.8-суретте келтірілген.



4.8 Сурет - Температуралық компенсацияны практикада қолдану мысалы.

Температураны өтеуден кейінгі сигналдың шуылының плазмоникалық сенсордың өлшеу қателеріне емес, температура сенсорының шуына байланысты екенін атап өткен жөн. Температура ауытқуының орнын толтырумен жоғары дәлдіктегі өлшемдер қажет болса, температура сенсорының көрсеткіштерін жуықтау және орташалау үшін математикалық әдістерді қолдануға болады.

Осылайша, температуралық тәжірибелер барысында алынған нәтижелер шамамен $-0,05 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ болатын плазмондық резонанстың спектрлік жағдайына температуралық әсердің болуын анықтауға және шамасын өлшеуге мүмкіндік берді. Осының арқасында температура әсерін өтей отырып, талшықты плазмоникалық сенсордың көрсеткіштеріне түзетулер енгізу мүмкін болды.

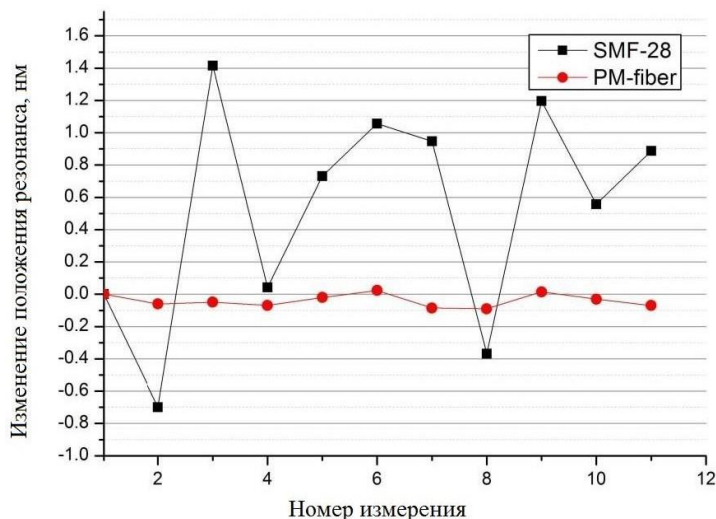
4.4 Поляризация әсерін тұрақтандыру

Талшық бетіндегі беттік плазмонның қозуына поляризация әсерін тұрақтандыру мәселесінің маңыздылығы бұрын да бірнеше рет айтылған. Температуралық тәжірибелер нәтижесінде қол жеткізілген жетістіктер бұл мәселенің өзектілігін одан әрі арттырды. Шынында да, температураның ауытқуын өтеу мүмкіндігін алғаннан кейін, стационарлық жағдайларда сенсор көрсеткіштерінің тұрақсыздығын тудыратын негізгі фактор ортогональды

компоненттер арасындағы поляризацияның асып кетуі болып табылады. Бұл қоректендіру талшығының механикалық релаксациясымен де (әсіресе механикалық поляризация реттегішінің ішінде) де, оптикалық сигнал көзінің жетілмегендігімен де түсіндіріледі.

PMF пайдалану қос сыну осьтері арасындағы поляризацияның ағып кету коэффициентін барынша азайтуға мүмкіндік береді. Бұл сенсор көрсеткіштерінің тұрақтылығын айтарлықтай арттыруы керек және қоректендіру кабелінің механикалық релаксациясының әсерін азайтуы керек.

4.9-суретте SMF-28e негізіндегі сенсормен салыстырғанда PMF-де жазылған жоғары тұрақты сенсордың әрекетін көрсететін эксперимент нәтижелері көрсетілген. 2.11-суретте көрсетілген орнату арқылы жүргізілген тәжірибе кезінде екі оптикалық талшыққа шамасы мен бағыты бойынша бірдей механикалық жүктемелер түсірілді. Бұл жүктемелер тікелей сенсор элементінің алдында берілетін оптикалық талшықтардың шамасы мен бағыты бойынша кездейсоқ деформация арқылы модельденді. Спектрлер жүктелген талшықтың әртүрлі позицияларында жазылған. Деректер 3-тарауда сипатталған бағдарламалық қамтамасыз етуді және плазмондық резонанстың орнын анықтайтын математикалық аппаратты қолдану арқылы автоматты түрде өңделді. Өңделген мәліметтер 4.9-суретте көрсетілген. X осі бойынша нақты позицияға және кіріс талшықтарының деформация деңгейіне сәйкес келетін өлшеудің реттік нөмірі кейінге қалдырылады. Ордината плазмалық резонанстың есептелген спектрлік орнын көрсетеді.

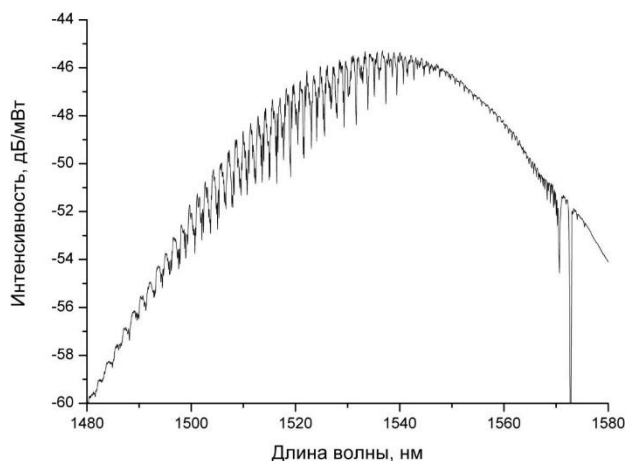


4.9 Сурет – Беруші талшықтың иілісіне реакция мысалында датчиктердің тұрақтылығын салыстыру.

Өткізілген эксперимент сенсорды жобалауда PMF қолдану нәтижесінде алынған артықшылықтарды анық көрсетті. Өкінішке орай, бұл тәсілдің қолдану мүмкіндігі сыну көрсеткіштерінің салыстырмалы түрде тар жұмыс диапазонымен шектелді. Сонымен қатар, 2-тарауда айтылған спектрлік үлгінің контрастының төмендеуі мұндай сенсорларды анықтау шегіне шектеулер қояды,

бұл, мысалы, биомедициналық қолданбалар үшін жоғары сезімтал сенсорларды әзірлеуде елеулі кедергі болуы мүмкін.

Жұмыс барысында ұсынылған тағы бір тәсіл оптикалық сәулеленуді поляризациялайтын талшыққа тікелей НВБР жазу болды. Мұндай талшық одан да үлкен бифуркациямен және саңылаудың жоғарылауымен сипатталады, бұл олардағы торларды жазуды қиындатады. Осы бағытта алынған ең жақсы нәтижелер төмендегі суретте көрсетілген.



4.10 Сурет - Талшық поляризаторында жазылған НВБР өткізу спектрі.

Мұндай торды 2-бөлімде сипатталған технология бойынша алтын қабатымен жапқан кезде, өткізу спектріндегі қабықтың сәнін сипаттайтын шыңдар мен сәтсіздіктердің салыстырмалы деңгейі 1 дБ-ден аз деңгейге дейін төмендеді, бұл беткі плазманды қоздыру үшін осындай дизайнды ұзақ уақыт қолдануға мүмкіндік бермеді. Нәтижесінде, көптеген жағдайлар үшін ең жақсы шешім ымыраға келу нұсқасы болды, онда НВБР стандартты SMF-28e-нің ең қысқа бөлігінде (шамамен 2 см) жазылды, ол тікелей поляризатор лампасына дәнекерленген, сонымен қатар бұл жағдайда талшықты жеткізу функциясын орындайды. Сонымен қатар, талшықты поляризатордың өзара бағыты және торлы соққылардың бұрышы сезімтал элементтің үлгісін жасаудың толық циклынан кейін орындалды. Талшықтар өзара бағытталған, сондықтан сенсордың өткізу спектріндегі плазмалық резонанс кескінінің контрасты максималды болады. Мұндай конфигурация әдеттегі схема жағдайында поляризациялық ауысуды тудыратын көптеген әсерлерге жақсы қарсылыққа ие.

ҚОРЫТЫНДЫ

1. Көлбеу Брегг торы негізінде плазмоникалық сыну көрсеткішінің датчиктерінің талшықты-оптикалық үлгілерін қайталанатын өндіру технологиясы әзірленді. Талшықтың цилиндрлік бетіне жұқа металл қабықшаларды біркелкі тұндыру әдісі әзірленді.

2. Алғаш рет плазмонды резонансты қоздыратын оптикалық сәулеленудің поляризациясының өздігінен өзгеру әсерінің жағымсыз факторын жоюға арналған эксперименттік тәсіл ұсынылып, енгізілді. Тәсіл поляризацияны және поляризациялық сәулеленуді сақтай отырып, қос сынғыш талшықтарда тікелей беттік плазмондардың генерациясына жағдай жасауға негізделген. Бұл тәсілдің тиімділігі осындай датчиктердің спектріндегі резонанстық позицияның тұрақтылығын изотропты талшықта жазылған сенсордың спектріндегі резонанспен салыстыру арқылы көрсетіледі. Эксперименттік деректер тұрақтылықтың шама ретінен артық жақсарғанын растады.

3. Өзгертін сыртқы жағдайлар әсерінен оптикалық талшықтағы плазмонды резонанстың әрекетін зерттеу үшін бірқатар автоматтандырылған эксперименттік қондырғылар жасалды. Қоршаған орта температурасының өзгеруімен талшықты датчиктің спектріндегі плазмондық резонанстың орналасу әрекетінің динамикасы эксперименталды түрде зерттелген. Тәуелділік сипаты мен оның шамасы ашылады, өлшемдердің жалпы суретіне әсер ету дәрежесі бағаланады. Сигналдың температуралық компенсациясының мүмкіндігі көрсетілген, бұл нақты жағдайларда пайдаланған кезде сенсордың тұрақтылығын арттыруға мүмкіндік береді.

4. Зерттелетін сұйықтықтың ағынында өлшеулер жүргізу үшін арнайы микрофлюидтік чип әзірленген. Чип конструкциясының қаттылығы және талшықты сезгіш элементтің микрофлюидтік арнаға бірігуі мұндай өлшеу жүйесінің жоғары ажыратымдылығына кепілдік береді және талшықтың сезімтал бөлігінің механикалық деформацияларының әсерін барынша азайтады.

5. Алғаш рет көлбеу Брегг торының спектріндегі резонанстың орнын айқын түрде автоматты түрде анықтауға мүмкіндік беретін бірегей математикалық аппарат әзірленді. Ол сезімталдық, ажыратымдылық және анықтау шегі сияқты эксперименттік сенсорлардың барлық сандық сипаттамаларын өлшеу үшін пайдаланылды. Осы жұмыста ұсынылған алгоритмдер бір резонанс шыңын өңдеуге негізделген «классикалық» әдіспен салыстырғанда спектрдегі плазмондық резонансты анықтау дәлдігін бірнеше есе арттыруға мүмкіндік берді. Сондай-ақ жаңа алгоритмнің зерттелетін сұйықтықтардың сыну көрсеткіштерінің кең диапазонында жұмыс істеу қабілетін ерекше атап өту қажет, бұл «классикалық» әдісті пайдалану кезінде мүмкін емес еді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Э.Кречман, Х.Петер. Жарықпен қоздырылған радиациялық емес беттік плазмондардың радиациялық ыдырауы // *Zeitschrift für Naturforschung A.* – 1968. – V. 23. – N 12. – P. 2135-2136.
2. Дж.Гомола, С.С.Ее, Г.Гоглиц. Беттік плазмонды резонанстық сенсорлар // *Датчиктер мен жетектер В: Химиялық.* - 1999. - V. 54. - N 1-2. - 3-15 б.
3. Дж.Поллет, Ф.Дельпорт, Д.Т.Ти, М.Веверс, Дж.Ламмертин. Аптамер негізіндегі беттік плазмонды резонансты зонд // *SENSORS, 2008 IEEE –IEEE, 2008.* – С. 1187-1190.
4. Д.Сарид, В.А.Челленер. Беттік плазмондарға заманауи кіріспе: теория, математикалық модельдеу және қолдану. Кембридж университетінің баспасы, 2010 ж.
5. Ю.Юань, Т.Гуо, Х.Цю, Дж.Таң, Ю.Хуан, Л.Чжуан, С.Чжоу, З.Ли, Б.-О. Гуан, Х. Чжан, Дж. Альберт. Электрохимиялық беттік плазмонды резонансты талшықты-оптикалық сенсор: электроактивті биопленкаларды орнында анықтау // *Аналитикалық химия.* – 2016. – V. 88. – N 15. – Б. 7609-7616.
6. Л.Хан, Т.Гуо, Ц.Си, П.Сю, Дж.Лао, Х. Чжан, Дж.Сю, Х.Чэн, Ю.Хуан, Х.Лян, В.Мао, Б.-О. Гуан. Плазмоникалық еңкейтілген талшықты торлы датчиктер көмегімен аквапорин-2 нақты анықтау // *Lightwave технологиясы журналы.* – 2017. – V. 35. – N 16. – Б. 3360-3365.
7. Х.-Ы. Лин, Ю.-С. Цао, В.-Х. Цай, Ю.-В. Ян, Т.-Р. Ян, В.-С. Шей. Жарық және 850 нм-жарық диодты галогендермен *Legionella pneumophila* анықтау үшін беткі плазмонды резонанс негізінде бүйірлік жылтыратылған талшықты иммуносенсорды әзірлеу және қолдану // *Сенсорлар мен жетектер А: Физикалық.* – 2007. – V. 138. – N 2. – Б. 299-305.
8. К.Кошетер, Т.Гуо, Дж.Альберт. Плазмоникалық талшықты-оптикалық биохимиялық сенсорларға шолу: анықтау шегін жақсарту // *Аналитикалық және биоаналитикалық химия.* – 2015. – V. 407. – N 14. – Б. 3883-3897.
9. Ю.Лин, Ю.Зу, Ю.Мо, Дж.Гу, Р.Г.Линдквист. Локализацияланған беттік плазмонды резонанстық биохимиялық зондтау үшін оптикалық талшық ұштарындағы электронды сәулелі алтын нанодот массивтері // *Сенсорлар.* – 2010. – V. 10. – N 10. – Б. 9397-9406.
10. В.Маркес-Крус, Дж.Альберт. Жоғары ажыратымдылықтағы NIR TFBG көмегімен биохимиялық сенсорлар // *Lightwave технологиясы журналы.* – 2015. – V. 33. – N 16. – Б. 3363-3373.
11. Ю.Цао, Дж.Чжан, Ю.Ян, З.Хуан, Н.В.Лонг, Ц.Фу. Химиялық және биомедициналық қолданбаларға арналған асыл металл наноматериалдарына негізделген SERS субстраттарының инженериясы // *Қолданбалы спектроскопиялық шолулар.* – 2015. – V. 50. – N 6. – 499-525.

12. К.А.Томышев, Д.К.Тажетдинова, Е.С.Мануилович, О.В.Бутов. Биомедициналық қолданбаларға арналған жоғары ажыратымдылықтағы талшықты-оптикалық бетінің плазмнды резонанстық сенсоры // Қолданбалы физика журналы. – 2018. – V. 124. – N 11. – 113106.
13. К.Рибо, В.Буазен, В.Малаховска, В.Дюбуа, П.Мегрет, Р.Ваттиез, К.Кошетер. Плазмоникалық оптикалық талшықты торлы сенсоры бар шағын биомолекула иммуносенсоры // Биосенсорлар және биоэлектроника. – 2016. – V. 77. – 315-322-
14. JC Riboh, AJ Haes, AD McFarland, C. Ranjit Yonzon, RP Van Duyne. Наноөлшемді оптикалық биосенсор: жақсартылған нанобөлшектердің адгезиясы арқылы қосылған физиологиялық буфердегі нақты уақыттағы иммундық талдау The Journal of Physical Chemistry B. – 2003. – V. 107. – N 8. – P. 1772-1780.
15. В.А.Астапенко. Қоршаған ортадағы электромагниттік процестер, наноплазмоника және метаматериалдар. – Долгопрудный: Интеллект, 2012 ж.
16. RL Rich, DG Myszka. 2004 жылдың шолуы коммерциялық оптикалық биосенсорлық әдебиет // Молекулярлық тану журналы: Пәнаралық журнал. – 2005. – V. 18. – N 6. – Б. 431-478.
17. Дж.Альберт, С.Лепинай, К.Кошетер, МС ДеРоза. Жоғары ажыратымдылықтағы тордың көмегімен беткі плазмнды резонансты оптикалық талшықты аптасенсор // Әдістер. – 2013. – V. 63. – N 3. -239-254.
18. П.Бхатия, Б.Д.Гупта. Беттік-плазмнды-резонанс негізіндегі талшықты-оптикалық сыну көрсеткішінің сенсоры: сезімталдықты арттыру // Қолданбалы оптика. – 2011. – V. 50. – N 14. – Б. 2032-2036.
19. DJ Gentleman, KS Booksh. Көпмодты талшықты-оптикалық беттік плазмнды-резонанстық дип-зонд көмегімен тұздылықты анықтау // Таланта. – 2006. – V. 68. – N 3. – 504-515.
20. М.Ига, А.Секи, К.Ватанабе. Күміс қабықшасы бар гетеро-ядролы құрылымды талшықты-оптикалық бетінің плазмнды резонанстық сенсоры // Датчиктер мен жетектер В: Химиялық. – 2004. – V. 101. – N 3. – Б. 368-372.
21. Х.-Ы. Лин, С.-Н. Хуан, Г.-Л. Ченг, Н.-К. Чен, Н.-С. Чуй. Локализацияланған беттік плазмнды резонансқа негізделген конустық оптикалық талшықты сенсор // Optics Express. – 2012. – V. 20. – N 19. – Б. 21693-21701.
22. Р.Славик, Дж.Гомола, Э.Брында. В стафилококк энтеротоксинін жылдам анықтауға арналған миниатюралық талшықты-оптикалық бетінің плазмнды резонанстық сенсоры // Биосенсорлар және биоэлектроника. – 2002. – V. 17. – N 6-7. - 591-595.
23. M. D. Baiad, M. Gagne, W.-J. Мадор, Э.Де Монтиньи, Н.Годбу, К.Буду, Р.Қашяп. Қос қапталған талшықты қосқышпен беттік плазмнды резонанстық сенсорды сұрау және қиғаш талшықты Брегг торымен қоздырылған қаптау режимдері // Оптика әріптері. – 2013. – V. 38. – N 22. – Б. 4911-4914.
24. К.Кошетер, Ю.Шевченко, Л.-Ю. Шао, М.Вильпарт, Дж.Альберт. Поляризация қасиеттерін өлшеуден қиғаш талшықты торлы SPR сенсорларының

жоғары ажыратымдылығын сұрау // Optics express. – 2011. – V. 19. – N 2. – Б. 1656-1664.

25. Д.Фэн, В.Чжоу, Х.Цяо, Дж.Альберт. Бір жақты алтын жабындары бар жоғары ажыратымдылықтағы талшықты-оптикалық беттік плазмонды резонанстық сенсорлар // Optics Express. – 2016. – V. 24. – N 15. – Б. 16456-16464.

26. Л.-Ы. Шао, Ю.Шевченко, Дж.Альберт. Еңкейтілген талшықтың ішкі температуралық сезімталдығы Брегг тор негізіндегі беткі плазмонды резонанстық сенсорлар // Optics express. – 2010 ж. – V. 18. – N 11. – Б. 11464-11471.

27. Ю.Ю.Шевченко, Дж.Альберт. Алтынмен қапталған қиғаш талшықты Брегг торларындағы плазмонды резонанстар // Оптика әріптері. – 2007. – V. 32. – N 3. – 211-213.

28. К.А.Томышев, Ю.К.Чаморовский, В.Е.Устимчик, О.В.Бутов. Көлбеу талшықты Bragg торына негізделген поляризация тұрақты плазмоникалық сенсор // 2017 25-ші оптикалық талшықты сенсорлар конференциясы (OFS) – IEEE, 2017. – С. 1-4.

29. Джексон. Классикалық электродинамика. – Нью-Йорк: Уайли, 1962 ж.

30. К.Толпыго. Деформацияланатын иондардан жасалған тау-тұз типті тордың физикалық қасиеттері // ЖЭТФ. – 1950. – V. 20. – N 6. – Б. 497-506.

31. А.Отто. Күмістегі радиациялық емес беттік плазмалық толқындардың бұзылған толық шағылысу әдісімен қозуы // Zeitschrift für Physik A Адрондар мен ядролар. – 1968. – V. 216. – N 4. – Б. 398-410.

32. С.М.А.Уддин, С.С.Чоудхури, Э.Кабир. Кречман конфигурациясына негізделген беттік плазмонды резонанстық биосенсорлардағы оңтайлы металл қалыңдығын анықтаудың теориялық моделі // 2017 Электротехника, компьютерлік және коммуникациялық инженерия бойынша халықаралық конференция (ECCE) –IEEE, 2017. – С. 651-654.

33. Т. Вартанян. Металл нанокұрылымдары физикасының негіздері. – Санкт-Петербург: NRU ИТМО, 2013 ж.

34. И.А.Нечепуренко, А.В.Дорофеев, К.А.Томышев, О.В.Бутов. Көлбеу Брагг торы бар оптикалық талшықта тұндырылған мыс пленкасындағы плазмонды резонансты зерттеу // Радиоэлектроника журналы. - 2015. - N 4. - 6-6.

35. MD Losego, AY Ефременко, CL Rhodes, MG Cerruti, S. Franzen, J.-P. Мария. Өткізгіш оксидті жұқа пленкалар: беттік плазмонды резонансты түсінуге және басқаруға арналған модельдік жүйелер // Қолданбалы физика журналы. – 2009. – V. 106. – N 2. – Б. 024903.

36. Х.Геми, Т.Тио, Д.эа Групп, Т.В.Эббесен, Х.Лезец. Беттік плазмондар ұзындықтағы саңылаулар арқылы оптикалық өткізуді күшейтеді // Физикалық шолу В. – 1998. – V. 58. – N 11. – С. 6779.

37. В.С. Лисица. Нанооптикаға кіріспе. – Мәскеу: МИПТ, 2012. – 159.

38. CL Haynes, AD McFarland, RP Van Duyne. Беттік күшейтілген Раман спектроскопиясы // Аналитикалық химия. – 2005. – V. 77. – N 17. – Б. 338 А-346 А.

39. М.И.Стокман. Спазерлер түсіндірілді // Табиғат фотоникасы. – 2008. – V. 2. – N 6. – 327.
40. Д.В.Шумкова, А.Е.Левченко. Арнайы талшықты жарық бағыттағыштары. – Пермь: Пермь ұлттық зерттеу политехникалық университетінің баспасы, 2011 ж.
41. ГП Аграваль. талшықты-оптикалық байланыс жүйелері. Джон Уайли және ұлдары, 2012.
42. Д. Маркуз. Диэлектрлік оптикалық толқын өткізгіштер теориясы. Elsevier, 2013 ж.
43. В.А. Гуртов. Оптоэлектроника және талшықты оптика. – Петрозаводск: ПетрГУ баспасы, 2005 ж.
44. YC Lin. Беттік плазмнды резонанс негізіндегі оптикалық талшықты сыну көрсеткішінің сенсорының сипаттамалары // Микротолқын және оптикалық технология хаттары. – 2013. – V. 55. – N 3. – 574-576-б.
45. Ю.С.Двиведи, А.К.Шарма, Б.Гупта. Дизайн параметрлерінің беткі плазмндық сенсор негізіндегі талшықты-оптикалық сенсордың өнімділігіне әсері // Плазмоника. - 2008. - V. 3. - N 2-3. - 79-86 б.

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

дипломдық жұмыс

Рамазан Ғалым

5B071900 - Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Тақырыбына: **«Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау»**


Дипломдық жұмыста, оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдауды қарастырған. Дипломдық жұмыс төрт бөлімнен тұрады. Оптикалық талшықтардағы плазмонды резонанстың генерациясының ең перспективалы тәсілі қиғаш Брэгг торларын пайдаланатын құрылымдар екенін көреміз. Бұл ретте талшықты плазмониканың дамуына кедергі келтіретін және зертханадан тыс талшықты плазмоникалық сенсорларды пайдалану туралы айтуға мүмкіндік бермейтін осындай элементтердің негізгі кемшіліктері анықталды. Осы кемшіліктерді жою жолдарын зерттеу осы дипломдық жұмыстың өзекті және практикалық маңызды міндеті болып табылады.

Көлбеу Брегг торы негізінде плазмоникалық сыну көрсеткішінің датчиктерінің талшықты-оптикалық үлгілерін қайталанатын өндіру технологиясы әзірленді. Талшықтың цилиндрлік бетіне жұқа металл қабықшаларды біркелкі тұндыру әдісі әзірленді. Алғаш рет плазмонды резонансты қоздыратын оптикалық сәулеленудің поляризациясының өздігінен өзгеру әсерінің жағымсыз факторын жоюға арналған эксперименттік тәсіл ұсынылып, енгізілді. Тәсіл поляризацияны және поляризациялық сәулеленуді сақтай отырып, қос сынғыш талшықтарда тікелей беттік плазмондардың генерациясына жағдай жасауға негізделген. Бұл тәсілдің тиімділігі осындай датчиктердің спектріндегі резонанстық позицияның тұрақтылығын изотропты талшықта жазылған сенсордың спектріндегі резонанспен салыстыру арқылы көрсетіледі. Эксперименттік деректер тұрақтылықтың шама ретінен артық жақсарғанын растады.

Жұмыс бағасы

Жалпы, дипломдық жұмыс "80 В жақсы" деген бағаға, ал студент Рамазан Ғалым 5B071900 - РЭТ мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавр» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші
т.ғ.м., ЭТЖТ каф. лекторы
С.Марксұлы

«25»  2022 ж.

СЫН – ПІКІР

Дипломдық жоба

Рамазан Ғалым

5B071900 - Радиотехника, электроника және телекоммуникация

Тақырыбы: «**Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау**»

Орындалды:

- а) графикалық бөлімі 9 бет;
- б) түсіндірме жазбасы 65 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Дипломдық жұмыста, оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдауды қарастырған. Дипломдық жұмыс төрт бөлімнен тұрады. Оптикалық талшықтардағы плазманды резонанстың генерациясының ең перспективалы тәсілі қиғаш Брэгг торларын пайдаланатын құрылымдар екенін көреміз. Бұл ретте талшықты плазмониканың дамуына кедергі келтіретін және зертханадан тыс талшықты плазмоникалық сенсорларды пайдалану туралы айтуға мүмкіндік бермейтін осындай элементтердің негізгі кемшіліктері анықталды. Осы кемшіліктерді жою жолдарын зерттеу осы дипломдық жұмыстың өзекті және практикалық маңызды міндеті болып табылады.

Көлбеу Брэгг торы негізінде плазмоникалық сыну көрсеткішінің датчиктерінің талшықты-оптикалық үлгілерін қайталанатын өндіру технологиясы әзірленді. Талшықтың цилиндрлік бетіне жұқа металл қабықшаларды біркелкі тұндыру әдісі әзірленді. Бұл тәсілдің тиімділігі осындай датчиктердің спектріндегі резонанстық позицияның тұрақтылығын изотропты талшықта жазылған сенсордың спектріндегі резонанспен салыстыру арқылы көрсетіледі. Эксперименттік деректер тұрақтылықтың шама ретінен артық жақсарғанын растады.

Жұмыс бағасы

Жалпы, дипломдық жұмыс "85 В+ жақсы" деген бағаға, ал студент Рамазан Ғалым 5B071900 - РЭТ мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавр» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Тұран университеті
PhD доктор.

М. Жасандықызы М.

«24» 05 2022 ж.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Рамазан Ғалым плагиат

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 1

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 14

Интервалы: 7

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

19.05.2022
Дата

Заведующий кафедрой



Маркетинг с.р.н

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Рамазан Ғалым плагиат

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Оптикалық талшықтағы плазмалық резонанс әдістерін талдау

Научный руководитель: Сұңғат Марксұлы

Коэффициент Подобия 1: 1

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 14

Интервалы: 7

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

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

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

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

Обоснование:

19.05.2022
Дата

Марксұлы С

проверяющий эксперт