

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Бүркітбаев ат. Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ОӘК 535.8

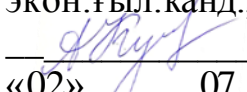
Қолжазба нұсқасында

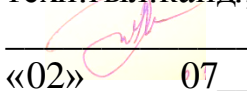
Атағұлова Мейрамгүл Мұңалбайқызы

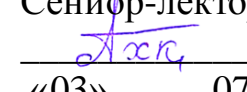
Магистрі академиялық дәрежесін іздену үшін

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация тақырыбы Оптикалық модулятор қолдана отырып,
талшықты-оптикалық тарату жүйелерінің өткізу
қабілеттілігін арттыру әдістерін жасау
Мамандық 6М071900 – «Радиотехника, электроника,
телекоммуникациялар»

Ғылыми жетекші,
экон. ғыл. канд., лектор
 А.Е. Куттыбаева
«02» _____ 07 _____ 2020 ж.

Оппонент,
техн. ғыл. канд., АУЭС доценті
 Касимов А.О.
«02» _____ 07 _____ 2020 ж.

Нормобақылаушы:
Сениор-лектор, доктор PhD
 А.Хабай
«03» _____ 07 _____ 2020 ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТЖҒТ каф. меңгерушісі
_____ И. Сырғабаев
« _____ » _____ 2020 ж.

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Бүркітбаев ат. Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрландыру институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы
6М071900 – «Радиотехника, электроника, телекоммуникациялар»

БЕКІТЕМІН

ЭТжҒТ каф. меңгерушісі

_____ И. Сырғабаев

« ____ » _____ 2020 ж.

**магистерлік диссертация орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант *Атағұлова Мейрамгүл Мұңалбайқызы*

Тақырыбы: *«Оптикалық модулятор қолдана отырып, талшықты-оптикалық тарату жүйелерінің өткізу қабілеттілігін арттыру әдістерін жасау»*

Университет ректорының *09.12.2019 ж.* № 466-М бұйрығымен бекітілген.

Дайын диссертацияны тапсыру уақыты *«9» шілде 2020 ж.*

Магистерлік диссертацияға берілген алғашқы мәліметтер: а) Белсенді оптикалық компоненттер; б) Акустикооптикалық модуляторлар; в) Литий ниобаты негізіндегі Мах-цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторлары.

Диссертациялық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) *Электр оптикалық модуляторлар;*

б) *Модельдеу ортасын сипаттау;*

в) *OPTISYSTEM интерфейсінің негізгі мүмкіндіктері.*

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс):

а) *Акустико-оптикалық модуляторларда жарық шоғының өту схемасы;*

б) *Керр әсері және Погелестің бойлық әсері негізінде оптикалық модуляторлардың жұмысы;*

в) *Мах-Цендер интерферометрі типті электр оптикалық модулятордың схемасы;*


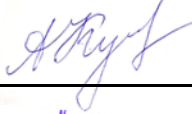
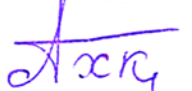
г) *ИМЦ типті модулятордың беріліс сипаттамасы.*

Ұсынылатын негізгі әдебиет 47 атау: 1) *Лебедев В.В., Ильичев И.В., Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов // 2014. №17) Петров А.Н., Тронева А.В., Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора // 2015.*

магистерлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Белсенді оптикалық компоненттер тізімін құру	04.01.2020 -25.01.2020	орындалды
Литий ниобаты негізіндегі Мах-цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторларын зерттеу	20.01.2020 -25.02.2020	орындалды
Optiwave бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарымен интеграциялау	25.02.2020 – 01.07.2020	орындалды

Диссертациялық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған бөлімдерге қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диссертация жұмысының тақырыбын талдау	А.Е.Куттыбаева, ЭТжҒТ каф.лекторы	20.01.2020	
Теориялық ақпарат	А.Е.Куттыбаева, ЭТжҒТ каф.лекторы	20.02.2020	
Норма бақылау	PhD докторы, ЭТжҒТ каф.сениор-лекторы Хабай А.	02.07.2020	

Ғылыми жетекші 

А.Е.Куттыбаева

Магистрант 

М.М.Атағұлова

Мерзімі

«02» шілде 2020 ж.

АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыста литий ниобаты негізіндегі интегралды-оптикалық модуляторлар қарастырылған. Интегралды-оптикалық жарық модуляторларының түрлері және олардың негізгі сипаттамалары келтірілген.

Литий ниобаты негізіндегі жүгіртпе толқын модуляторының оңтайлы конфигурациясы келтірілген.

Оптикалық сигнал беру желісінің сипаттамаларына электрооптикалық модулятордың жұмыс нүктесінің әсері көрсетілген.

Радиофотонды байланыс желісі бойынша өткен кезде радиосигналдың өзгеруі келтірілген.

Литий ниобаты негізіндегі Мах-Цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторлары модельденген.

АННОТАЦИЯ

В данной диссертации рассматриваются интегрально-оптические модуляторы на основе ниобата лития.

Представлены типы интегрально-оптических модуляторов света и их основные характеристики.

Дана оптимальная конфигурация модулятора бегущей волны на основе ниобата лития.

Показано влияние рабочей точки электропневмического модулятора на характеристики оптической сигнальной сети.

Дано изменение радиосигнала при прохождении радиофотонной связи. Моделируются электрооптические амплитудные модуляторы Маха-Цендера на основе ниобата лития.

ABSTRACT

This dissertation discusses integrated optical modulators based on lithium niobate.

The types of integrated optical light modulators and their main characteristics are presented.

The optimal configuration of a traveling wave modulator based on lithium niobate is given.

The influence of the operating point of the electrooptic modulator on the characteristics of the optical signal network is shown.

The change in the radio signal during the passage of the radio photon communication is given. Electro-optical Mach-Zehnder amplitude modulators based on lithium niobate are modeled.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Литий ниобаты негізіндегі интегралды-оптикалық модуляторлар	10
1.1 Интегралды-оптикалық жарық модуляторларының түрлері және олардың негізгі сипаттамалары	10
1.2 Литий ниобаты негізінде интегралды-оптикалық модуляторлардың құрылу принциптері және жұмыс ерекшеліктері	12
1.3 Оптикалық талшық бойынша ақпаратты тарату жүйелерінде интегралды-оптикалық модуляторларды қолдану	17
2 Литий ниобаты негізіндегі жүгіртпе толқын модуляторының оңтайлы конфигурациясы	19
2.1 Жүгіртпе толқын модуляторының сипаттамаларын есептеу әдісі	19
2.2 Күміс негізіндегі электродтары бар модуляторды эксперименттік зерттеу	24
3 Оптикалық сигнал беру желісінің сипаттамаларына электрооптикалық модулятордың жұмыс нүктесінің әсері	27
3.1 Радиофотонды байланыс желісі бойынша өткен кезде радиосигналдың өзгеруі	27
3.2 Пассивтік оптикалық құрамдар	28
3.3 WDM технологиясы	30
3.4 Циркуляторлар	34
4 Белсенді оптикалық компоненттер	38
4.1 Акустооптикалық модуляторлар	38
4.2 Электрооптикалық модуляторлар	40
5 Литий ниобаты негізіндегі Мах-Цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторлары	45
5.1 Оптикалық компоненттерді модельдеу	51
5.1.1 Модельдеу ортасын сипаттау	51
5.2 OPTISYSTEM интерфейсінің негізгі мүмкіндіктері	55
5.2.1 Компоненттер кітапханасы	55
5.3 Optiwave бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарымен интеграциялау	55
5.4 Модельдеу жүргізу үшін компоненттерді таңдау	57
5.5 Оптикалық модулятор жұмысын модельдеу	58
Қорытынды	65
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	66

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы оптикалық ақпараттық жүйелердің басты міндеттерінің бірі ол өткізу қабілетіне қойылатын талаптардың үздіксіз өсуімен және берілетін сигналдардың жиілік жолағын арттырумен тікелей байланысты болып табылады. Поккельс әсерінің негізінде интегралды-оптикалық модуляторлардың артықшылықтары айқын. Инерциялық электр оптикалық модуляция механизмі жоғары жиіліктерде жұмыс істеу үшін жақсы қолайлы. Олардағы оптикалық сәуле шағын көлденең өлшемдегі оптикалық толқынжолдарда таралады, бұл жарықты басқару үшін жеткілікті электр өрістерін кіші электр кернеулеріне қатысты қосымшалармен құруға мүмкіндік береді [1].

Интегралды-оптикалық модуляторларды жасау үшін қолданылатын негізгі электрооптикалық материал литий ниобаты (LiNbO_3) болып табылады. Бұл материал модуляторларда алғашқылардың бірі болды. Осыған қарамастан, жарық модуляциясына арналған жарияланымдардың ішінде литий ниобаты негізінде модуляторлар қолданылатын жұмыстардың үлесі соңғы онжылдықтар тек қана ұлғая бастады [2]. Модуляторлардың жұмыс жолағын ұлғайту, қажетті басқару кернеуін азайту мақсатында жаңа тәсілдерді іздеу жүргізілуде. Құрамында литий ниобаты негізінде интегралды-оптикалық модуляторлары бар аналогтық және цифрлық фотондық байланыс желілерінің сипаттамаларын жақсартуға арналған жұмыстар жарияланады, модуляцияның жаңа форматтары зерттеледі [3]. Жартылай өткізгіштер мен полимерлер негізіндегі модуляторлардың жаңа типтерінің белсенді зерттеулеріне қарамастан, литий ниобаты негізіндегі интегралды-оптикалық модуляторларға деген қызығушылық азайған жоқ. Бұл сыртқы жағдайларға жоғары төзімділікпен электрооптикалық әсерден басқа, төмен оптикалық және ӨЖЖ шығындарымен, оптикалық толқын өткізгіштер мен интегралды-оптикалық схемалардың әртүрлі элементтерін жасаудың өңделген технологияларымен түсіндіріледі [4-6].

Модуляторлардың АЖЖ жаңа түрлерін жасауға қызығушылық жаңа ғылыми бағыттар мен талшықты-оптикалық жүйелердің жаңа практикалық қолданылуының пайда болуымен нығайтылады. Қазіргі уақытта мұндай жүйелердің сипаттамаларын жақсарту және осындай жүйелердің компоненттерін жақсарту міндеті өте өзекті болып табылады, оны жарияланатын ғылыми жұмыстардың едәуір саны дәлелдейді.

Осы диссертациялық жұмыстың мақсаты оптикалық сигналдардың жоғары жиілікті модуляциясының тиімділігін арттырудың жаңа әдістерін әзірлеу және зерттеу, литий ниобаты астарындағы толқынды құрылымдар негізінде жоғары жиілікті модуляция құрылғыларын әзірлеу және олардың практикалық қолданудағы жұмысқа қабілеттілігін көрсету болып табылады.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді:

- литий ниобаты төсенішіндегі модуляторлар сипаттамаларының технологиялық операциялар параметрлерімен және оларды дайындау үшін қолданылатын материалдармен өзара байланысын анықтау үшін теориялық модель құру.

- жаңа модуляция форматтарын және жаңа интегралды-оптикалық модуляторларды қолдану кезінде талшықты-оптикалық байланыс желілерінің өткізу қабілетін арттыру және модуляция тиімділігін арттыру мүмкіндігін зерттеу.

- интегралды-оптикалық модуляторларды қосудың ерекше жағдайларында оптикалық сигналдар мен талшықты-оптикалық жүйелердің жоғары жиілікті модуляциясының сипаттамаларын арттыру мүмкіндігін зерттеу, жұмыс нүктесін басқарудың жаңа әдістерін жасау.

Ғылыми жаңалығы және практикалық маңыздылығы:

- Электрод материалының модуляторлардың сипаттамаларына әсер етуіне талдау жүргізілді. Гальваникалық күміс негізіндегі электродтары бар жүгіруші толқын модуляторының сипаттамаларын теориялық есептеу және тәжірибелік зерттеу жүргізілді. Электрод материалының меншікті өткізгіштігі модуляция жиілігінің жолағын кеңейтуге мүмкіндік береді және оптикалық және модульдеуші толқындардың топтық жылдамдықтарын келісу бойынша талаптарды төмендетеді.

- Электродтар формасының модулятордың сипаттамасына әсері зерттелді және электродтар қабырғаларының еңкіштігі электродтар қалыңдығын және жартылай толқынды кернеуді азайтуға мүмкіндік береді, алайда модулятор жиілігінің жолағын шектейді.

- Модулятордың жұмыс нүктесінің орналасуын оңтайландыру арқылы сыртқы модулятор мен оптикалық күшейткішпен талшықты-оптикалық байланыс желісі бойынша аналогтық АЖЖ сигналын беру коэффициентінің ұлғаюы көрсетілді.

Оптикалық күшейткіш және квадратурадан төмен өткізу коэффициентімен жұмыс нүктесінде литий ниобаты негізіндегі модулятор қолданылды.

- Мах-Цендердің электрооптикалық модуляторының жұмыс нүктесін тұрақтандырудың бастапқы әдісі ұсынылды, кері байланыс үшін орташалануы бар сызықты емес детектор қолданылады. Жоғары экстринкция коэффициенті бар (40 дБ-дан астам) когерентті оптикалық импульстерді генерациялау үшін жүйе әзірленді [7].

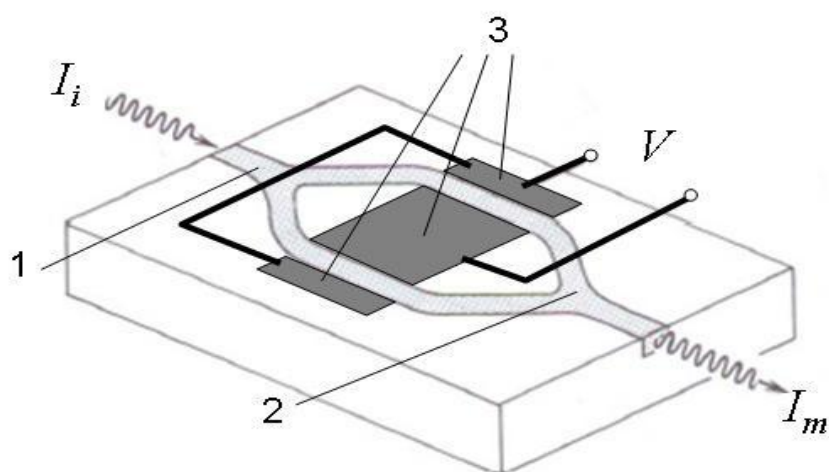
1 Литий ниобаты негізіндегі интегралды-оптикалық модуляторлар

1.1 Интегралды-оптикалық жарық модуляторларының түрлері және олардың негізгі сипаттамалары

Қазіргі ғылыми әдебиетте Жарық интегралды-оптикалық модуляторларының көптеген түрлерін кездестіруге болады. Оларға литий ниобаты негізіндегі электрооптикалық модуляторлар [8], InP негізіндегі электрооптикалық модуляторлар [9], электрабсорбциялық модуляторлар [10], галлий арсенидінің негізіндегі модуляторлар [11], электрооптикалық полимерлік модуляторлар [12], кремний негізіндегі модуляторлар [13] және басқалар жатады.

Бұл ретте коммерциялық қол жетімді модуляторлардың негізгі массасы екі технологиялық платформаларға негізделеді: литий ниобаты субстратындағы оптикалық толқын өткізгіштер және III-V жартылай өткізгіштер субстратындағы оптикалық толқын өткізгіштер (1550 нм толқын ұзындығында InP), мұнда литий ниобаты негізіндегі модуляторлар жиі жеке тұрған құрылғылар ретінде пайдаланылады.

Бүгінгі таңда интегралды-оптикалық модуляторлардың барлық түрлерінің ең көп қолданылатын литий ниобаты негізіндегі модуляторлар болып табылады. Бұл ретте электрооптикалық модуляторларды неғұрлым кең қолдану телекоммуникацияның цифрлық талшықты-оптикалық жүйелерінде табады. Барлық интегралды-оптикалық модуляторларды негізінде ниобат литий түрлері ең көп таралған болып табылады, интегралды-оптикалық амплитудалық модуляторлар Мах-Цендер (1.1-сурет).



Сурет 1.1 - Интегралдық-оптикалық модулятордың функционалдык сұлбасы. 1.2 – интегралдық-оптикалық тармақтағыштар. 3-басқарушы электродтар жүйесі

Амплитудалық модуляторлардың ең маңызды сипаттамалары: жартылай толқынды кернеу, жиіліктердің жұмыс жолағы және экстринкция коэффициенті.

Бұл Маха-Цендер модуляторында оптикалық сәуле екі құрамдас бөлінеді, содан кейін осы құраушылар әр түрлі оптикалық жолдар бойынша өтеді, бұл ретте көре отырып, әр түрлі фазалық кешігу, олар деңгейіне байланысты басқарушы кернеудің кірістегі модулятор, содан кейін құрайтын когерентті қалыптасады. Сонымен қатар, толқындар аймағында материалдың электрооптикалық қасиеттерінің өзгеруі салдарынан толқындар ішіндегі электрооптикалық коэффициенттер литий ниобатынан өзгеше болуы мүмкін. Модулятордың жұмыс жылдамдығын сипаттайтын параметр жиіліктердің жұмыс жолағы болып табылады. Әдетте жиіліктердің жұмыс жолағы модулятордың электрооптикалық жауабы төмен жиіліктерде электрооптикалық жауапқа қатысты -3 дБ деңгейіне дейін құлайтын жиілік ретінде анықталады.

Литий ниобаты негізінде амплитудалық модуляторлар жағдайында, жиі-3 дБ деңгейі 1,5 ГГц кем нүктеде аз жиіліктерде өлшенген электрооптикалық жауапқа қатысты анықталады. Модулятордың негізгі сипаттамаларының бірі үшін анықтаудың бұл таңдауы бірнеше себептері бар. Модулятордың жиіліктен электрооптикалық жауабы қисығы 1,5 ГГц-ке дейінгі жиілік аймағында тононононсыз болады.

Бұдан басқа, ажж сипаттамаларын өлшеу үшін қолданылатын оптикалық компонент анализаторлары (Lightwave Component Analyzers, lcas) және ондаған гигагерц диапазонында жұмыс істеуге қабілетті тізбектің векторлық анализаторлары (Vector Network Analyzers, vnas) сияқты құрылғының электр оптикалық компоненті, әдетте, төмен жиіліктерде өлшеу жүргізуге мүмкіндік бермейді.

Модулятордың экстринкция коэффициенті, әдетте, модулятордың шығысындағы Жарық қарқындылығының өткізу минимумындағы қарқындылыққа қатынасы түріндегі статикалық параметр ретінде анықталады. Литий ниобатындағы Маха-Цендер модуляторлары үшін типтік мән 20-30 дБ құрайды. Сонымен қатар, оптикалық импульстерді қалыптастырудың практикалық мақсаттары үшін статикалық емес, динамикалық параметр қызығушылық тудырады, ол жұмыс нүктесінің дрейфіне және модулятордың өткізу минимумындағы жұмыс нүктесін тұрақтандыру әдістеріне байланысты.

Сонымен қатар, оптикалық сәулеленудің барлық негізгі сипаттамаларын модуляциялауға мүмкіндік беретін бірқатар құрылғылар әзірленді: фаза [15], поляризация [16], жиілік [17,18]. Пайда болуы жаңа форматтағы модуляция талшықты-оптикалық байланыс желілерінде тікелей байланысты пайда жаңа үлгідегі модуляторларды, сонымен қатар пайда болуы форматты фазалық модуляция QPSK [14] әкелді пайда болуына ерекше үлгідегі модуляторларды баланстық параллель қосу интерферометрлі Маха-Цендер[20]. Литий ниобаты негізіндегі модуляторлар модульдеуші толқындардың таралу түрі бойынша ерекшеленеді. Модуляторлар шоғырланған параметрлермен [21,22] және

модуляторлар жүгіртпе толқын [23]. Сондай-ақ резонансты электродтар бар тар жолақты модуляторлар бар [24,24-26].

Жұмыс жиілігі шоғырланған параметрлері бар модуляторлар үшін гигагерц бірліктерін құрауы мүмкін [21,22,27,28]. Модуляторларды жүгіртпе толқын тарайтын жиіліктер жолағы үшін – 40 гигагерц [29]. Бұл жағдайда оптикалық сәулеленуді 300 ГГц-ге дейін модуляциялауға қабілетті литий ниобаты негізіндегі жүгіруші толқынның интегралды-оптикалық модуляторлары көрсетілген. Электродтары бар модуляторлар ондаған гигагерц жиілігінде тар спектрде модуляцияны қамтамасыз ете алады.

1.2 Литий ниобаты негізінде интегралды-оптикалық модуляторлардың құрылу принциптері және жұмыс ерекшеліктері

1.2.1 Литий ниобатының қасиеттері

Литий ниобаты *segneto* - электрик болып табылады, z осінің бойымен салыстырмалы түрде үлкен поляризациясы бар және 3m кристаллографиялық тобына жатады. 2-ші түрдегі фазалық өту температурасы (Кюри температурасы) 1483 к құрайды.

Кесте 1.1 - Литий ниобаты кристалдарының қасиеттері.

Сипаттамасы	Мәні
Нүктелік топ	3m
Кеңістіктік топ	R3c
Тұрақты торлар (Å)	a=15,5 , c=13,863
Балқу температурасы (°C)	1255±5
Кюри Нүктесі (°C)	1140±5
Тығыздығы (г/см ³)	4,64
Пироэлектрлік коэффициент (Кл /м ² *К)	-8,3*10 ⁻⁵ (при 25° C)
Ашықтық аймағы (нм)	400-5200
Сіңіру коэффициенті	0,1 (толқын ұзындығы 1064 нм)
Сыну коэффициенттері	n ₀ = 2,200, n _e = 2,146 (толқын ұзындығы 1300 нм)
	n ₀ = 2.2967, n _e = 2,2082 (толқын ұзындығы 632,8 нм)

Литий ниобаты кристалдары толқын ұзындығы 0,33 мкм-ден 4,5 мкм-ге дейін, яғни көрінетін жарықтан инфрақызылға дейінгі диапазонда мөлдір.

Сыну көрсеткіші толқын ұзындығы іс жүзінде тұрақты және 2,1-ден 2,2-ге дейінгі диапазонда өзгереді. Оптикалық қасиеттердің толқын ұзындығынан тәуелділігі оптикалық телекоммуникациялық жүйелермен пайдаланылатын толқын ұзындықтарының диапазонында өте әлсіз болғандықтан, литий модуляторлары толқын ұзындықтарына (WDM) сигналдарды бөлуді пайдаланатын оптикалық телекоммуникациялық жүйелер үшін жақсы жарайды.

Электрооптикалық құрылғыларды жасау үшін литий ниобатының электрооптикалық қасиеттері ерекше маңызды рөл атқарады. Пьезоэлектрлік әсері бар басқа да материалдар сияқты, литий ниобатының электрлік қасиеттері кристалдық механикалық жүктемеге байланысты. Механикалық бос және механикалық қысылған Кристал үшін диэлектрлік тұрақты және электрооптикалық коэффициенттер бар. Бұл ретте "механикалық қысылған кристалл" термині кристалға әсер ететін өріс кристалдың механикалық заты ауыспалы электр өрісінің артындағы пьезоэффект салдарынан қозғалуға уақыт жетпейтін жиілікпен өзгертін жағдайға жатады. 1.2-кестеден көріп отырғанымыздай, әдебиетте берілген литий ниобатындағы диэлектрлік өткізгіштік тензорының компоненттері жиілікке байланысты.

Кесте 1.2 - Литий ниобатының диэлектрлік өткізгіштігінің тензор компоненті жиілік тәуелділігі

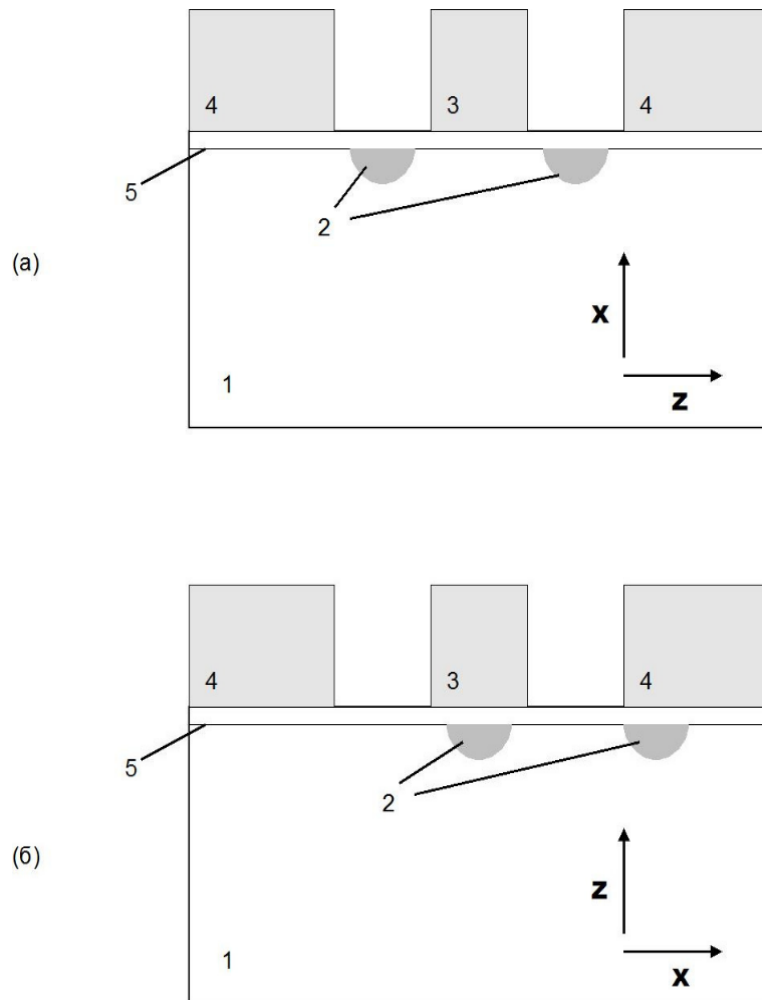
Жиілігі	ϵ_{11}	ϵ_{33}
100 кГц	84,6	29,1
10 МГц	44,3	27,6
100 МГц	44,1	23
1 ГГц	43,9	23,7
9 ГГц	42,5	26
ИК	41,5	44

1.2.2 Жүгіретін толқын электродтары

Интегралды-оптикалық құрылымдарда оптикалық толқынжолдардың типтік ені ондаған микрометрді құрайды. Бұл АЖЖ толқындарының модуляциялайтын электр өрісінің шоғырлануын қамтамасыз ететін құрылымдарға ұқсас көлденең өлшемдер болуы керек. Демек, он ГГц жиіліктер үшін ӨЖЖ құрылымының тән көлденең өлшемдері толқын ұзындығының көп бөлігін құрайды. Мұндай құрылымдардың мінез-құлқын сипаттау үшін ұзын сызықтар теориясы қолданылуы мүмкін және толқын ұзындығының қимасында өріс таралуын сипаттау кезінде толқын ұзындығының фундаментальды сәні ғана таралады деп есептеуге болады.

1.2-кестеден көріп отырғанымыздай, литий ниобатының электрооптикалық коэффициенттері арасында ең жоғарғы коэффициент r_{33} болып табылады. Сонымен қатар, модульдеуші және модуляцияланатын оптикалық толқынның өрістері, яғни модуляцияланатын және модуляцияланатын толқындардың электр өрістері кристалданатын Z кристалданатын осі бойымен бағытталған.

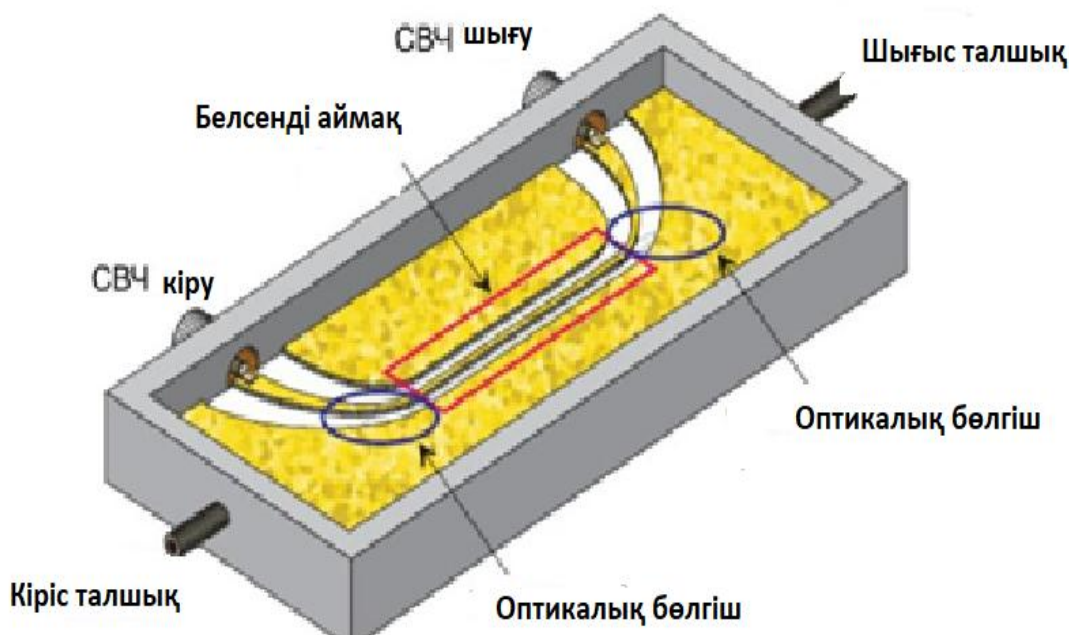
Әдетте, оптикалық толқынжолдар технологиялық ерекшеліктерге байланысты Кристалл бетіне жақын жазықтықта қалыптасады, оның кристаллографиялық осьтерінің біріне перпендикуляр кесілген. Осылайша, белсенді аймақта электромагниттік толқындар Y кристаллографиялық ось бойымен тарайтын модуляторлардың екі түрі таралды: X -кесінді модуляторлар және Z -кесінді модуляторлар [48]. Мұндай құрылғылардың көлденең қимасы литий ниобатының кристаллографиялық осьтерінің бағыттарымен бірге 1.2- суретте схемалық түрде бейнеленген.



Сурет 1.2 - X -кесіндінің(а), Z -кесіндінің(б) 1 - литий ниобатының кристаллы, 2-толқынжолдар, 3-"ыстық" электрод, 4 – жер электродтары, 5-буферлік қабат модуляторларының белсенді аймағының көлденең қимасының схемалық бейнесі

Электродтар мен Кристалл бетінің арасында диэлектриктің буферлік қабаты бар. Z-кесіндінің модуляторы жағдайында бұл қабаттың болуы міндетті, өйткені оптикалық толқын өрісі, әдетте, кристалдан шығады және кристал беті мен металл арасындағы диэлектрик қабатының болмауы белсенді аймақта электродтар металындағы жоғалтулар салдарынан оптикалық сәулеленудің үлкен өшуін тудырады.

Схемалық бейнесі электрооптикалық модулятор Маха-Цендерде X-кесім бастап электродтар жүгіртпе толқын суретте көрсетілген. Бұл жағдайда Электрод модульдеуші электромагниттік толқын тарататын толқынды білдіреді. Электр және оптикалық толқындар бір бағытта таратылады. Өзара әрекеттесу электрооптикалық әсер арқылы модуляциялайтын электромагниттік толқын және толқынжолда оптикалық толқын электродтар бойымен таратылатын өрістердің қиылысуының бүкіл аймағында жүреді. Модулятордың бұл саласы "белсенді аймақ" деп аталады.



Сурет 1.3 - Мах-Цендердің электр оптикалық модуляторының схемалық бейнесі X-жүгіретін толқын электродтары бар кесу

Егер екі толқынның топтық жылдамдығы сәйкес келсе (жылдамдықтардың келісімі бар), толқындар өзара әрекеттесу аймағы арқылы уақыт бойынша бірдей кідіріспен өтеді.

Алайда, АЖЖ және нақты жүйелердің оптикалық толқыны үшін тиімді сыну көрсеткіштері бір-бірінен ерекшеленеді. Бұл дегеніміз, модулятор толқындары әртүрлі жылдамдықпен таратылады ("жылдамдықтарды келісу"). Толқындардың таралуына қарай толқын фронттары арасындағы қашықтық

біртіндеп артады. Бұл модулятордың жиілік өсуімен және жиілік жолағының шектелуімен модуляция тиімділігінің нашарлауына әкеледі.

Сонымен қатар, толқындық құрылым бойынша оның таралуына қарай модуляциялаушы толқынның өшуі орын алады. Әртүрлі механизмдері бар энергия шығынын модулирующей толқындар белсенді аймағында модулятор, бұл ретте АЖЖ негізгі үлес шығыны енгізеді, әдетте, оптикалық шығындар проводниках және диэлектрлік шығындар (егер конфигурациялары көрсетілген суретте – бұл шығындар буферлі қабатындағы кристалданған).

Дәстүрлі түрде литий ниобаты негізінде интегралды-оптикалық модуляторлардың электродтарын қалыптастыру үшін материалдар ретінде алтын пайдаланылады. Алтын негізіндегі электродтары бар модуляторларды есептеу, оңтайландыру және технологиялық іске асыруға арналған көптеген жұмыстар бар, мысалы [23-24]. Дегенмен, литий ниобаты негізінде модуляторларды құрудың бұл тәсілі тарихи тұрғыдан қалыптасты. Бұл жағдайда модуляцияланатын және модуляцияланатын толқындардың топтық жылдамдықтарын толық келіскенде жүгіруші толқын электродтарын қолдана отырып, жарық модуляторларында модулятордың жұмыс жолағы модуляцияланатын толқынды жоғалтумен анықталады. Шығындар, соның ішінде толқынжолдың бөлігі болып табылатын электродтық металдың меншікті өткізгіштігіне байланысты.

1.2.3 Модулятордың жұмыс нүктесінің дрейфі

Литий ниобаты негізіндегі Маха-Цендер модуляторларының ең маңызды кемшіліктерінің бірі-қажетті жұмыс нүктесінде модулятордың интерферометрін ұстап тұру үшін модулятордың электродтарына қосылатын кернеудің баяу дрейфін тудыратын жұмыс нүктесінің дрейфі. Нәтижесінде оңтайлы жұмыс нүктесінде (квадратурада, өткізу минимум нүктесінде және т. б.) қолдануға негізделген Маха-Цендердің интерферометрін ұстап тұру мақсатында модулятордың электродтарында ығысу кернеуін тұрақты орнату қажеттілігі туындайды. д) жұмыс нүктесінің дрейфіне әкелетін бірнеше механизмдер бар. Дрейфтің сыртқы көздері температура, ылғалдылық немесе механикалық жүктеме сияқты кристалдарға әсер ететін сыртқы факторлардың өзгеруі болып табылады. Кейбір жағдайларда толқындардың қысқа ұзындықтағы және үлкен қуаттың оптикалық сәулелену көздерінің болуы, фотоиндукцияланған процестер дрейф құбылысына үлес қосуы мүмкін. Сонымен қатар, модулятор құрылымының ішінде электр зарядының қайта бөлінуімен байланысты дрейфтің ішкі көздері бар [25]. Сонымен қатар, белгілі бір жағдайларда литий ниобаты негізіндегі интегралды-оптикалық құрылғыларда фоторефрактивті әсер 1,5 мкм толқын ұзындығында маңызды болады, бұл модулятордың жұмыс нүктесіне әсер етуі мүмкін [26]. Литий ниобаты негізінде модуляторлардағы жұмыс нүктесінің дрейф құбылыстарын

зерттеуге және оны азайтуға көптеген жұмыстар арналғанына қарамастан, қазіргі заманғы модуляторлардағы жұмыс нүктесінің дрейф құбылысы бар, ал оның табиғаты соңына дейін зерттелмеген.

Жұмыс нүктесінің дрейфімен күресудің негізгі тәсілі кері байланыс автоматты реттеу жүйесін пайдалану болып табылады. Модулятордың шығысынан қуаттың бір бөлігі оптикалық қуатты электр сигналына түрлендіретін фотодетекторға қайта бағытталады. Сонымен қатар, модулятордағы оптимумға қатысты жұмыс нүктесінің ағымдағы жағдайын анықтау үшін тікелей ығысу кернеуімен бірге "пилоттық" сигнал беріледі [6-7].

1.3 Оптикалық талшық бойынша ақпаратты тарату жүйелерінде интегралды-оптикалық модуляторларды қолдану

Интегралды-оптикалық модуляторлар оп оптикалық талшыққа ақпаратты беру жүйелерінің көптеген түрлерін қолданады. Сонымен қатар, оптикалық талшықтар бойынша сигналдарды тарату жүйесі, әсіресе, модуляторлар сипаттамаларына талап ететін, соңғы жылдары қызығушылық артып келе жатқан оптикалық талшық бойынша жж және АЖЖ сигналдарын беру жүйелері болып табылады. Бұл, сонымен қатар, жоғары жиілікті тасымалдаушыны тарату, фазалық антенна торлары және т. б. сияқты жүйелердің перспективалы қолдануларының кең ауқымымен байланысты.

Мұндай жүйелерді сипаттайтын ең маңызды параметр жүйенің кіріске берілетін қуатқа ВЧ сигнал қуатының қатынасы ретінде есептелетін жүйені беру коэффициенті болып табылады. Мұндай жүйелерді беру коэффициентінің типтік мәні -20--30 дБ ауқымында жатыр. Мұндай төмен мән талшықты-оптикалық спектрге сигналды түрлендірудің және электрондық түрге кері түрлендірудің аз тиімділігімен түсіндіріледі. Сигналды беру кезіндегі шығындар оптикалық талшықтың шығындарымен анықталады және ол өте төмен болып табылады, шамамен 0,5 дБ/км.

Тарату коэффициентін арттыру жолдарының бірі оптикалық тасымалдаушы қуатын арттыру болып табылады, алайда оптикалық толқынжолдарда сызықты емес оптикалық әсерлерге және кең жиілік жолағымен қанықтырылудың жоғары тоғымен бір мезгілде оптикалық фотоқабылдағышты құрудың технологиялық проблемаларына байланысты іргелі шектеулер бар. Бұл жағдайда жұмыс нүктесінің квадратурадан жылжуы сигнал/шу қатынасын жақсартады. Жұмыс нүктесінің квадратурасында сыртқы модуляциялы оптикалық желілер үшін сызықты емес бұрмалаулар зерттелді. Жұмыс нүктесінің беріліс коэффициентіне жылжу әсері желіде эрбий күшейткіші бар болғанда көрсетілген, бірақ сигналда сызықты емес бұрмалауға мұндай ығысудың әсері көрсетілген жоқ.

Басқа салыстырмалы жаңа және қосымша зерттеулерді талап ететін бағыт-когерентті рефлектометрия жүйелері, уақытша мультиплексирлеу негізінде талшықты-оптикалық датчиктерді сұрау жүйелері, кілттерді кванттық тарату жүйелері және т. б. сияқты жоғары экстринкциялы оптикалық импульстерді пайдаланатын талшықты-оптикалық жүйелер болып табылады.

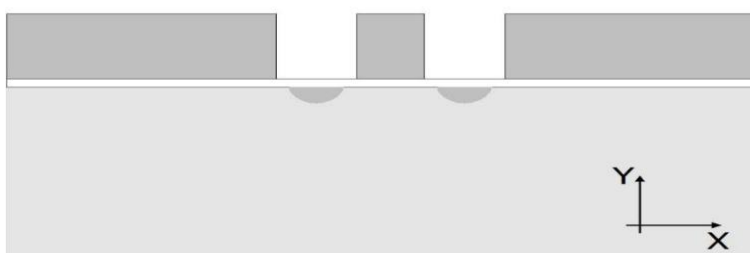
Оптикалық импульстерді генерациялау әдістерінің бірі жоғары гипертенгі көздің лазерлік сәулеленуін сыртқы модуляциялау әдісі болып табылады. Алайда, литий ниобаты негізінде амплитудалық модуляторларды осы мақсаттар үшін қолдану интерферометрдің жұмыс нүктесінің дрейфі сияқты бірқатар проблемаларға ие. Модулятордың кіруіне пилоттық сигнал берумен және интегралды-оптикалық модулятордың шығуынан сәуленің бір бөлігі түсетін желілік фотодетектордың шығысындағы пилоттық сигналдың гармониктерін детектендірумен байланысты жұмыс нүктесін тұрақтандыру әдістері сипатталған. Алайда, қолданылатын тәсілдемелер кезінде пилоттық сигнал модулятордың шығысындағы оптикалық импульстердің экстринкциясының азаюына себеп болуы мүмкін. Бұл әдіс модулятордың bias-кірісінде кернеуді түзету үшін қолданылатын қателіктің мәні модулятордан сигнал келіп түсетін сызықтық фотодетектордың шығысынан сигналды күшейту, цифрлау және орташаландыру нәтижесінде пайда болады. Алайда, бұл тәсілге байланысты шектеулер бар, бұл әдіс тек толтырудың төменгі коэффициенттері кезінде ғана жұмыс істей алады, бұл цифрлау схемаларының соңғы динамикалық ауқымынан туындаған. Сондай-ақ, бұл әдістің кемшілігі жоғары жылдамдықты цифрлау жүйелерін қолдану қажеттілігі болып табылады.

2 Литий ниобаты негізіндегі жүгіртпе толқын модуляторының оңтайлы конфигурациясы

2.1 Жүгіртпе толқын модуляторының сипаттамаларын есептеу әдісі

2.1.1 Есептеу әдістемесі және қолданылатын жақындату

Бұл жұмыста буферлік қабат болған кезде литий кристаллының Х кесіндісінде орындалған копланарлы СВЧ толқын өткізгішімен жүгіруші модулятордың моделі қарастырылады. Бұл конфигурация Z кесіндісінде бірқатар артықшылықтарға ие.]



Сурет 2.1 - Литий ниобаты негізінде модулятордың белсенді аймағының көлденең қимасы X-кесу

Оптикалық толқынжолдағы өрістің тиімді концентрациясына қажетті копланарлық толқынның тән көлденең өлшемдері шамамен ондаған микрометрді құрайды, бұл литий ниобитінің ниобатындағы сәулеленудің СВЧ толқын ұзындығынан әлдеқайда аз, шамамен ондаған гигагерц жиіліктерінде осы толқынжолды талдау үшін ұзын сызықтар теориясы қолданылуы мүмкін.

Бұл жұмыста соңғы элементтер әдісімен екі өлшемді есептерді сандық шешу арқылы өте жоғары жиіліктегі ұзын сызықтың погондық параметрлері бар, олардың негізінде оның сипаттамалары есептеледі.

Сонымен қатар, оптикалық талшықтардың таралуының топтық жылдамдығы дисперсияны есепке ала отырып есептеледі. Модульдеуші АЖЖ және модуляцияланатын оптикалық толқындардың өзара әрекеттесуімен анықталатын амплитудалық-жиіліктік оптикоэлектрлік сипаттамаларды есептеу олардың өзара әрекеттесуі аумағының ұзындығы бойынша интегралды-оптикалық толқында модуляциялайтын толқын өрісінің болуымен туындайтын фазалық ығысуларды интегралдаумен шығарылған аналитикалық өрнектерді қолдану арқылы жүргізіледі.

Теориялық талдауда литий ниобаты негізінде электрооптикалық модуляторлардың сипаттамаларын оңтайландыруға арналған жұмыстарда кеңінен қолданылатын бірқатар оңайлатулар қолданылады:

Литий ниобаты кристалына ұқсас субстрат кристалдарында пайда болуы мүмкін акустоэлектрлік әсерлер ескерілмейді. Литий ниобаты пьезоэффектке ие, нәтижесінде Кристал бетінде электр өрісі пайда болған кезде субстратта үстіңгі акустикалық толқындар пайда болады. Мұндай толқындар электр толқындар модуляторының электродтарында таралатын энергияны алып тастай алады, сондай-ақ субстрат материалының электрооптикалық сипаттамаларына әсер ететін субстрат акустикалық резонанстар жасайды. Акустикалық резонанстар жиілігі, әдетте, 100 МГц - 1 ГГц аумағында жатыр, бұл пайдаланылатын модельдің осы жиілік диапазонында сенімді емес деп болжайды.

- Литий ниобатының электрлік және электрооптикалық сипаттамаларының жиіліктік тәуелділігі ескерілмейді. Диэлектрлік өткізгіштік матрицасының компоненттері мен литий ниобатының электрооптикалық коэффициенттері жиілікке қатты тәуелді болады, бірақ өте жоғары жиілік аймағында бұл тәуелділік елеусіз аз қабылданады.

- СВЧ-толқын өткізгіштердегі омдық ысыраптардан және кристалдық төсеніштегі және буферлік қабаттағы диэлектрлік ысыраптардан басқа ажж-толқынжолдағы ысыраптардың өзге түрлері ескерілмейді.

2.1.2 Модуляцияланатын оптикалық толқын үшін тиімді топтық сыну көрсеткіші

Теориялық талдауда литий ниобатына негізделген электро-оптикалық модуляторлардың сипаттамаларын оңтайландыруға арналған жұмыстарда кең қолданылатын бірқатар жеңілдетулер қолданылады:

Литий ниобаты кристалына ұқсас субстрат кристалдарында пайда болуы мүмкін акустоэлектрлік әсерлер ескерілмейді. Литий ниобаты пьезоэффектке ие, нәтижесінде Кристал бетінде электр өрісі пайда болған кезде субстратта үстіңгі акустикалық толқындар пайда болады. Мұндай толқындар электр толқындар модуляторының электродтарында таралатын энергияны алып тастай алады, сондай-ақ субстрат материалының электрооптикалық сипаттамаларына әсер ететін субстрат акустикалық резонанстар жасайды. Акустикалық резонанстар жиілігі, әдетте, 100 МГц - 1 ГГц аумағында жатыр, бұл пайдаланылатын модельдің осы жиілік диапазонында сенімді емес деп болжайды.

- Литий ниобатының электрлік және электрооптикалық сипаттамаларының жиіліктік тәуелділігі ескерілмейді. Диэлектрлік өткізгіштік матрицасының компоненттері мен литий ниобатының

электрооптикалық коэффициенттері жиілікке қатты тәуелді болады, бірақ өте жоғары жиілік аймағында бұл тәуелділік елеусіз аз қабылданады.

- өткізгіштерде омдық шығындардан және кристалды төсеніште және буферлік қабатта диэлектрлік шығындардан басқа аса жоғары жиілікті-толқынжолда шығындардың басқа түрлері ескерілмейді.

Бұл модулятордың қозғалмалы толқын электродтарымен жұмыс істеу принципінен максималды өту жолына жету үшін модуляторлық микротолқынды толқынның және оптикалық сәулеленудің модуляцияланған толқынының тиімді топтық көрсеткіштерін үйлестіру қажет. Литий ниобат модуляторларындағы оптикалық жиіліктегі абсолютті және топтық сыну көрсеткіштерінің арасындағы айырмашылық интегралды оптикалық модуляторлардың сипаттамаларын есептеуде үлкен мәнге ие болатындығы теориялық және эксперименталды түрде көрсетілді [28].

Модуляцияланатын және модуляцияланған толқындардың электр өрістері кристалдың z осі бойымен бағытталған кезде ең үлкен электрооптикалық коэффициент әрекет етеді, сондықтан литий ниобатының абсолютті сыну индексі ретінде ерекше толқынның сыну көрсеткішін алып, тиімді топтық жылдамдықты есептеу үшін теңдеулерді ұсынамыз.

2.2.2 Максималды жұмыс жиілігі диапазонына арналған модулятордың оңтайлы конфигурациясы

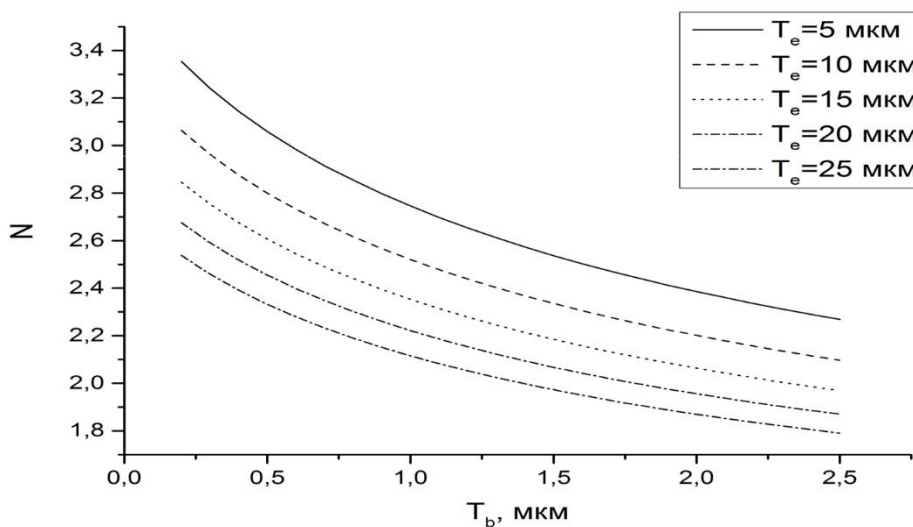
Интегралды оптикалық микротолқынды құрылымдарды қалыптастыру процесінде технологиялық шектеулер пайда болады, нәтижесінде құрылымдардың геометриялық параметрлеріне шектеулер болады.

Осы шектеулердің бірі - қалыптасқан электродтардың қалыңдығы: жеткілікті қалың электродтардың пайда болуы күрделі технологиялық мәселе болып табылады. Тағы бір шектеу - бұл құрылып жатқан Mach-Zehnder интерферометріндегі оптикалық толқындардың бағыттаушылары арасындағы қашықтық. Егер толқын гидерлері тым жақын болса, толқын гидтері арасында энергияны беру әсері пайда болады. Толқындық гидтерді бір-бірінен орналастыруға болатын ең аз қашықтық толқындарды шығарудың арнайы технологиясымен және модулятордың жойылу коэффициентіне қойылатын талаптармен анықталады. Өріс аз көлемде шоғырланған толқын гидерлері энергияның берілуіне аз ұшырайды.

Күміс негізіндегі электродтары бар құрылымдардың сипаттамаларын есептеулер жүргізілді ($\sigma = 1,64 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м}$).

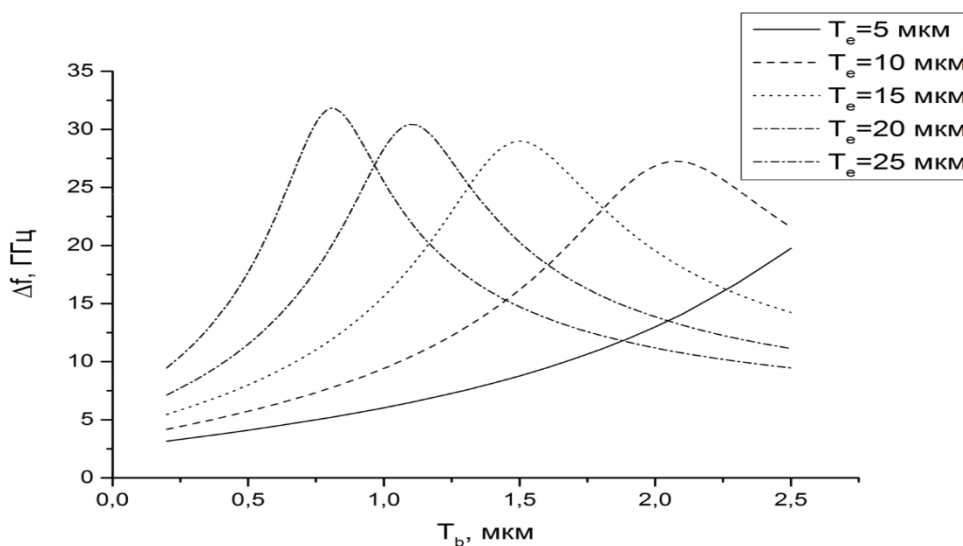
Есептеу буфер қабатының қалыңдығы үшін $0,2 - 2,5 \text{ мкм}$, $G = 13 \text{ мкм}$, ал электродтардың қалыңдығы $T_e = 5, 10, 15, 20, 25 \text{ мкм}$ аралығында жүргізілді. Белсенді аймақтың ұзындығы 27 мм -ге тең болды. $W + G = 27 \text{ мкм}$ толқындардың ара қашықтығы.

Модуляцияланатын толқынның тиімді сыну көрсеткішінің, модулятордың жұмысшы диапазонының және электродтардың толқынға тұрақтылығының буферлі қабаттағы электродтардың әр түрлі қалыңдығына тәуелділігі графигінде келтірілген (2.5-2.7-суреттер).

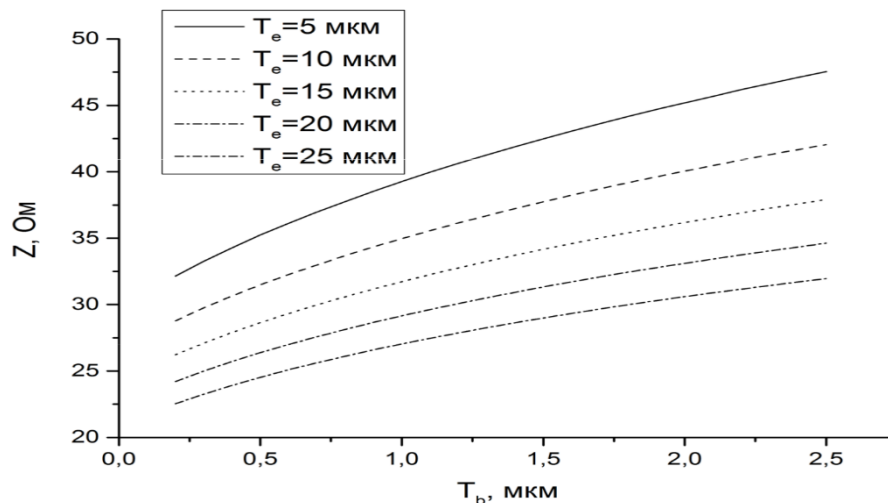


Сурет 2.5 - Модульдеуші толқынның сыну көрсеткішінің әр түрлі электрод қабаттары үшін буферлік қабаттың қалыңдығынан тәуелділік кестесі

Көріп отырғанымыздай, буферлік қабаттың қалыңдығы мен электродтар қалыңдығының артуы АЖЖ толқынының сыну көрсеткішінің төмендеуіне алып келеді, өйткені диэлектрлік өткізгіштігі литий ниобатынан төмен облыстарда орналасқан электр өрісінің энергия үлесі артады: кремний диоксидінде және ауада.



Сурет 2.6 - Модулятордың жұмыс жолағының электродтардың әртүрлі қалыңдықтарына арналған буферлік қабаттың қалыңдығынан тәуелділік кестесі

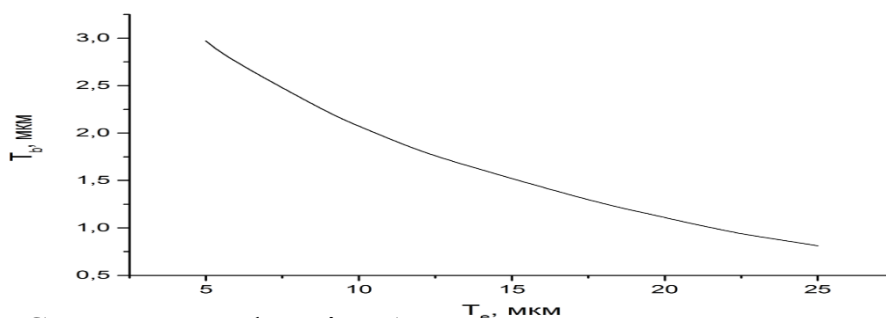


Сурет 2.7 - Электродтардың әртүрлі қалыңдықтарына арналған буферлік қабаттан электродтардың толқындық кедергісінің тәуелділік графигі

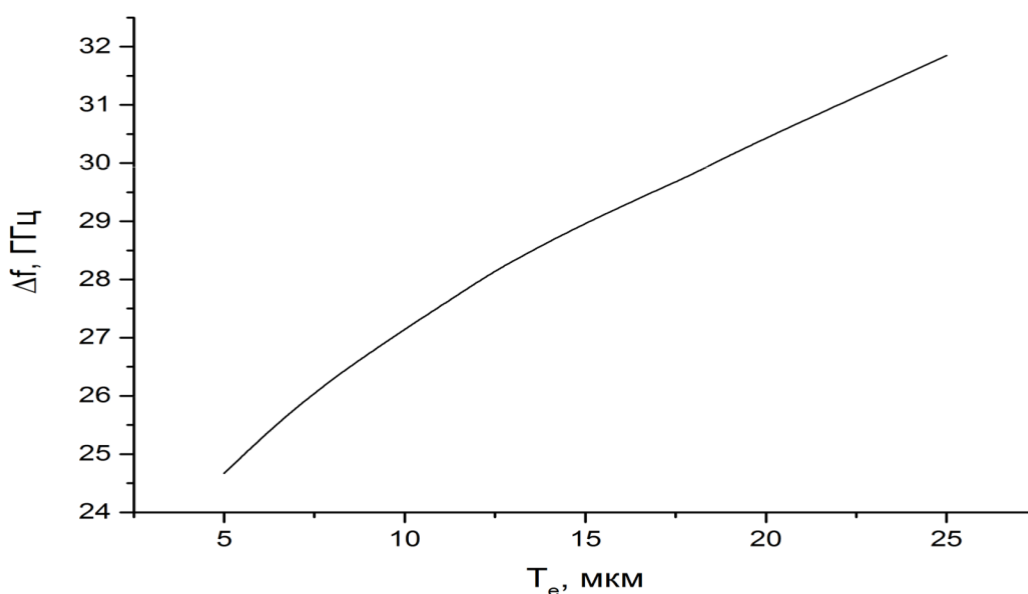
Толқын кедергісі буфер қабатының қалыңдығының жоғарылауымен толқынның сызықтық сыйымдылығының төмендеуіне байланысты артады.

Тәуелділіктен буферлік қабаттың қалыңдығы ең үлкен технологиялық қиындықтарды білдіретін қалың металл қабаттардың тұндыру кезеңіндегі қателер мен қателіктерді түзету үшін параметр ретінде тиімді пайдаланылуы мүмкін екені көрініп тұр. Жиілік жолағының буферлік қабаттың қалыңдығына тәуелділігі максимумға ие. Максимальды өткізу жолағы модуляцияланатын және модуляцияланатын толқындардың жылдамдықтарының келісуіне сәйкес буферлік қабаттың қалыңдығына жақын буферлік қабаттың қалыңдығы кезінде, бірақ оған қатаң тең емес қол жеткізіледі. Бұл әсер өткізгіштердің және диэлектриктердегі шығындардың болуымен және негізінен өткізгіштердің шығын коэффициентінің толқындық кедергіден және тиісінше буферлік қабаттың қалыңдығынан тәуелділігімен түсіндіріледі.

Буферлік қабаттың оңтайлы қалыңдығының электродтардың қалыңдығына, сондай-ақ буфер қабатының оңтайлы қалыңдығындағы өткізу қабілетіне тәуелділігі кестеде көрсетілген (2.8-2.9-суреттер).



Сурет 2.8 - Буферлі қабаттың оңтайлы қалыңдығының оңтайлы жұмыс қабілеттілігінің электродтардың қалыңдығына тәуелділігі



Сурет 2.9 - Жұмыс жолағының буфер қабатының оңтайлы қалыңдығына электродтардың қалыңдығына тәуелділігі

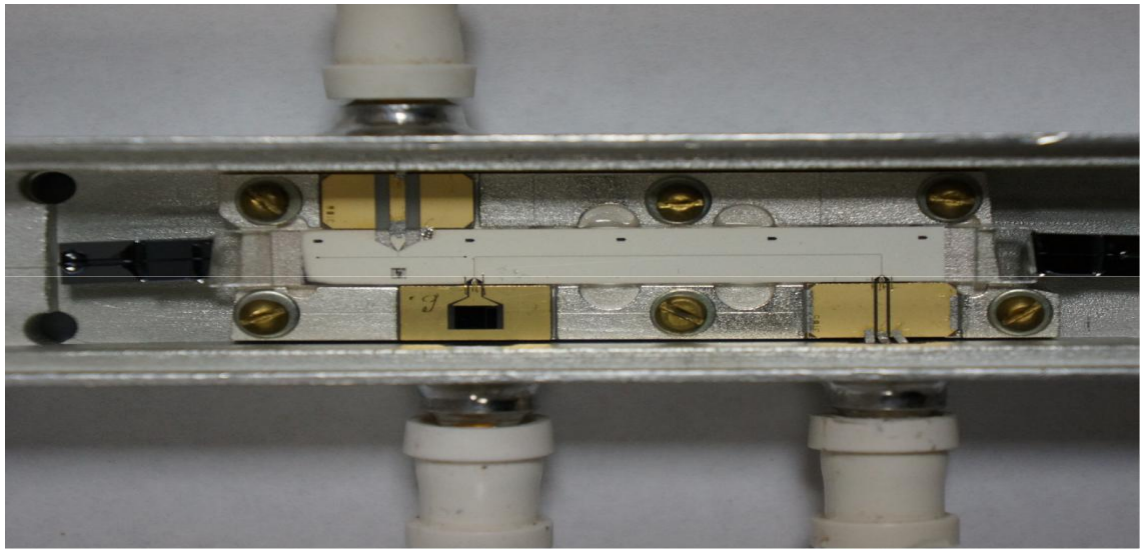
2.2 Күміс негізіндегі электродтары бар модуляторды эксперименттік зерттеу

2.2.1 Эксперименттік үлгінің сипаттамасы

Бар технологиялық шектеулерді ескере отырып, интегралды оптикалық модулятордың тәжірибелік үлгісі жасалды. X-LiNbO₃ кесіндісінің субстраты пайдаланылды. Ток өткізгіш бөліктердің материалы ретінде күміс қолданылған, ол жоғарыда айтылғандай, дәстүрлі гальваникалық алтынмен салыстырғанда жиілік жолағын ұлғайтуы мүмкін. Құрылымның геометриялық параметрлері [29]:

$G = 13$ мкм, $W = 14$ мкм, $T_e = 5$ мкм, $T_b = 1,2$ мкм модуляцияланатын және модуляцияланатын толқындардың өзара әрекеттесу аумағының Ұзындығы 27 мм-ге тең, толқынның АЖЖ-ның толық ұзындығы 32 мм-ге тең.

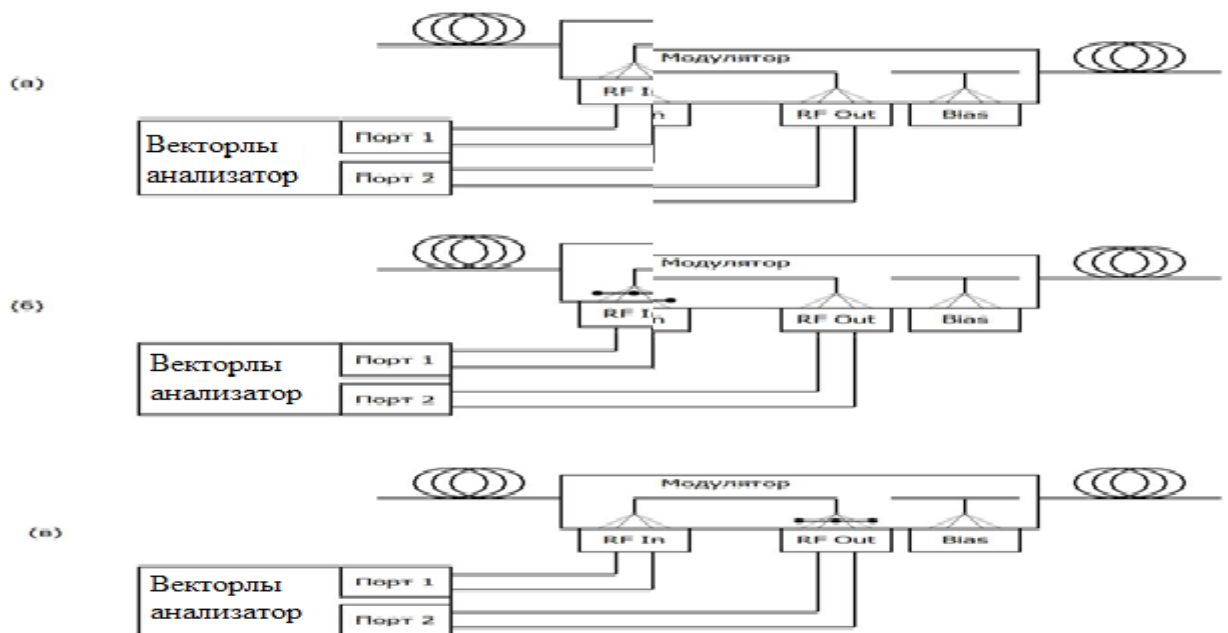
2.10 суретте күміс электродтары бар модулятордың эксперименталды үлгісінің фотосуреті көрсетілген.



Сурет 2.10 - Күміс электродтары бар модулятордың эксперименттік үлгісінің фотосуреті

2.2.2 Толқынның модульдеуші толқындардың топтық жылдамдығы және толқынның төкөткізуші бөліктеріндегі шығындар

Дайындалған үлгіде копланарлы электродтарда Θ ЖЖ толқынының жоғалуы мен кідірістері тікелей өлшелді. Өлшеу үшін тізбектердің векторлық анализаторы қолданылды. Өлшеу нәтижелерін өңдеу үшін шашырау матрицаларының формализмі қолданылды. Өлшеу схемасы 2.18-суретте келтірілген.



Сурет 2.11 - Үлгінің электр сипаттамаларын өлшеу Блок-схемасы. а) өлшеу, б) модулятордың электродтары алдында желінің топтық кідіруін өлшеу, в) жалпы топтық кідірісті өлшеу

2.2.3 Модулятордың жұмыс жолағы

Электр оптикалық модулятордың жұмыс жолағын өлшеу жүргізілді. Тәжірибе схемасы 2.11-суретте көрсетілген. RF-электр оптикалық модулятордың кірісі 1 векторлық тізбек анализаторының портына қосылды. Модулятордың RF-шығысына 50 Ом жүктеме қосылды. Модулятордың оптикалық кіруіне толқын ұзындығы 1555 нм DFB лазерінің сәулеленуі берілген. Модулятордың оптикалық шығуы фотодетекторға (Дфдмш40-16 "Дилаз" НПФ шығарған) қосылды. Фотодетектордың шығуы векторлық анализатордың 2 портына қосылды, сондай-ақ детекторға оның жұмысы үшін қажетті тұрақты 9 В ығысу кернеуі берілді (схемада көрсетілмеген). Bias-модулятордың кірісі реттелетін кернеу көзі қосылды. Векторлық анализатор дербес компьютермен байланысқан [30].

Алынған жүйенің S-параметрлерін өлшеу 60 МГц – 8 ГГц диапазонында жүргізілді. Модулятордың bias-кірісінде кернеуді орнату арқылы модулятордың жұмыс нүктесі квадратураға орнатылды, ол қосалқы орнату кезінде жүйенің S21 параметрлерінің өзгеруі бойынша бақыланды: максималды мәндер

S21 квадрат жұмысына сәйкес келді. Осылайша алынған S-параметр мәндері ДК жадына сақталды.

3 Оптикалық сигнал беру желісінің сипаттамаларына электрооптикалық модулятордың жұмыс нүктесінің әсері

3.1 Радиототонды байланыс желісі бойынша өткен кезде радиосигналдың өзгеруі

3.1.1 Үлгі сипаттамасы

Радиототонды беру желісінің маңызды сипаттамасы беру коэффициенті болып табылады. Бұл жағдайда лазерлік сәуле көзінің тікелей модуляциясы бар радиототонды желілер мен сыртқы модуляциясы бар желілер ерекшеленеді, олар тікелей модуляциясы бар сызықтардан бірқатар артықшылықтары бар. Мұндай желілердің берілу коэффициенті лазерлік сәуле көзінің қол жетімді қуаты және талшықтың сызықты емес әсерлері сияқты факторлармен шектеледі. Тарату коэффициентінің ұлғаюы оптикалық қуат күшейткішінің желісіне қосылуы мүмкін [31].

Сигналды таратудың радиототонды желісінің сұлбасы сыртқы модуляциямен және эрбиді күшейткішпен 3.1 суретте көрсетілген.

Бастапқы электр сигналы модулятордың кіруіне түседі. Бұл ретте модулятордың жұмыс нүктесі кернеу көзінің көмегімен орнатылады. Лазердің оптикалық сәулеленуі модулятор арқылы өтеді және промодулирленген сәуле эрби күшейткішімен күшейтіледі. Нәтижесінде алынған сигнал кері ығысуға қосылған фотодетектормен детектеледі. Детектордың шығуынан шығу сигналы алынады.



Сурет 3.1 - Радиотехникалық модель

3.1.2 Радио-фотон желісінің берілу коэффициенті

Маха-Цендер электро-оптикалық модуляторының шығысындағы оптикалық қуаттың V_{rf} синусоидальды кернеуі мен V_{bias} бұрыс кернеуінің

қосындысын қолдану кезінде уақытқа тәуелділігі төменде көрсетілген [32] өрнегімен сипатталған:

$$PMZ(t) = P/2 * \cos(V\pi_{bias} / V_{bias} + \pi / V_n * V_n f \sin(\omega t)) \quad (3.1)$$

мұндағы $PMZ(t)$ – Маха-Зендер модуляторының шығыс қуаты, лазер - лазердің шығыс қуаты;

V - модулятордың РЖ электродтарының жарты толқындық кернеуі;

$V\pi_{bias}$ - модулятордың бұрыс электродтарының жарты толқындық кернеуі;

V_{bias} - модулятордың жұмыс нүктесіндегі кернеу,

$V_n f$ - модулятордың кернеуі. модулятордың РЖ кірісіндегі сигнал;

ω - модуляцияланатын сигналдың жиілігі.

3.2 Пассивтік оптикалық құрамдар

3.2.1 Оқшаулағыштар

Талшық арқылы таралатын оптикалық сигнал әртүрлі біркелкіліктерден, атап айтқанда оптикалық коннекторлар құрған құрғақ буындардан көрінеді. Бұл шағылыстың нәтижесінде энергияның бір бөлігі қайтарылады. Егер сәуле көзі ретінде лазерлі диодтар пайдаланылса, онда лазер қуысына түсетін шағылысқан сигнал жалған сигналға әкелетін индукцияланған күшейтуге қабілетті болады. Бұл, әсіресе, радиация көзі сандық кеңжолақты сигналды (> 100 МГц) немесе аналогтық кеңжолақты сигналды (аралас талшықты-коаксиалды кабельді теледидарлық желілерде 1 ГГц-ке дейін) жасаған кезде қажет емес. Күрделі кеңжолақты желілерде коннекторлар мен басқа оптикалық құрылғылардың (сплиттерлер, WDM құрылғылары, оптикалық күшейткіштер) көптеген қосылыстары болған кезде, мұндай кері байланыс күшейтіліп, сәулелену көзінің шу деңгейінің жоғарылауына әкеледі. Кері ағынды басудың ең түбегейлі тәсілі оптикалық изоляторларды қолдануға негізделген [33].

Оптикалық оқшаулағыш жарықтың бір бағытта жоғалуынсыз, ал екінші (кері) бағытта үлкен құлдырауымен жарық беруді қамтамасыз етеді.

Поляризация жазықтығының айналуы

Оптикалық изолятордың жұмысы Фарадей эффектіне негізделген - бойлық магнит өрісінің әсерінен жарықтың поляризация жазықтығын оптикалық белсенді емес заттар арқылы айналдыруға негізделген.

Поляризация жазықтығының айналу бұрышы $q = VBZd$, мұндағы V - Вердет тұрақтысы (Вердет) - заттың сипатына, температура мен жарықтың

толқын ұзындығына байланысты ВZ магнит өрісінің индукциясының бойлық компоненті, d - заттың жарық жолының ұзындығы. Фарадей жасушалары. Айналу бағыты тек заттың сипатына және магнит өрісінің бағытына байланысты. Айналу белгісі магнит өрісін қарап отырған бақылаушы үшін есептеледі. Поляризация жазықтығының магниттік айналуы магнит өрісінің әсерінен заттың оптикалық қасиеттерінің асимметриясынан туындайды.

Поляризация жазықтығының айналуының жарықтың толқын ұзындығына тәуелділігі айналмалы дисперсия деп аталады. Алғашқы жуықтау ретінде, жарықтың жұтылу жолақтарынан заттың әсерінен кішкентай толқын ұзындығының аймағында поляризация жазықтығының айналу бұрышы Биот заңына сәйкес 1 жарықтың толқын ұзындығына байланысты болады: $q \sim 1-2$ [34].

Оптикалық изолятордың жұмыс принципі

Оптикалық оқшаулағыш үш элементтен тұрады:

- поляризатор 1 (кіріс поляризаторы),

- Фарадай ұяшықтары 2,

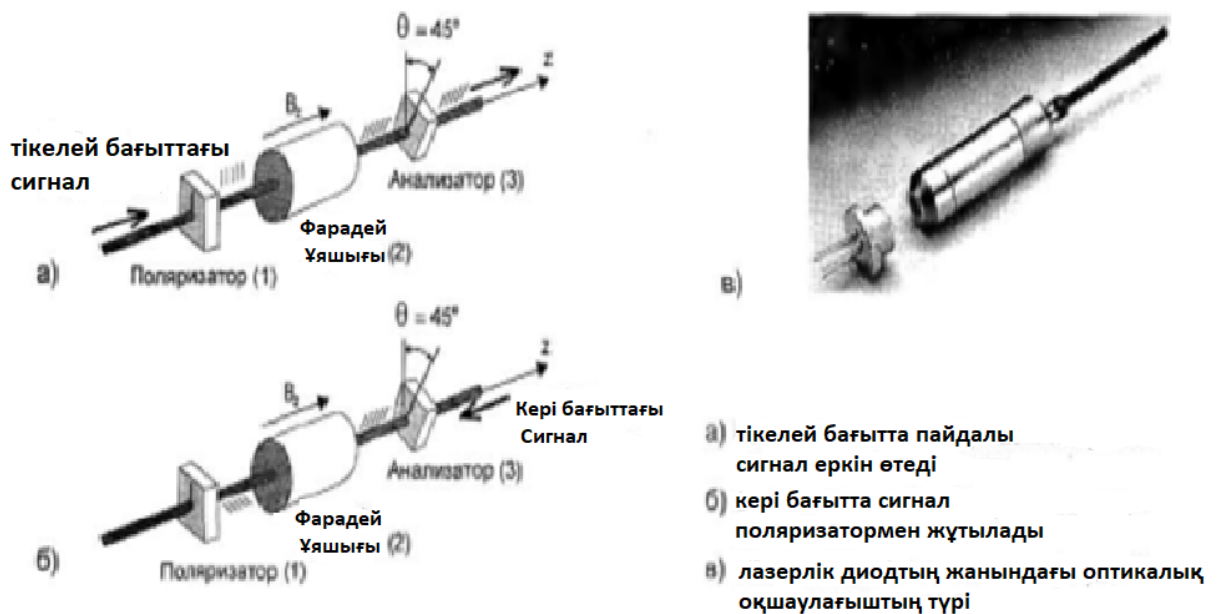
- Analyzer 3 (шығыс поляризаторы). Фарадей ұяшығының параметрлері ол арқылы өтетін жарықтың поляризация осі 45° айналатын етіп таңдалады. Поляризаторлардың осьтері бірдей бұрышта орнатылады.

Кіріс пайдалы сигнал 1 поляризатордан өтіп, оның тік компонентін көлденең компонентті алып тастай отырып өзгертпейді. 3.17 а. Содан кейін тігінен поляриланған жарық Фарадей 2 ұяшығынан өтіп, поляризация жазықтығын 45° айналдырады және кедергісіз 3 анализатор арқылы өтеді.

Жарық қарама-қарсы бағытта таралған кезде (3.17-сурет), ол анализатор 3 жазықтығында да поляризацияланған, содан кейін Фарадей 2 ұяшығынан өтіп, ол көлденең полярлыққа айналады. Осылайша 1 және поляризатордың поляризациясының осьтері 90° бұрыш жасайды, сондықтан 1 поляризатор кері радиацияны өткізбейді.

Техникалық сипаттамалары

Оптикалық оқшаулағышқа қойылатын негізгі талаптар кері бағытта ($\sim 1-2$ дБ) кіші кірістілік жоғалуы және жоғары оқшаулау (кері сигналды тарату кезіндегі жоғалу) кері бағытта (> 30 дБ) болып табылады. Сонымен қатар, жұмыс толқындарының барлық диапазонында мөлдірлік және температура параметрлерінің тұрақтылығы қамтамасыз етілуі керек. Толқын ұзындығы $1,3-1,55$ мкм диапазонында Фарадей ұяшығында пайдаланылатын магнито-оптикалық материал $Y_3Fe_3O_{12}$ құрайды. $0,85$ мкм толқын ұзындығында парамагниттік әйнек қолданылады [35].



Сурет 3.2 - Оптикалық оқшаулағыштың диаграммасы: а) алға бағытталған пайдалы сигнал еркін өтеді; б) қарама-қарсы бағыттағы сигнал поляризатор арқылы жұтылады; в) лазерлік диодтың жанындағы оптикалық изолятордың көрінісі (оң жақта)

Оптикалық оқшаулағыштар көбінесе лазерлік тарату модуліне біріктірілген. Бұл шешімнің жоғары тиімділігі лазерлі жарық диодының шығатын оптикалық сигналының эллиптикалық поляризацияға ие болуына байланысты. Оптикалық оқшаулағыш 1 анализатордың поляризация жазықтығы лазерлік жарық диодынан шығатын сигналдың максималды компонентінің поляризация жазықтығына сәйкес келетін етіп орнатылды.

Оптикалық оқшаулағыштар қоспалық талшықты оптикалық күшейткіштердің ажырамас бөлігі болып табылады. Бұл жағдайда жұп оптикалық оқшаулағыш орнатылады - біреуі кірісте, екіншісі оптикалық күшейткіштің шығысында. Оптикалық күшейткіштер, әдетте, мультиплексті оптикалық сигналды күшейтетіндіктен, оптикалық изоляторлардың оптикалық сигналда көрсетілген толқын ұзындығының барлық диапазонында жоғары сипаттамаларға ие болуы қажет. Осы мақсатта арнайы кең оптикалық оқшаулағыштар қолданылады [36].

3.3 WDM технологиясы

WDM толқынының (спектральды) қысу құрылғысы, WDM сүзгісі MUX мультиплекстеу (біріктіру) немесе әртүрлі толқын ұзындығының оптикалық сигналдарын DEMUX демультимплекстеу (бөлу немесе сүзу) функцияларын орындайды - көптеген талшықтардан немесе бір талшықтан бірнеше талшыққа дейін бір талшыққа. Беретін және қабылдайтын жағында бірдей типтегі

құрылғылар орнатылуы мүмкін, бірақ MUX және DEMUX режимдерінде жұмыс істейді. WDM құрылғыларының бар болуының фактісі талшықтың бір-бірімен араласпай-ақ таралатын көптеген арналарды өткізетін қасиетіне негізделген (3.3-сурет).



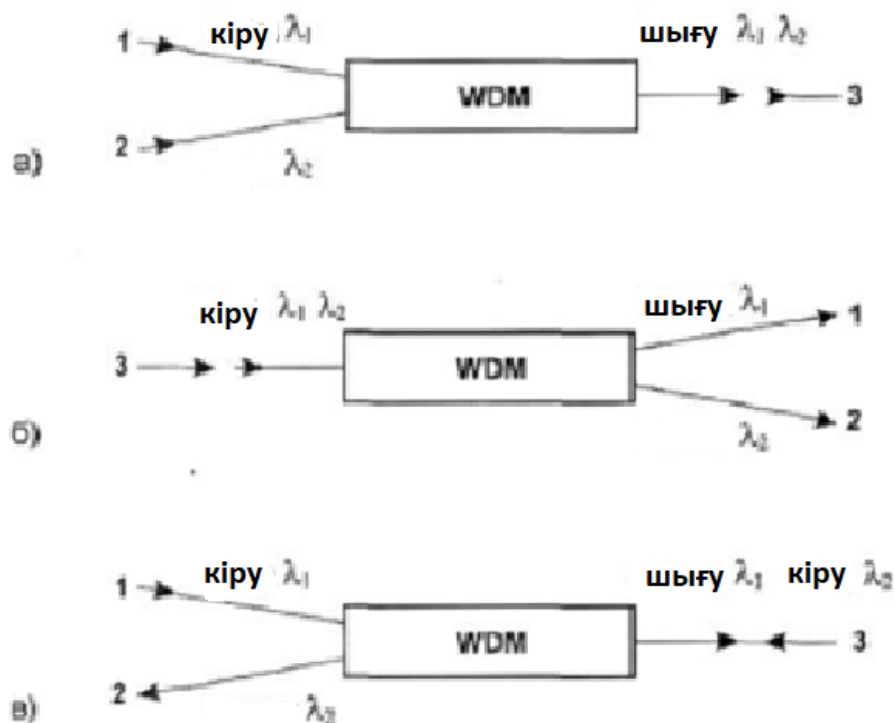
Сурет 3.3 - WDM құрылғылары

Алғашқы WDM құрылғылары 90-шы жылдардың басында пайда болды. Бұл негізінен толқын ұзындығы 1310 нм және 1550 нм болатын кең жолақты қос каналды жүйелер болды. Болашақта, 1550 нм терезе толығымен игеріле отырып, толығымен 1550 нм терезеде орналасқан толқынды ұзындықтары бар WDM-дің тар дәлдігі пайда болады. Бұл талшыққа көптеген арналармен ұзын магистральды құруға мүмкіндік береді. EDFA оптикалық күшейткіштері прогрестің катализаторы болады. Толқындардың сығылу жүйелеріне EDFA күшейткіші жеткілікті жоғары пайдаға ие және сигналдан шуылға дейінгі арақатынасы (1530-1560 нм) болатын толқын ұзындығының барлық диапазоны бөлінеді. DWDM (тығыз толқын ұзындығының бөлінуі мультиплексоры) термині - тығыз толқындық мультиплекстеу - көрші каналдар арасындағы қашықтық 1,6 нм немесе одан аз WDM құрылғыларына қатысты қолданылады. WDM жүйесінің көп арналы жүйелерін құру үшін, енжар WDM фильтрлерімен қатар, толқын ұзындығын тұрақты ұстап тұратын тар жолақты лазерлер қажет. Әзірге мұндай жүйелердегі ең қымбат элемент болып қала беретін лазерлер бұл олардың дамуын біршама шектейді. Қазіргі уақытта 4, 8 және 16 каналдар саны бар жүйелер ұсынылған, мультиплекс арналарының саны 32-ге дейін артады деп болжануда [37].

WDM технологиясы

Терминология барлық WDM құрылғыларына бірдей қолданылады. Сондықтан біз қарапайым екі арналы мультиплексордан бастаймыз. Біріктіру функциясымен қатар (3.4-сурет а) WDM құрылғылары кері функцияны да орындай алады (демультиплекстеу функциясы) - талшықтан әртүрлі толқын ұзындығының сигналдарын шығарады, сур. 3,4 б. Шығарылған WDM құрылғыларының көпшілігі бір құрылғыда мультиплекстеу және

демультиплекстеу режимдерін біріктіреді. Мұндай құрылғыларды екі бағыттағы ағындарды мультиплекстеу және демультиплекстеу үшін де қолдануға болады, сурет 3.15 в.



Сурет 3.4 - WDM құрылғысы

Ең дұрысы, 1 полюсіне келетін λ_1 сигнал (3.4 а-сурет) жалпы шығу полюсі 3-ке (жалпы) толығымен өтуі керек. Алайда, тәжірибеде сигналдың бөлігі λ_1 бұтақтарында болады және 2 полюсі арқылы өтеді. 3.4 б), егер кіріс сигналының барлық қуатының λ_1 полюсі арқылы өткен болса және керісінше болса өте жақсы болар еді. WDM құрылғыларының кез-келгені үшін мұндай демультиплекстеу тиімділігіне қол жеткізу мүмкін емес. Өтпелі кедергі ұғымын қолдана отырып, осы жалған құбылыстарды бағалау.

Crosstalk WDM құрылғысының қаншалықты тиімді екенін көрсетеді. Олар жақын және алыс кросстардан тұрады. Тікелей қиылысу немесе тікелей бағыт (NEXT) тікелей бағытқа ұқсас және λ_1 толқын ұзындығындағы сигнал 1 полюсте қолданылатын болса, λ_2 толқын ұзындығының λ_2 -ге сәйкес келетін полюсте λ_1 толқын ұзындығында жазылған қуаттың үлесі ретінде анықталады. (3.4 а-сурет).

FEXT (алыс оқшаулау, оны оқшаулау деп те атайды) - бұл әртүрлі толқын ұзындығының сигналдарының шығыс полюстері арасындағы оқшаулау шарасы. Сонымен, егер сигнал λ_1 толқын ұзындығына, полюске 3 (жалпы) түссе (3.4 б-сурет), онда ол үшін FEXT - толқын ұзындығына сәйкес келетін λ_1 толқын ұзындығына сәйкес келетін 2 полюсте жазылған қуаттың үлесі. λ_2 мультиплекстеу / демультиплекстеу 1, 2, ..., n толқындардың ұзындығына сәйкес келетін 1, 2, ..., n кіріс және шығыс полюстеріне ие болуы

мүмкін, сәйкесінше бір жалпы шығу / кіріс полюсі (com), сур. 3.1.3 в. Мұндай модульді 1: n деп белгілейміз [38].

Біз келесі белгіні енгіземіз -

мультиплексор үшін:

$P_i(lk)$ - i полюсіне түсетін толқын ұзындығы lk кіріс сигналы;

$P_{i,j}(lk)$ - толқын ұзындығы lk -де шығатын сигнал, толқын ұзындығы lk кезінде кіріс сигналы i (i^j) полюсіне түскен кезде;

$P_{ii}(lk)$ - i полюсіне түсетін толқын ұзындығы lk кезінде сигналды кері бұру;

$P_{i,com}(lk)$ - толқын ұзындығы lk -де кіріс сигналы I полюсіне түскен жағдайда, жүздік полюсте жазылған толқын ұзындығы lk -дегі шығу сигналы; демумльтиплексор үшін:

$P_{com}(lk)$ - жүздік полюге түсетін толқын ұзындығы lk кезінде жарамды сигнал;

$P_{com,j}(lk)$ - толқын ұзындығы lk бойынша кіріс ұялы полюсте (j^k) болған жағдайда, шығыс полюсте жазылатын толқын ұзындығы lk -де шығатын сигнал;

Жалпы алғанда, жұмыс кезінде WDM модулі

$P_{com,com}(lk)$ - жүздік полюге түсетін толқын ұзындығы lk кезінде сигналды кері бұру;

$P_{com,k}(lk)$ - толқын ұзындығы lk -де шығыс сигналы, шығыс полюсі k (ішкі) полюсте жазылады, егер толқын ұзындығы lk -де кіріс сигналы жүзінші полюске түссе.

B_{NEXT} , алыс b_{FEXT} қиылысу коэффициенттері, сондай-ақ b_{NE} және b_{FE} -дің жақын және алыс шетіндегі кері бұрылу коэффициенттері қатынастармен анықталады:

$$\begin{aligned} b_{NEXT}(i,j) &= 10 \lg \frac{P_{i,j}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i \neq j = 1, \dots, n); & b_{FEXT}(i,j) &= 10 \lg \frac{P_{com,j}(\lambda_i)}{P_{com}(\lambda_i)}, \quad (j \neq i = 1, \dots, n); \\ b_{NE}(i) &= 10 \lg \frac{P_{i,i}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n); & b_{FE}(i) &= 10 \lg \frac{P_{com,com}(\lambda_i)}{P_{com}(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (3.2)$$

a_{NE} -ге жақын және алыс a_{FE} ұштарындағы беріліс коэффициенттері қатынастармен анықталады:

$$\begin{aligned} a_{NE}(i) &= -10 \lg \frac{P_{i,com}(\lambda_i)}{P_i(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n); & a_{FE}(i) &= -10 \lg \frac{P_{com,i}(\lambda_i)}{P_{com}(\lambda_i)}, \quad (i = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Жалпы жағдайда 1: n WDM модулін n матрицаларының жиынтығымен сипаттауға болады (толқын ұзындығына бір матрица), мұнда әр матрицаның өлшемі $(n + 1) \times (n + 1)$ болады.

3.4 Циркуляторлар

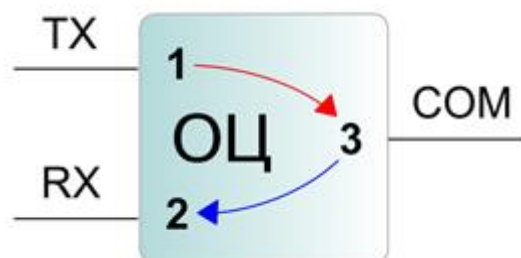
Оптикалық циркулятор - оптикалық байланыс желілерін герметизациялаудың әмбебап құралы. Екі оптикалық сигналды әртүрлі бағытта беру бірдей толқын ұзындығымен жүзеге асырылады, бұл желіні герметизациялау кезінде қолданыстағы екі талшықты «бренд» трансиверлерін пайдалануға мүмкіндік береді [39].

Оптикалық айналымның физикалық негізі

Оптикалық циркулятордың жұмысы оптикалық ортадағы жарықтың таралу ерекшелігіне негізделген: поляризацияның әртүрлі жазықтықтарында таралатын поляризацияланған жарық толқындары өзара әсер етпейді. Бұл тұжырым бірдей ұзындықтағы жарық толқындарына да қатысты.

Оптикалық айналымның жұмыс принципі

Телекоммуникация жүйелерінде қолданылатын оптикалық циркуляторда үш порт бар: 1 TX, 2 RX және 3 COM. Оптикалық айналымдағы сигнал 1-3 (TX-COM) және (3-2 COM-RX) бағыттар бойынша тарала алады, сонымен қатар 1 және 2 порттарды оқшаулаудың жоғары деңгейін қамтамасыз етеді, 1 TX және 2 RX порттарын циклде (ілімектен) жабу мүмкін. Бұл іс кейінірек сипатталады.



Сурет 3.5 - Оптикалық циркулятор

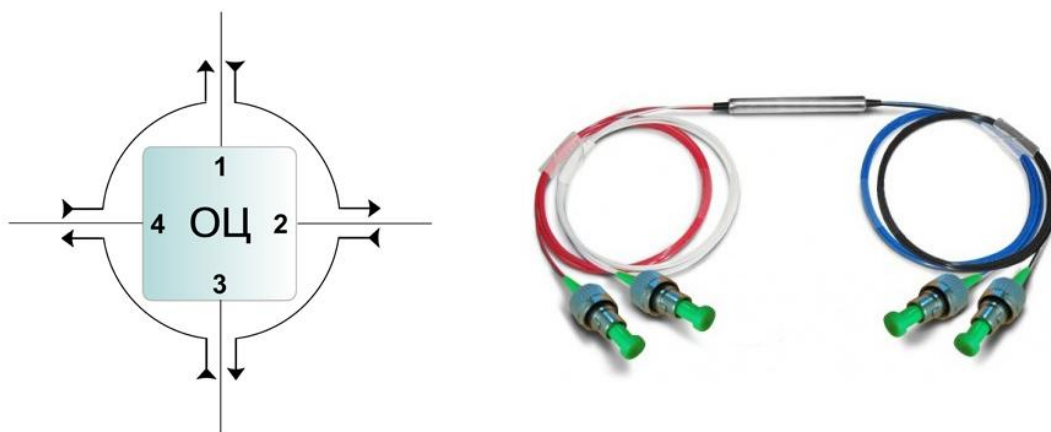
Фарадей роторлары және бірефрентентті кристалдар оптикалық циркуляцияда поляризацияның әртүрлі жазықтықтары бойымен радиацияны сұйылту үшін қолданылады. Соңғысы сонымен қатар оптикалық циркулятордың tx және rx порттары арасында оқшаулауды қамтамасыз етеді. Фарадей роторында сигналдың поляризация жазықтығы магнит өрісінің әсерінен айналады. Бирефрентенттік кристалдар сәулеленуді екіге бөледі, ал поляризацияның перпендикуляр жазықтықтарында жаңа сәулелер таралады.

Оптикалық циркуляторларда бір немесе екі трансмиссиялық терезе болуы мүмкін, олар 1310, 1550 және 1310 + 1550 нм толқын ұзындығында сигнал беруге арналған. Соңғы нұсқа оптикалық сүзгінің көмегімен жасалады.

Оптикалық циркуляторлар тек телекоммуникациялық желілерде ғана емес, сонымен қатар өнеркәсіптік және ғылыми оптикалық жүйелерде де қолданылады. Мысал ретінде төрт полюсті оптикалық айналымды келтіруге болады.

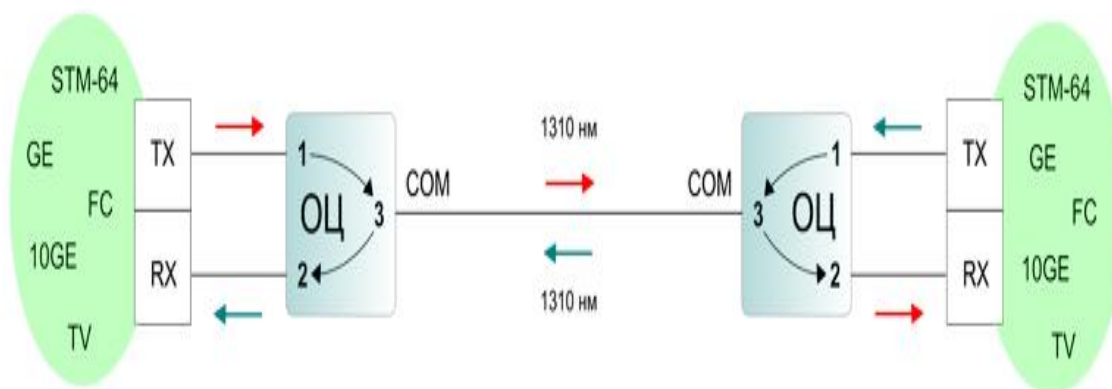
Оптикалық циркуляторларды қолдану

Бір талшықты герметизациялау үшін екі бірдей оптикалық циркулятор қолданылады, оның СОМ шығысында сигнал поляризация жазықтығында 45° ығысады. Екі оптикалық циркулятордың СОМ порттарын қосу кезінде поляризация жазықтықтарының арасындағы айырмашылық 90° болады. Оптикалық циркуляторлардың максималды экономикалық тиімділігіне деректерді беру жылдамдығы 10 Гб / с және одан жоғары арналарды тығыздау арқылы қол жеткізіледі, алайда кез-келген мәліметтерді беру протоколы арқылы мәліметтерді беруге болады.



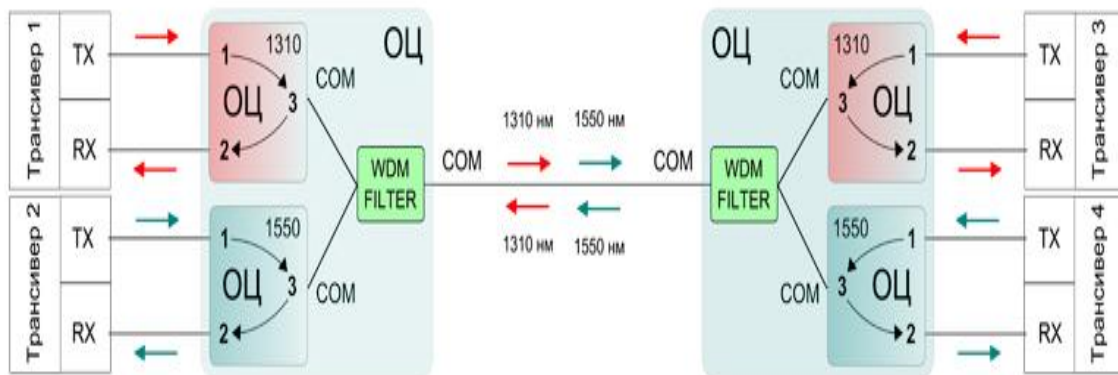
Сурет 3.6 - Оптикалық циркуляторларды қолдану

Бір талшықты герметизациялау үшін екі бірдей оптикалық циркулятор қолданылады, оның СОМ шығысында сигнал поляризация жазықтығында 45° ығысады. Екі оптикалық циркулятордың СОМ порттарын қосу кезінде поляризация жазықтықтарының арасындағы айырмашылық 90° болады. Оптикалық циркуляторлардың максималды экономикалық тиімділігіне деректерді беру жылдамдығы 10 Гб / с және одан жоғары арналарды тығыздау арқылы қол жеткізіледі, алайда кез-келген мәліметтерді беру протоколы арқылы мәліметтерді беруге болады [40].



Сурет 3.7 - Екі оптикалық циркулятордың СОМ порттарын қосу

Екі байланыс каналын бір талшыққа тығыздау үшін екі беріліс терезесі бар оптикалық циркуляторлар қолданылады. Бұл құрылғыларда 1310 және 1550 нм жылдамдықтағы екі терезе циркуляторы кең жолақты WDM фильтрі арқылы біріктірілген. Бір талшықтан деректерді беруді ұйымдастыру үшін екі бірдей циркулятор және 1310 және 1550 нм жұмыс толқын ұзындығы бар екі жұп стандартты қабылдағыш қажет [41].



Сурет 3.8 - Оптикалық циркуляторлардың ерекшеліктері

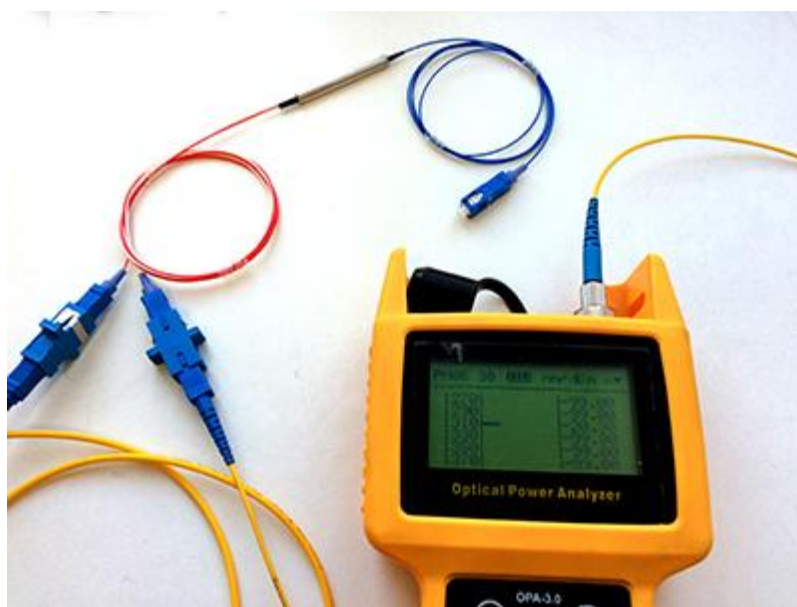
Оптикалық циркуляторлар талшықты-оптикалық байланыстардағы артқы шағылыстыруға қойылатын талаптарды арттырды. Егер сызықта үлкен артқы шағылысулар болған жағдайда, оптикалық циркуляторға қосылған оптикалық қабылдағыш цикл режимінде жұмыс істей бастайды, ал шын мәнінде сигнал 1 порттан 2 портқа беріледі.

Трансивератордың TX портынан 1 сигнал оптикалық циркуляторға түседі және желіге беріледі. Егер радиолокациялық нүктеде артқы шағылыстың жоғары деңгейі бар сызықта ақау пайда болса, сигналдың бір бөлігі трансиверге қарай көріне бастайды. Бұл сигнал оптикалық циркуляторлар арқылы трансивердің RX портына қосылған 2-портқа жіберіледі. Сол RX қабылдағышы 1 екінші сигнал таратқыштан пайдалы сигнал жібереді. «1 - РЛ» және «РЛ - Схематор 2» арасындағы қашықтықтың айырмашылығына байланысты, P1 және P2 қуат деңгейлерінің ара қатынасы болуы мүмкін, сондықтан қабылдағыш 1 қабылдағыш пайдалы сигналды жалпы радиациядан оқшаулай алмайды немесе шағылған сигналды пайдалы деп ажырата алмайды.

Артқы шағылысу арқылы мүмкіндіктерді визуализациялау үшін біз эксперимент жүргіздік [42].

Сәулелендіру көзі есептегішті енгізу кезінде шамамен 7 дБм сигнал деңгейін қамтамасыз ететін деңгейге келтірілген. Бірінші суретте, оптикалық қуат көзін метрге ұзындығы 1 метр патч-сым арқылы (-6,99 дБм) қосқанда оптикалық қуат өлшегішінің көрсеткіштері. Екінші суретте сигнал көзі TX портына, ал RX портына тікелей оптикалық қуат өлшегішке қосылған. Com

желісінің порты қосылмаған. Бұл жағдайда есептегіш $-20,38$ дБм мәнін көрсетеді.



Сәулелендіру көзі циркуляцияның ТХ портына және есептегіш Com Com портына қосылған кезде, өлшеуіш $-7,94$ дБм мәнін жазады, бұл өндіруші жариялаған өшірудің ~ 1 дБ сәйкес келеді.

Бұл экспериментте радиациялық параметрлерді дәл анықтау проблемасы туындамады, бізді тек оптикалық сигнал деңгейінің реттілігі қызықтырды [43].

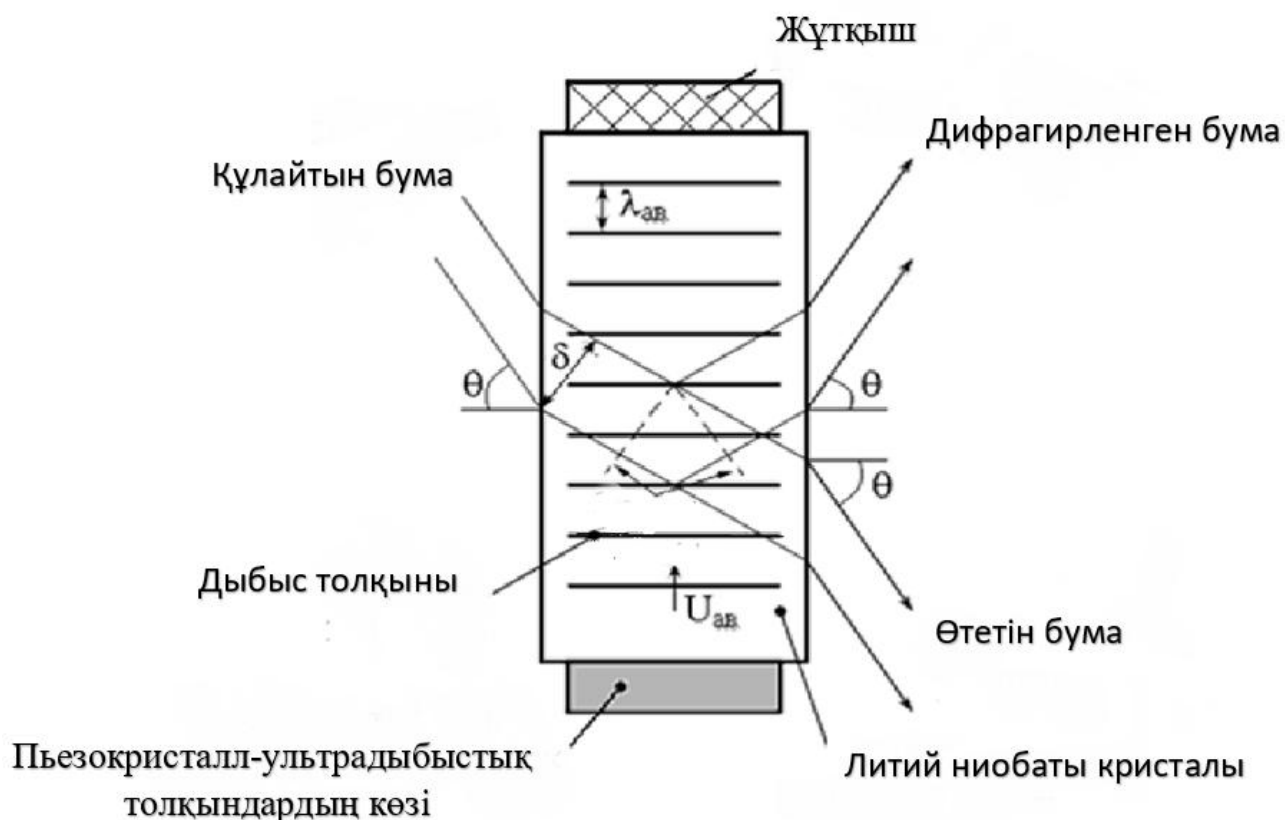
4 Белсенді оптикалық компоненттер

Оптикалық модуляторлар қалыптасқан жарық сәулесінің сыртқы модуляциясында қолданылады. Келесі модуляторлар түрлері бар:

- акустооптика заңдарын қолданатын акустооптикалық;
- электрооптика заңдарын қолданатын электрооптикалық;
- электрооптикалық, жартылай өткізгіш күшейткіштерді қолданатын.

4.1 Акустооптикалық модуляторлар

Акустооптикалық модулятордың (АОМ) жұмыс істеу принципі оптикалық мөлдір материалдардың сыну көрсеткішіне (мысалы, LiNbO_3 литий ниобаты) қысымға байланысты негізделген. Бұл қысым пьезоэлектрлік түрлендіргіш – пьезокристал (ПК) шығаратын акустикалық (ультрадыбыстық – УД) толқындармен жасалуы мүмкін. ПК модулятордың негізгі элементі болып табылатын акустооптикалық ұяшықты (АОҰ) жасау үшін акустооптикалық материалға желімдейді (4.1-сурет).



Сурет 4.1 – Акустик-оптикалық модуляторларда жарық шоғының өту схемасы

Акустикалық толқын оптикалық ортада үнемі өзгертін сыну көрсеткіші бар, дифракциялық тордың рөлін атқаратын құрылымды жасайды. Сыну көрсеткішінің тең сызықтары (4.1-суретте олар тұтас көлденең сызықтармен көрсетілген) λ акустикалық толқын ұзындығына қашық болады. Шағылысқан акустикалық толқын болмауы үшін жұтқыш қолданылады [44].

АОҰ-да түсетін шоғыр кіргенде оның ПК-ден дыбыстық толқынның фронтымен өзара әрекеттесуі нәтижесінде өтетін және дифрагирленген шоғырдың ыдырауына әкелетін ультрадыбыста Жарық дифракциясы пайда болады. Сипаты өзара іс-қимыл байланысты арақатынасын диаметрін шоғыры δ , ұзындығы жарық толқынының λ және құлау бұрышын θ . Оптикалық модуляторларда Брэгг дифракциясының пайда болу шарттары қолданылады, яғни ара қатынасы орындалғанда.

$$\lambda_{as} \sin \theta = m \lambda, \quad (4.1)$$

мұндағы d тұрақты тор рөлін атқарады;
 m -дифракция тәртібі ($m=0, 1, 2, \dots$);
 λ -жарық толқынының ұзындығы.

Модуляция мақсаттары үшін әдетте дифрагирленген жарық қолданылады, өтетін жарықтың толық (100%) модуляциясы өте үлкен акустикалық қуатты талап етеді. Модуляция амплитудалы-модуляциялық дыбыс толқынымен пайда болады, дифрагирленген толқынның қарқындылығын модульдейтін өзара әрекеттесуі модулятор үшін шығыс толқынының рөлін ойнайтын. Модулятордың тез әрекет етуі Жарық шоғырының көлденең қимасы арқылы дыбыстық сигналдың өту уақытымен анықталады және 10^{-7} с тәртібі бар.

АОМ-бұл өте қарапайым және сенімді құрылғы, бірақ белгілі бір кемшіліктері бар, олардың негізгілері:

- түрлендіру сипаттамасының сызықсыз болуы;
- модуляция жиілігінің өсуімен іске асырылатын модуляция тереңдігін азайту, бұл оларды жоғары жылдамдықты схемаларда пайдалануды шектейді;
- модуляцияланған лазерлік сәуле шығару жиілігінің акустикалық модуляциялаушы жиілік шамасына ығысуы;
- дифрагирленген және құламалы шоғырлардың қарқындылығының қатынасы ретінде анықталатын дифракцияның жоғары емес тиімділігі (оның ұлғаюына акустикалық сигналдың қуатын арттыру есебінен қол жеткізіледі) .

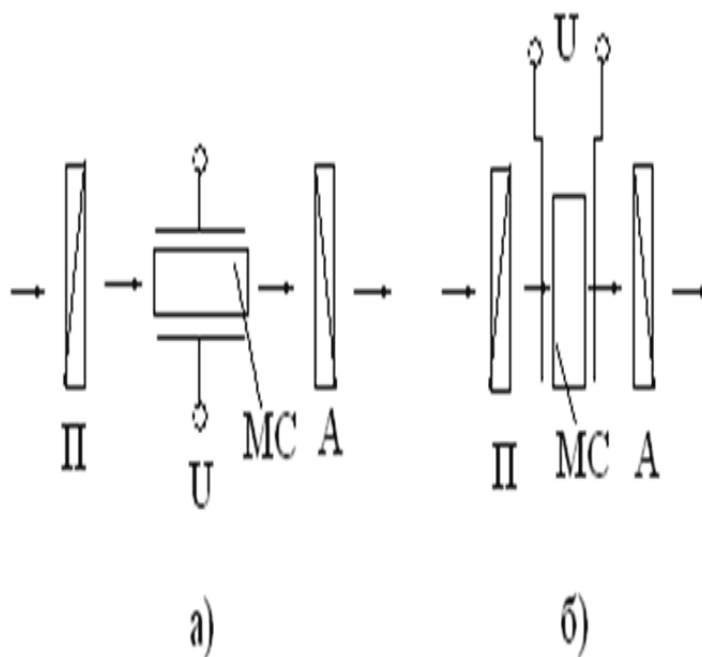
АОЖ акустооптикалық аспаптардың әртүрлі түрлерінде: дефлекторларда, сканерлерде, модуляторларда, сүзгілерде және процессорларда – оптикалық сәуленің қандай параметрімен басқару жүзеге асырылатындығына байланысты пайдаланылуы мүмкін [45].

4.2 Электр оптикалық модуляторлар

Кез келген ортаның оптикалық сипаттамалары, мысалы, сыну көрсеткіші сияқты жарықтың сипаты мен поляризациясына әсер етеді, байланысқан зарядтардың (электрондар мен иондардың) ортадағы таралуына байланысты. Берілген электр өрісінің әсерінен ол өзгеруі мүмкін, ол сыну көрсеткіші мен поляризация жағдайының эллипсоидінің өзгеруіне әкеледі. Орталық симметриясы жоқ орталарда көрсетілген әрекет Пококельстің сызықтық электр оптикалық әсері түрінде көрінеді. Орталық симметриялы орталарда, керісінше, Керрдің квадраттық электр оптикалық әсері байқалады. Бұл екі ең маңызды электр оптикалық әсер электр оптикалық модуляторларды құру кезінде пайдаланылуы мүмкін

а) Керр әсері негізінде Электр оптикалық модуляторлар.

Жарық модуляциясы үшін изотропты затта сыртқы электр өрісінің әсерінен оптикалық анизотропия пайда болған Керрдің (1875 ж.) жақсы зерттелген электр оптикалық әсері кеңінен қолданылады. (4.2 сурет, а) мөлдір диэлектрик зат жалпақ конденсатордың қалаулары арасында орналастырылады, оған U кернеуін қоса береді, МС модуляциялаушы ортада жеткілікті күшті электр өрісін жасайды. $U = 0$ кезінде құрылғы шығысындағы жарықтың қарқындылығы нөлге тең, бірақ кернеуді салған кезде модульдік орта электр өрісінің бағытына параллель оптикалық осі бар ұқсас қосжарықтаушы кристалға оптикалық қатынаста болады.



П-поляризатор, а-анализатор, МС-модульдеуші орта

Сурет 4.2 - Керр (а) әсері және Пококельстің бойлық әсері негізінде оптикалық модуляторлардың жұмысы (б)

Сондықтан, Керра ұяшығынан өтіп, жарық толқыны екі сызықтық поляризацияланған құрауыштарға ыдырайды. Олардың бірі поляризацияланған, оның электрлік векторы сыртқы полюсқа перпендикуляр (кәдімгі толқын), ал екіншісі – параллель (ерекше толқын) бағытталған. Модульдің максималды тереңдігін қамтамасыз ету үшін поляризатордың басты жазықтығы 45° бұрышын вектормен құрауы қажет. Кәдімгі және ерекше толқындар әр түрлі сыну көрсеткіштері (n_o және n_e , сондықтан да қолданылады және ортада әр түрлі жылдамдықпен айналады. Керр ұяшығынан өтіп, жарық эллиптикалық поляризацияланған және көп немесе кем дегенде талдағыш арқылы өтеді. Теория мен тәжірибе n_o және n_e айырмашылықтары E^2 пропорционалды екенін көрсетеді.

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_k E^2, \quad (4.2)$$

мұндағы k_k E -ге тәуелді емес коэффициент.

Модуляциялаушы ортада l жол өткеннен кейін қарапайым және ерекше сәулелер арасындағы фазалардың айырмасы:

$$\varphi = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} \cdot l = 2\pi \frac{k_k E^2 l}{\lambda} = 2\pi B l E^2, \quad (4.3)$$

мұндағы $B = k_k / \lambda$ -Керра тұрақты деп аталатын.

Керрдің квадраттық әсері модуляциялаушы ортаның молекулаларының оптикалық анизотропиясымен түсіндіріледі, яғни олардың жарық толқынының электр өрісімен поляризацияға қабілеттілігінің әр түрлі бағыттарда айырмашылығы. Сыртқы электр өрісі жоқ анизотропты молекулалар хаотикалық және жалпы изотропно бағытталған. Егер молекулалар меншікті электр дипольдық сәтке ие болса, онда күшті электр өрісі олардың басым бағдарын тудырады және зат макроскопиялық анизотропты болады.

Меншікті дипольдық сәтке ие емес молекулалардан тұратын заттарда сыртқы электр өрісі оны индуцирлеуі мүмкін, және де анизотропияның салдарынан дипольді сәт электр өрісінің бағытына сәйкес келмейді. Молекулаларды электр өрісіне қатысты белгілі бір жолмен бағдарлауға мәжбүр ететін күштер жұбы пайда болады. Айтылғандарға сәйкес Керрдің бағдарлы және поляризациялық әсері бар. Дипольді молекулалардың бағдарлы релаксация уақыты шаманың реті бойынша 10пс құрайды. Бұл 100мгц–1ГГц үлкен модуляция жиіліктерінде Керрдің бағдарлы әсері іс жүзінде байқалмайды және жылдам әрекет етуі 0,1–1нс уақытпен шектелген поляризациялық әсер ғана тиімді болып қала береді.

б) Поккельс әсері негізінде Электр оптикалық модуляторлар.

Электрооптикалық құбылыстар изотропты заттарда ғана емес, табиғи оптикалық анизотропияға ие кристалдарда да байқалады. $E = 0$ кезінде қос сәуле жарықшақтың көрінбеуі үшін бір осьті кристалды оның оптикалық осіне перпендикулярлы қырлар пайда болатындай етіп кеседі, ал жарықты оның бойымен жібереді. Электр өрісін басқарушы Жарық таралу бағытына перпендикуляр бағытта жасайды, яғни Керр ұяшығы сияқты. Сондай-ақ, электр өрісі жарықтың таралуына параллель бағытталған модульдік құрылғы болуы мүмкін. Ол үшін анизотропты кристалдың тиісті қырларына мөлдір электродтар жағылады суретке сәйкес ұзына бойлық және көлденең электрооптикалық әсерлер терминдері қолданылады. Электр өрісіне орналастырылған анизотропты кристалдардың Қос сәулелі сынуының өзгеруі оны тапқан физиканың аты бойынша Пококельс эффектiсi деп аталады (1894 ж.). Керр әсеріне қарағанда Пококельс әсеріндегі n_o және n_e айырмашылығы E бірінші дәрежесіне пропорционалды:

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_n E, \quad (4.4)$$

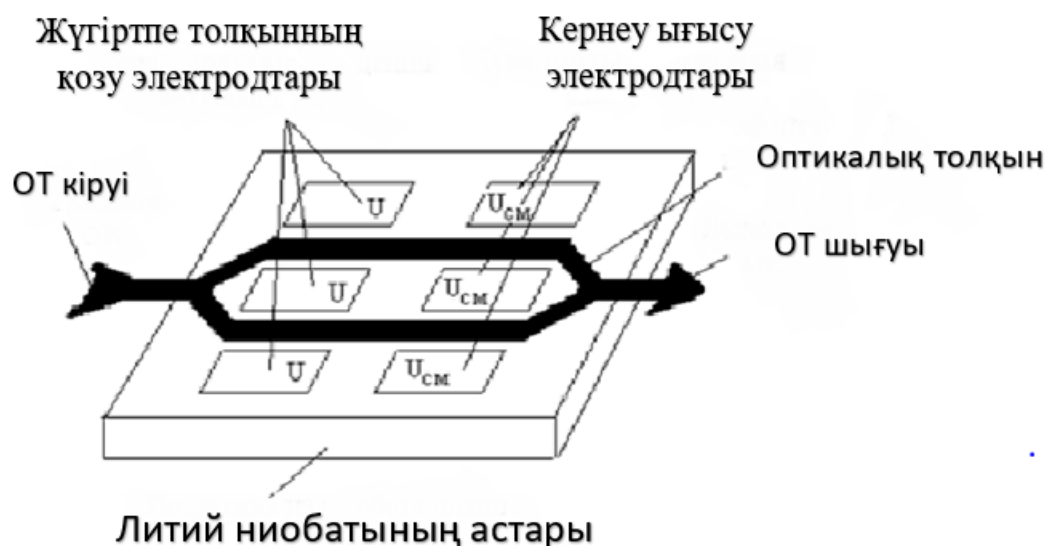
мұндағы k_n - (4.41) формуладағы k_n -дан мәні бойынша және мөлшері бойынша ерекшеленетін электрооптикалық коэффициент.

Поккельстің әсері шамамен 10мгц жиілігіне дейін жарықты модельдеуге мүмкіндік беретін аз инерциондық тән. Алайда, модуляция жиілігінің жоғарғы шегі заттың процессімен емес, құрылғының сыйымдылығымен анықталады және бірнеше рет төмен болады. Осылайша, Пококельс ұяшығы оған берілетін кернеудің амплитудалық модуляциясы кезінде Пококельс әсері есебінен қарқындылығы бойынша жарық толқынының модуляциясын жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Модуляция тереңдігі-99,9% дейін. Мұндай модуляторлардың түрін жүзеге асыру көлемді оптиканы пайдалануға тән, ал интегралды оптика үшін Маха-Цендер интерферометрінің схемасын пайдаланатын басқарылатын бағытталған тармақтағыштар мен модуляторларды қолдану неғұрлым тән болып табылады.

в) Мах-Цендер интерферометрі негізіндегі Электрооптикалық модуляторлар.

Мұндай модулятор Маха-Цендер (ММЦ) интерферометрінің схемасына сәйкес интерферометрдің ұқсас екі иығынан тұрады (4.3- сурет).

Сұлбада электродтардың екі түрі көрсетілген: модульдік электр өрісін құруға арналған электродтар және тұрақты электр өрісін құруға арналған электродтар, мұндай модулятордың беріліс сипаттамасында жұмыс нүктесін қоюға мүмкіндік береді.



Сурет 4.3 – Маха-Цендер интерферометрі типті электрооптикалық модулятордың схемасы

U модуляция кернеуі әртүрлі полярлы болуы керек. Берілген кернеудің полярлығына байланысты ортаның сыну көрсеткішінің өзгеруі болады, нәтижесінде сигналдың өту жылдамдығы өзгереді. Оптикалық көтергіштің қозғалысы бір иықта баяулайды және екіншісінде тездетіледі. Модульдеуші электродтар электр және оптикалық толқындар өрістерінің тиімді таралуын (L ұзындығында) қамтамасыз ету үшін жеткілікті ұзын. Электродтарға қоса берілген u кернеуіне және L ұзындығына байланысты өрістердің өзара әрекеттесуі аймағында, осы сән иықтары бойынша таратылатын фазалардың жылжуын сатып алады

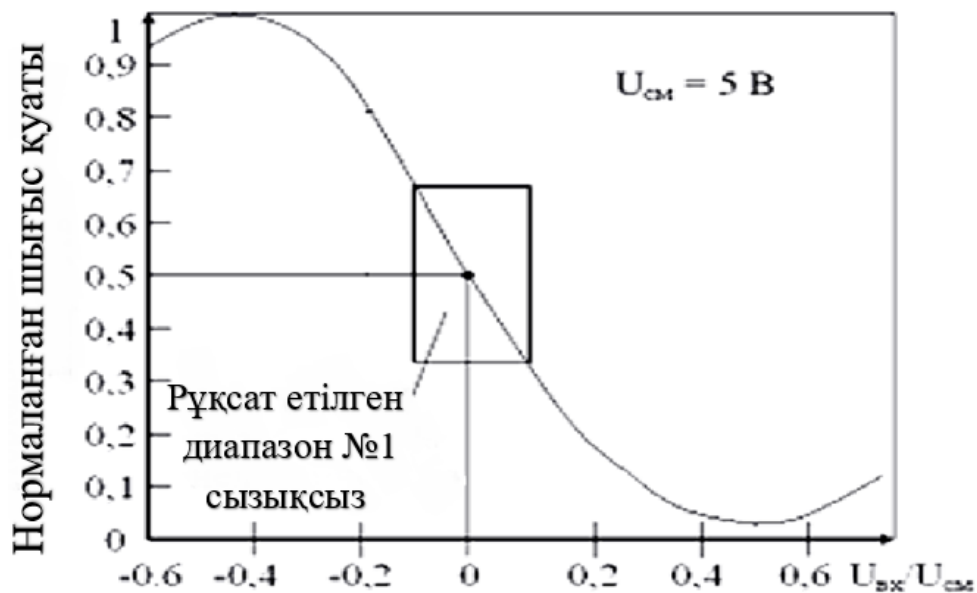
$$\Delta\varphi = k_m \Delta n_{эфф} L, \quad (4.5)$$

мұндағы $\Delta\varphi = k_m \Delta n_{эфф} L$, – сән сынуының тиімді көрсеткішін өзгерту амплитудасы;

- ПЭФ-тиімді сән сыну көрсеткіші;
- γ -оптикалық жұмыс ортасының электрооптикалық коэффициенті;
- E-U кернеуімен жасалатын электр өрісінің кернеулігі;
- k_m -толқындық сән векторы.

Шығу АМО модуляция кіріс жарық ағынының қарқындылығы бойынша байланысты интерференция жеткен соң жарық мод жүреді.

Сигналды қабылдағышқа жіберу кезінде сигналдың әлсіреуі болады. Беріліс сипаттамасы АМО (сурет 4.4) білдіреді кесінді синусоиды, оның процесін басқару үшін модуляция таңдайды бірін жартылай толқынды, қоярда онда белгілі бір кернеу ығысу $U_{см}$ жүйесінің көмегімен электрод кернеу ығысу. Бұл кернеу беріліс сипаттамасының сызықтық және квадраттық аймағында жұмыс істеу үшін таңдалуы мүмкін.



Сурет 4.4 – ИМЦ типті модулятордың беріліс сипаттамасы

Бұл модельдің түрі әр түрлі қосымшаларда, ең алдымен жаңа буын жүйелерінде және толқын ұзындығы бойынша мультиплексирлеуде кеңінен қолданылады.

5 Литий ниобаты негізіндегі Мах-цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторлары

Мах–Цандердің интерферометр схемасы бойынша амплитудалық электрооптикалық модулятор аналогтық және цифрлық талшықты-оптикалық байланыс желілеріндегі (ТОбЖ) сыртқы модулятордың негізгі нұсқасы болып табылады. Бұл құрылғының артықшылықтарына мыналар жатады:

- модуляцияның жоғары жиілігі;
- ықшамдылығы;
- сенімділігі.

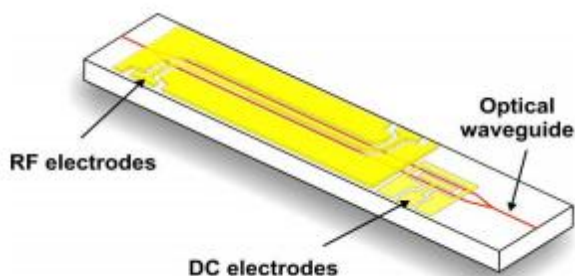
Модуляторлар сондай-ақ талшықты-оптикалық датчиктерде, өлшеу жабдықтарында, радиосигналды оптоалшық, радиофотоника бойынша таратуда қолданылады [46].

Талшықты-оптикалық байланыс желілері авиация үшін маңызды артықшылықтарға ие: салмағы мен көлемі аз, электромагниттік нысаналарға сезімталдық, толық жарылыс қауіпсіздігі, кең өткізу жолағы. Мыс өткізгіштерді оптоалшықпен ауыстыру ұшу аппараттарының салмағын төмендетуге және сенімділігін арттыруға ғана емес, сонымен қатар әуе кемесінде ақпарат беру жүйесінің жалпы құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Маха-Цендер электрооптикалық модуляторларының кемшіліктеріне олардың жоғары құны, сондай-ақ әртүрлі дрейф құбылыстарына ұшырауы жатады.

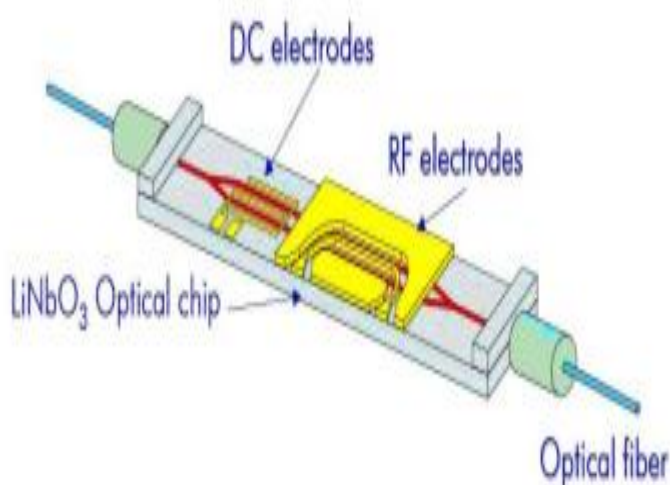
Маха-Цендердің сәуле шығару қарқындылығы модуляторлары ixblue Photonics (Франция), Lumentum Holdings Inc компанияларымен жасалады. (АҚШ), Optilab (АҚШ), Covega (АҚШ), EOSpace (АҚШ), Thorlabs (АҚШ), Oclaro (АҚШ), Laser 2000 (Ұлыбритания), JENOPTIK (Германия), Sumitomo Osaka Cement (Жапония), Fujitsu (Жапония), OKI Electronics Components (Жапония), Lucent Technologies (Қытай), SWT (Қытай), ECI (Израиль), НПК "оптолинк" (Ресей). Тізім толық емес.

Маха–Цендердің (MMZ) электрооптикалық модуляторлары – интерферометриялық түрдегі қарқындылық модуляторлары. IXBlue Photonics (Франция) компаниясының модуляторы чипінің схемалық бейнесі суретте көрсетілген (сурет 5.1).



Сурет 5.1 - ixBlue Photonics1 компаниясының модуляторы чипінің схемалық бейнесі: RF electrodes-модуляция электродтары; DC electrodes-жылжу электродтары; Optical waveguide-оптикалық толқын (жарық өткізгіш))

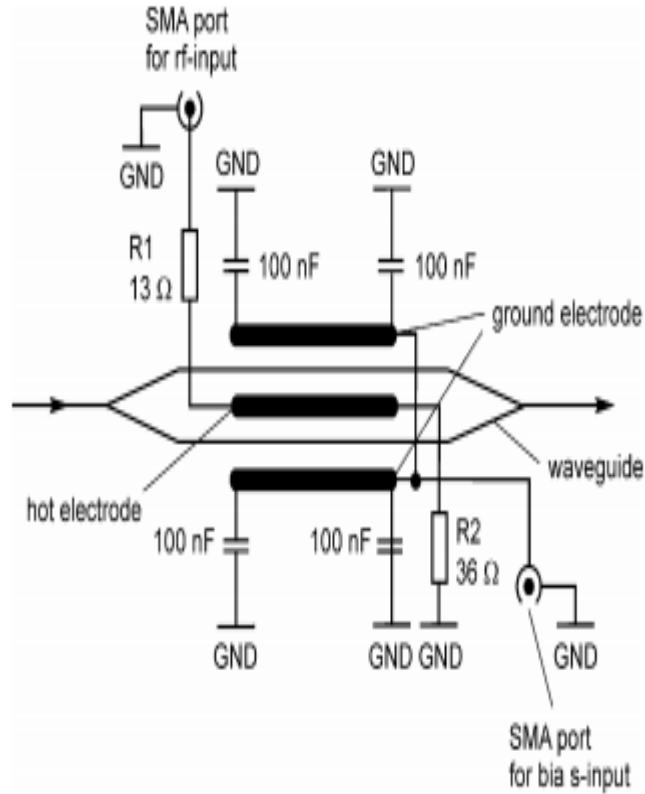
"Перм ғылыми-өндірістік Аспап жасау компаниясы" ААҚ МЗМ-Х-015, МЗМ-Х-016 және МЗМ-Х-017 телекоммуникацияларының кең жолақты жүйелері үшін литий ниобатында жарық қарқындылығы электрооптикалық модуляторлар шығарады (сурет 5.2). Толқынның жұмыс ұзындығы 1540-1560 нм. Пайдалану температурасы минус 60-тан плюс 70 °С дейін



Сурет 5.2 - Интегралды-оптикалық СВЧ–Маха – Пермалық ғылыми – өндірістік прибор жасау компаниясының Цендері модуляторы [6]: LiNbO₃ Optical chip-кристалды төсеніш (электрооптикалық кристалл); DC electrodes – DC-ығысу электродтары; RF electrodes – СВЧ-жүгіртпе толқынның копарналық желісі түріндегі электродтар; Optical fiber-оптикалық талшықты оптикалық талшықтар

Модулятор-каналдық оптикалық толқындар жүйесінен және оларға параллель электродтар жүйесінен тұратын интегралды-оптикалық схема. Кіріс жарық таратқыштың лазерлік сәулеленуі екі жолға бөлінеді, олар шығу Жарық таратқышына қосылады (құраушылар когерентті болып қалыптасады). Бұл екі жол интерферометрдің екі иығын құрайды. Жарық өткізгіштердің жанында екі жұп электродтар: RF – модуляция электродтары және DC – жұмыс нүктесінің ығысу электродтары. Электродтарды қалыптастыру үшін алтын пайдаланылады, адгезиялық қабат ретінде хром қолданылады. Электродтарға берілген кезде жарық өткізгіштерде сыну көрсеткішінің өзгеруі болады. Иықтардағы лазерлік сәуле әртүрлі жылдамдықтармен таралады және фазалардың әртүрлілігіне ие болады.

Lumentum Holdings Inc Компаниясы. (JDSU) 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) modulator шығарады, онда RF модуляция сигналының электродтары және DC ығысу кернеуінің электродтары біріктірілген. JENOPTIK (Германия) компаниясының am сериялы аналогтық және сандық модуляциясына арналған модуляторлар да RF - және DC электродтары бар [46]. RF модуляция сигналының кернеу тізбегінің және жұмыс нүктесінің (bias) жылжу кернеуінің схемасының нұсқасы суретте көрсетілген [47].



Сурет 5.3 - JENOPTIK компаниясының AM 1550 модуляторының электродтарын қосу схемасы

Интерферометрдің беріліс функциясы-шығу қарқындылығының иықта орналасқан фазалардың әртүрлілігіне тәуелділігі. Электродтарға қоса берілген кернеу $v(t)$ модулятордың интенсивтілігінің беріліс функциясы:

$$I_{out}(t) = T_{mod} \frac{I_{in}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V(t) - \phi \right) \right], \quad (5.1)$$

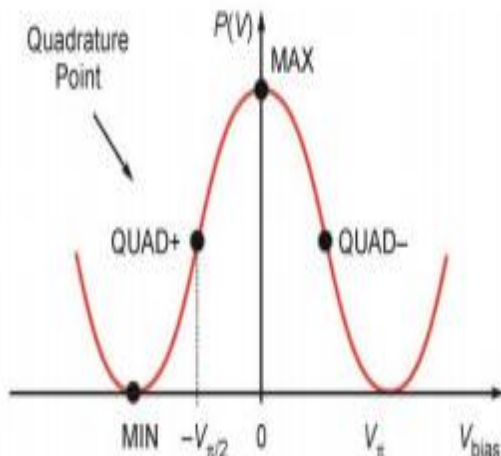
мұндағы $I_{out}(t)$ - Output intensity-сәуле шығару қарқындылығы;
 I_{in} - Input intensity-кіріс сәулесінің қарқындылығы;
 T_{mod} - optical transmission of the device – модуляторды тарату коэффициенті;

V_{π} - half-Wave voltage of the modulator-модулятордың жартылай толқынды кернеуі (интерференциялаушы сәулелену фазаларының айырмасы π -ге тең);

ϕ – phase term – фаза.

Мах–Цендер фазасының ϕ мінсіз модуляторы (теңдестірілген оптикалық жолдары бар) үшін құрылғы нөлге тең. Алайда, шын мәнінде материалдың әртүрлілігі мен дайындауға рұқсатнамалардың екі оптикалық жолдардың арасындағы айырмашылық бар. Бұл теңгерімсіздік фазаны ϕ (phase term) модулятордың өткізу функциясына енгізумен ескеріледі.

Толқынжолдардың симметриялық топологиясы бар Маха–Цендер идеалды модуляторының интенсивтілігінің беріліс функциясы (немесе DC-электродтарға жылжу кернеуін берумен фазаның φ компенсациясы кезінде) және интерферометр иықтарында сәулелену қарқындылығы тең болған кезде суретте келтірілген.



Сурет 5.4 – Мах – Цендер идеалды модуляторының беріліс функциясы : $P(V)$ – модулятордың шығу сәулеленуінің қарқындылығы; V_{bias} – тұрақты DC ығысу кернеуі; V -жартылай толқынды кернеу; Quadrature Point (QUAD+, QUAD -) - квадраттың нүктелері

$V_{\pi DC}$ – DC электродтарға жылжу кернеуіне арналған жартылай толқынды кернеу және RF электродтарға модуляция кернеуіне арналған $V_{\pi RF}$ – жартылай толқынды кернеу ажыратылады.

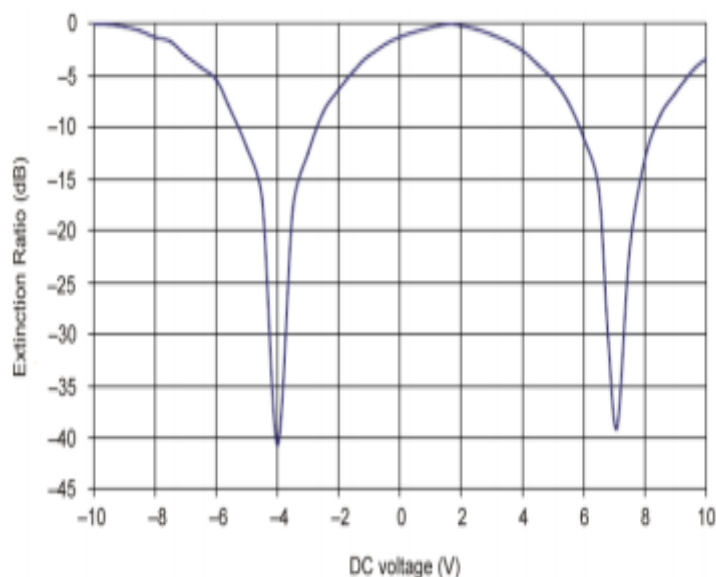
Модулятордың жұмыс нүктесі (MIN, QUAD+, MAX, QUAD-) мақсатты қолдануға байланысты DC электродтарға V_{bias} тұрақты кернеуін беру арқылы таңдалады. QUAD+ және Quad максимальды жұмыс нүктелерінде беріліс функциясы тік және сызықтық емес бұрмалаулар аз.

IXBlue Photonics компаниясы (Франция) 800, 1060, 1300, 1550 және 2000 нм лазер толқындарының ұзындығы үшін литий $LiNbO_3$ ниобаты кристалдарының негізінде Маха–Цендер электрооптикалық модуляторларын өндіреді. Модуляторлардың негізгі сипаттамалары кестеде келтірілген.

Маха-Цендер модуляторларының негізгі параметрлері: толқын ұзындығының жұмыс диапазоны, модуляция жолағы, енгізілетін шығындар, жартылай толқынды кернеу, экстинкция коэффициенті. Оптикалық модулятордың максималды өткізу коэффициентінің минималды қатынасына қатынасы.

Кесте 5.1 - Ixblue Photonics компаниясының Маха–Цендер модуляторларының негізгі сипаттамалары

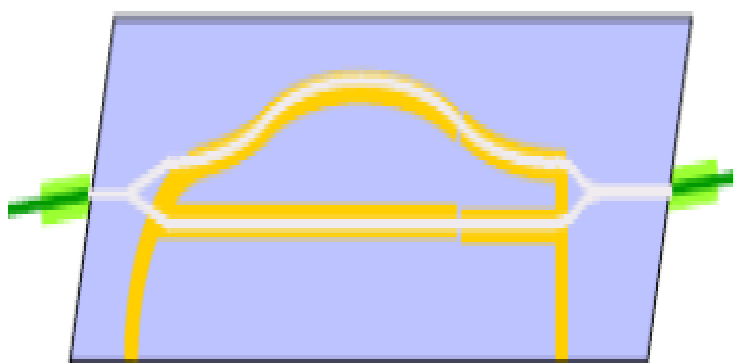
Модулятор түрі	NIRMX800-LN-20	NIRMX950-LN-20	NIR-MX-LN-20	MX 1300-LN-40	MXAN-LN-40	MX2000-LN-10
Operating wavelength	800 nm (780–850)	900 nm (850-960)	1060 nm (980-1150)	1310 nm (1270-1330)	1550 nm (1530-1625)	2050 nm (1900-2200)
Electro-optical bandwidth	25 GHz	25 GHz	18 GHz	30 GHz	30 GHz	12 GHz
V_{π} RF@ 50 kHz	3,5 V	3,5 V	3,5 V	4 V	5 V	9,5 V
V_{π} DC electrodes	3,9 V	3,9 V	4,5 V	5,5 V	6,5 V	11 V
Optical input power, max	13 dBm (20 мВт)	10 dBm (10 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)	20 dBm (100 мВт)
RF input power, max	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm	28 dBm
Bias voltage	-20÷+20 V –	-20÷+20 V –	– 20÷+20 V –	– 20÷+20 V –	– 20÷+20 V –	-20÷+20 V –
DC extinction ratio	22 dB	25 dB	25 dB	22 dB	22 dB	22 dB



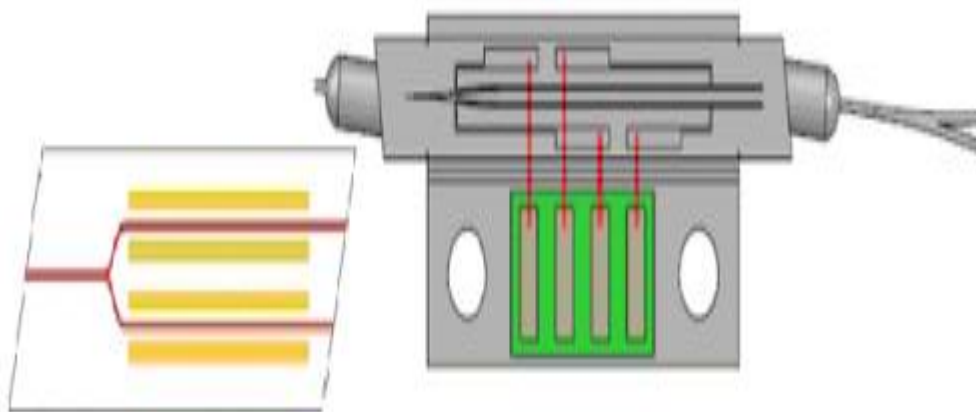
Сурет 5.5 - Extinction ratio – MXER-LN-20 модуляторының экстинкция коэффициенті

ЕoSpace компаниясы (АҚШ), мысалы, 2017 жылы Тапсырыс берушінің параметрлеріне амплитудалық модуляторларды толқын ұзындығына ұсынады: 0,65; 0,78; 0,85; 0,98; 1,06; 1,3; 1,55; 1,7 және 60 ГГц-ке дейін деректерді беру жылдамдығымен 2 мкм.

IXBlue Photonics компаниясы 1530-1625 нм толқын ұзындығының жұмыс диапазонымен Маха–Цендер амплитудалық электрооптикалық модуляторлары (қарқындылық модуляторлары) шығарылады: MXAR-LN сериялы аналогтық модуляторлар, MX-LN сериялы сандық модуляторлар, екі параллельді MXIQ-LN модуляторы. Арнайы қолдануға арналған модуляторлар шығарылады: IMZI – екі иық арасында жүрістің жоғары айырмасы (оптикалық жолдың ұзындығы), у-JPX-LN – талшықты-оптикалық гироскоптарға арналған модулятор (толқын ұзындығы 1460-1610 нм, модуляция жолағы 30 МГц, жартылай толқынды кернеу 7В).



Сурет 5.6 - IMZI модуляторы екі иық арасында жоғары жүрісті



Сурет 5.7 - Талшықты-оптикалық гироскоптар үшін Y-JPX-LN модуляторы

Optilab компаниясы (АҚШ) МІОС-1550-PG модуляторын гироскоптарға шығарады. "Оптолинк" ғылыми-өндірістік компаниясы (Зеленоград қ., Ресей) 830 және 1550 нм толқын ұзындығы бар оптикалық сәулеленудің поляризатордың, тармақтағыштың және электрлік фазалық модуляторының функцияларын орындайтын талшықты-оптикалық гироскоптарға арналған көпфункционалды интегралды-оптикалық элементтерді шығарады.

Модульдерді электр кернеулерінің (DC ығысу кернеулігі және RF модуляция кернеулігі) параметрлері бойынша сәйкес келетін модуляторларды қамтамасыз ету үшін iXBlue Photonics компаниясы МВС (Modulator Bias Controller) жұмыс нүктесінің контроллерлері мен модуляция сигналының Драйверлерін (формулировкаларын) шығарады.

5.1 Оптикалық компоненттерді модельдеу

5.1.1 Модельдеу ортасын сипаттау

Қазіргі таңда, компоненттерді, байланыстарды, жүйелер мен желілерді жобалау, модельдеу және оңтайландыру үшін, фотоника, оптоэлектроника және әр түрлі фотондық қосымшалар саласындағы серпінді дамып келе жатқан салалар үшін пайдаланылатын бағдарламалық қамтамасыз ету нарығында зерттелетін оптикалық байланыс жүйелерін әзірлеуді, тестілеуді және талдауды тез және сапалы жүргізуге мүмкіндік беретін көптеген түрлі құралдар бар.

Оптикалық жүйелерді және олардың қасиеттері мен ықтимал әсерлерін модельдеу, жобалау және теориялық зерттеу үшін OptiSystem кешенді бағдарламалық қамтамасыз ету болып табылады.

OptiSystem- бұл инновациялық кешенді бағдарламалық пакет, ол пайдаланушыларға аналогтық бейне тарату жүйесінен құрлықаралық магистральдарға дейін оптикалық желілердің кең спектрінің физикалық деңгейінде оптикалық желінің кез келген түрін жоспарлауға, тестілеуге және модельдеуге мүмкіндік береді, сондай-ақ бүкіл әлем бойынша телекоммуникациялық компаниялармен толық оптикалық желіні жоспарлау және енгізу үшін, төмен шығындармен және уақыт үнемділігімен Тәсілдеуді қолдана алады және зерттеушілер оны тиімді жұмыс үшін пайдалана алады. OptiSystem басқа үлгілеу схемаларына сүйенеді емес, автономды өнім болып табылады. Ол қуатты жаңа симуляциялық ортаға және компоненттер мен жүйелердің иерархиялық анықтамасына ие. Оның мүмкіндіктері теңшелетін компоненттерді қосу арқылы оңай кеңейтілуі мүмкін және құралдардың кең спектрімен оңай өзара әрекеттесуі мүмкін. OptiSystem құрамында 200-ден астам оптикалық дизайн үлгілері бар кең кітапхананы қамтиды, олар оптикалық дизайн жобаларына немесе оқу мен демонстрацияға арналған үлгілер ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Ең жоғары тиімділік үшін жиынтықтаушы Модульдер нақты құрылғының нақты мінез-құлқын және көрсетілген әсерлерді таңдалған дәлдікке және тиімділікке сәйкес ойнату жағдайында болуы тиіс. OptiSystem компоненттерінің кітапханасы жүздеген компоненттерді қамтиды, олардың барлығы нақты өмірмен салыстырылатын нәтижелерге жету мақсатында мұқият талданды.

OptiSystem компоненттерінің кітапханасы нақты құрылғылардан өлшенетін параметрлерді енгізеді. Олар әр түрлі өндірушілерден жабдықтарды сынау және өлшеу интеграцияланады.

OptiSystem талшықты оптика үшін нақты бағдарламалық жасақтаманы OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, WDM_Phase, OptiFiber&OptiSPICE компоненттер деңгейінде пайдалануға мүмкіндік береді. Компоненттер кітапханасында оптикалық және электрлік сигналдар үшін аралас сигнал форматтарын өңдейді. Сонымен қатар, OptiSystem қажетті модельдеу дәлдігімен және тиімділігімен байланысты тиісті алгоритмдерді қолдана отырып, сигналдарды есептеп шығарады. Жүйенің өнімділігін алдын ала болжау үшін бер және Q-фактор қатесінің ықтималдығы сияқты параметрлерді есептеу үшін сандық талдау немесе шуылдан басқа шектелген жүйелер үшін жартылай талдау әдістерін қолдану қажет.

Кеңейтілген визуализация құралдары оптикалық спектрлерді, сигналды чирп (сызықтық жиіліктік модуляциясы бар сигналдар), диаграмманың көзін, поляризация күйін, жұлдызды диаграммаларды және т.б. ойнатуға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, әрбір арна үшін WDM сигнал қуаты тізімін талдау құралдары енгізілген, күшейту, Шу, және OSNR.

Пайдаланушы деректерді сақтау үшін компонент портын таңдай алады және үлгілеу аяқталғаннан кейін зерттеулерді қоса алады. Бұл қайта есептеусіз үлгілеуден кейін деректерді өңдеуге мүмкіндік береді. Пайдаланушы сол портқа мониторда визуализаторлардың еркін санын қоса алады.

Модельдеу құралын икемді және тиімді ету үшін абстракцияның әртүрлі деңгейлерінде, оның ішінде жүйенің, кіші жүйенің және компоненттердің деңгейлерінде модельдерді қамтамасыз ету қажет. OptiSystem компоненттер мен жүйелердің шын мәнінде иерархиялық анықтамасына ие, бұл белгілі бір бағдарламалық құралдарды компоненттер деңгейінде пайдалануға және қалаған дәлдікті талап еткендей егжей-тегжейлі модельдеуге мүмкіндік береді. Пайдаланушы кіші жүйелер мен пайдаланушы кітапханаларына негізделген жаңа компоненттерді қамтуы мүмкін немесе MATLAB немесе Simulink сияқты үшінші тарап құралдарының көмегімен бірлескен үлгілеуді пайдалануы мүмкін. Пайдаланушы параметрлерге арифметикалық өрнектерді енгізе алады және VB-Script стандартты тілін пайдаланатын компоненттер мен кіші жүйелер арасында бөлінуі мүмкін жаһандық параметрлерді жасай алады. Скрипт тілі, сондай-ақ, OptiSystem басқара және басқара алады, оның ішінде есептеулер, скрипт беті қолданылған кезде макет және пост өңдеу жасау.

Есептеулерді жоспарлаушы деректер ағынының таңдалған моделіне сәйкес құрамдас модульдерді орындау тәртібін анықтау арқылы модельдеуді

басқарады. Негізгі моделі деректер ағынын, оған жүгінеді модельдеу қабатының беру компоненті болып табылады итерация деректер ағынының (CIDF). CIDF домені Итерация деректеріне және рекурсияға байланысты шарттарды қолдайтын орындау жоспарын пайдаланады.

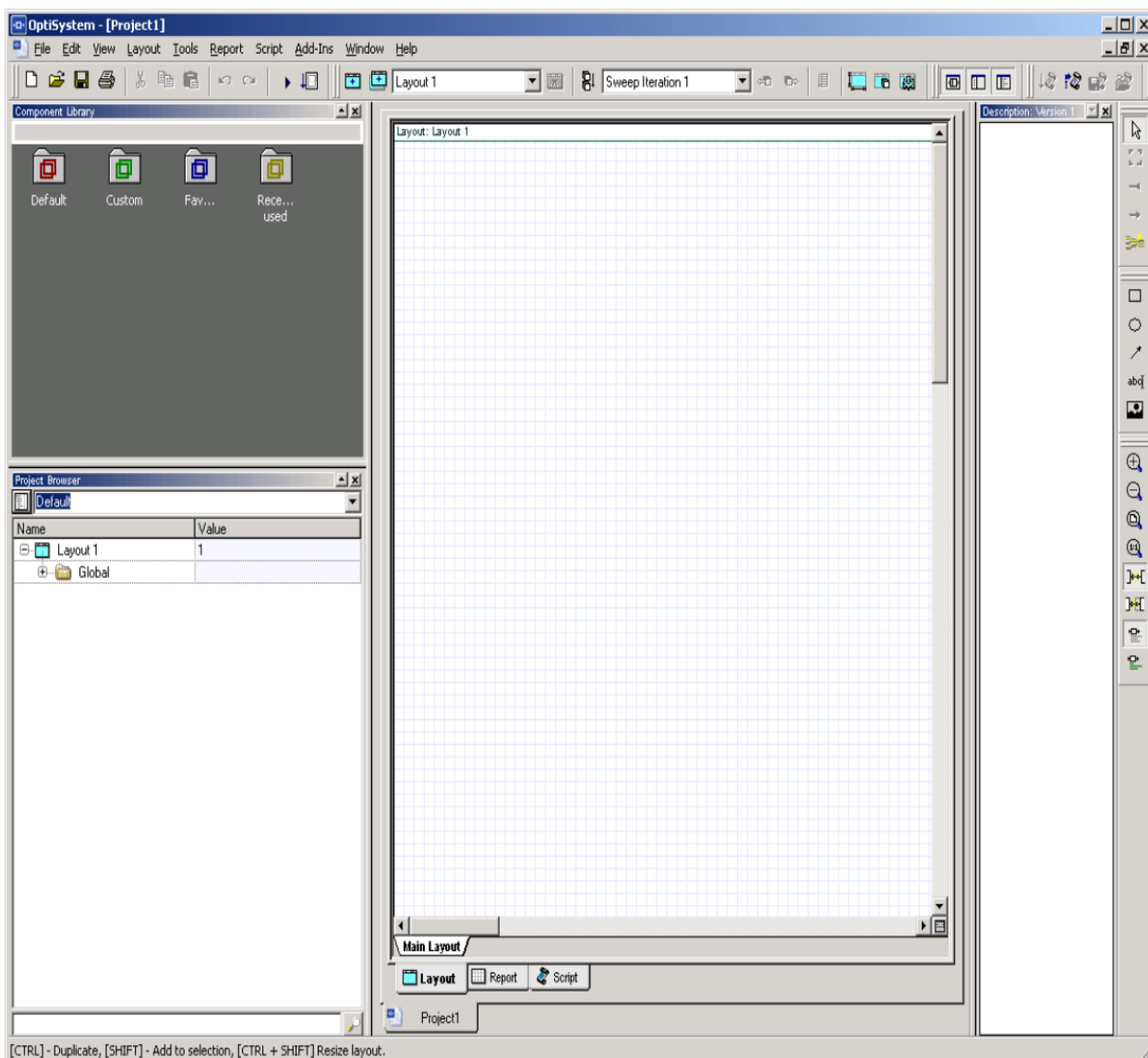
Пайдаланушы өз жобаларын тез және тиімді құруға және өзгертуге мүмкіндік беретін жобаның сол файлы пайдалана отырып, көптеген құрылымдарды жасай алады. OptiSystem жобасының әрбір файлы көптеген дизайн нұсқаларын қамтуы мүмкін. Орындау нұсқалары бір-біріне қарамастан есептеледі және өзгертіледі, алайда есептеу нәтижелері әр түрлі нұсқаларда біріктірілуі мүмкін, бұл конструкцияларды салыстыру жасауға мүмкіндік береді.

Толығымен теңшелетін бет есебі жобада қол жетімді параметрлер мен нәтижелердің кез келген жиынтығын көрсетеді. Алынған есептер өлшеммен және жылжымалы кестелермен, мәтінмен, 2D және 3D кестелермен жабдықталған. Ол сондай-ақ HTML экспорты мен алдын ала пішімделген макеттер үлгілерін қамтиды.

Симуляторда параметрлерді қайта өзгертуден ойнатуға болады. OptiSystem сондай-ақ нәтижені азайту немесе барынша азайту үшін кез келген параметрді оңтайландырады немесе мақсатты нәтижелерді іздеуге болады. Пайдаланушы бірнеше өзгертілетін (sweep) параметрлерді және бірнеше оңтайландыруды біріктіре алады.

Кез келген берілген жүйе топологиясы мен компоненттер спецификациясының сценарийі үшін OptiSystem толық жобалары шифрланып, OptiPerformer-ге экспортталуы мүмкін. OptiPerformer пайдаланушылары кез келген параметрлерді спецификация ауқымында өзгерте алады және толық Графиктер мен есептер арқылы нәтижелерді бақылай алады.

OptiSystem ұсынады кестені талдау шығындарды әзірленген жүйесі, жүйесін ұйымдастыру, макетін немесе компонент. Шығындар туралы деректер басқа қолданбаларға немесе электрондық кестелерге экспортталуы мүмкін.



Сурет 5.8 - OptiSystem бағдарламасының пайдаланушы интерфейсі

Пайдаланушы интерфейсі келесі терезелерді қамтиды:

- Жоба макеті
- Қосылған функциялар
- Күй жолағы
- Мәзір жолы

Жобаның макеті- бұл негізгі жұмыс аймағы, онда компоненттерді белгілеуде, өңдеуде, сонымен қатар компоненттер арасында байланыс жасайды.

Қосылған функциялар өз кезегінде компоненттер кітапханасынан, жоба диспетчерінен және жобаның сипаттамасынан тұрады. Күй жолы OptiSystem пайдалану бойынша пайдалы кеңестерді көрсетеді және жоба макетінің терезесінде орналасады.

Мәзір жолағында OptiSystem қол жетімді элементтер бар. Осы мәзір пункттерінің көпшілігі құралдар тақтасындағы түймелер немесе басқа тізімдер сияқты қол жетімді.

PanWindow шағын қалқымалы терезеде орналасудың жалпы көрінісін көрсетеді. Программамен жұмыс істеу кезінде тіркелетін параметрлердің бірі есептеу уақыты болып табылады. Бұл параметр ЭЕМ өнімділігін және оператордың уақытша шығындарын бағалау үшін маңызды. Сонымен қатар, ол талданатын схеманың салыстырмалы күрделілігін жанама бағалауға мүмкіндік береді.

5.2 OPTISYSTEM интерфейсінің негізгі мүмкіндіктері

5.2.1 Компоненттер кітапханасы

Толық тиімді болу үшін компоненттік Модульдер нақты құрылғының нақты мінез-құлқын және белгілі бір әсерлерді таңдалған дәлдікке және тиімділікке сәйкес ойнатуға қабілетті болуы тиіс. OptiSystem компоненттерінің кітапханасы жүздеген компоненттерді қамтиды, олардың барлығы нақты қосымшалармен салыстырылатын нәтижелерді қамтамасыз ету үшін мұқият тексерілген.

Өлшенетін компоненттер

OptiSystem компоненттерінің кітапханасы нақты құрылғыларда өлшенетін параметрлерді енгізеді. Ол әр түрлі өндірушілердің сынау және өлшеу жабдықтарымен біріктірілген.

5.3 Optiwave бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарымен интеграциялау

OptiSystem интеграцияланған және талшықты оптика үшін Optiwave арнайы бағдарламалық құралдарын OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, WDM_Phase, OptiFiber және OptiSPICE компоненттері деңгейінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Аралас сигналды ұсыну

Оптикалық және электрлік сигналдар үшін сигналдардың аралас форматтарын өңдейді. OptiSystem қажетті модельдеу дәлдігімен және тиімділігімен байланысты тиісті алгоритмдерді қолдана отырып, сигналдарды есептеп шығарады.

Сапа және өнімділік алгоритмдері

Жүйе өнімділігін болжау үшін сандық талдау немесе символаралық интерференциямен және Шуммен шектелген жүйелер үшін жартылай талдау

әдістерін пайдалана отырып, BER және Q-Factor сияқты параметрлерді есептейді.

Кеңейтілген визуализация құралдары

Визуализацияның кеңейтілген құралдары OSA спектрлерін, сигнал чирпаларын, көз диаграммаларын, поляризация жағдайын, шокжұлдыздардың диаграммаларын және т.б. жасайды. Сонымен қатар, сигнал қуатын көрсететін WDM талдау құралдары, күшейту коэффициенті, Шу коэффициенті және арнаға сигнал-шу қатынасы (OSNR) қосылған.

Деректер Мониторы

Жүйе деректерді сақтау және модельдеу аяқталғаннан кейін мониторларды қосу үшін компоненттердің порттарын таңдауға мүмкіндік береді. Бұл қайта есептеусіз үлгілеуден кейін деректерді өңдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, визуализаторлардың еркін санын сол порттағы мониторға қосуға болады.

Кіші жүйелермен иерархиялық-модельдеу

Симуляторды икемді және тиімді ету үшін жүйенің деңгейлерін, кіші жүйелерді және компоненттерді қоса алғанда, абстракцияның түрлі деңгейлерінде модельдерді ұсыну қажет. Сонымен қатар, оптикалық талшықты оптикалық талшықтар мен оптикалық талшықты оптикалық талшықтар үшін арнайы бағдарламалық құрал-жабдықтарды қолдануға мүмкіндік береді.

Теңшелетін компоненттер

Жүйе кіші жүйелер мен пайдаланушы кітапханалардың негізінде жаңа компоненттерді қосуға немесе MATLAB немесе Simulink сияқты бөгде құралмен бірлескен үлгілеуді пайдалануға мүмкіндік береді.

Қуатты сценарий тілі

Симулятор параметрлерге арналған арифметикалық өрнектерді енгізуге және VisualBasic сценарийлерінің стандартты тілін қолдана отырып, компоненттер мен кіші жүйелерді бірлесіп қолдануға болатын жаһандық параметрлерді құруға мүмкіндік береді. Сценарий тілі, сондай-ақ, сценарий бетін пайдалану кезінде есептеулер, макет жасау және пост өңдеу сияқты OptiSystem басқара алады және басқара алады.

Қазіргі деректер ағынын есептеу

Есептеу жоспарлаушысы таңдалған деректер ағыны моделіне сәйкес компоненттік модульдерді орындау тәртібін анықтау арқылы имитацияны басқарады. Деректер ағынының негізгі үлгісі, ол деректер ағынының моделі болып табылады (CIDF). CIDF доменінде орындау уақытын жоспарлау, итерация мен шынайы рекурсияға байланысты қолдау шарттары қолданылады.

Көптеген жобалар

Жобаның бір файлы пайдалана отырып, көптеген жобалар жасау мүмкіндігі бар, бұл сізге өз жобаларын тез және тиімді құруға және түрлендіруге мүмкіндік береді. OptiSystem жобасының әрбір файлы көптеген дизайн нұсқаларын қамтуы мүмкін. Дизайн нұсқалары тәуелсіз есептеледі

және өзгереді, бірақ есептеу нәтижелері әр түрлі нұсқаларда біріктірілуі мүмкін, бұл жобаларды салыстыруға мүмкіндік береді.

Есеп беті

Толық теңшелетін есеп беті жобада қол жетімді кез келген параметрлер мен нәтижелер жиынтығын көрсетеді. Жасалған есептер көлемі бойынша өзгертілетін және тасымалданатын электрондық кестелерге, мәтіндік, 2D және 3D-графиктерге ұйымдастырылған. Ол сондай-ақ алдын ала пішімделген есеп макеттері бар экспорттау мен HTML үлгілерін қамтиды

Параметрлерді ауыстыру және оңтайландыру

Үлгілеуді параметрлерді қайта өзгертумен қайталауға болады. OptiSystem сондай-ақ кез келген нәтижені азайту немесе барынша азайту үшін кез келген параметрді оңтайландыра алады немесе мақсатты нәтижелерді іздеуге болады. Бірнеше рет опцияларды және көптеген оңтайландыру біріктіруге болады.

OptiPerformer Бағдарламасы

Кез келген берілген жүйе топологиясы мен компоненттер спецификациясының сценарийі үшін OptiSystem толық жобасы шифрланып, OptiPerformer-ге экспортталуы мүмкін. OptiPerformer пайдаланушылары кез келген параметрді спецификацияның белгілі бір ауқымдарында өзгерте алады және егжей-тегжейлі Графиктер мен есептер арқылы нәтиже беретін жүйелік әсерлерді бақылай алады.

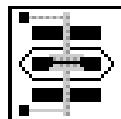
Материалдардың ерекшелігі

Сонымен қатар, жобаланған жүйенің шығындарын талдау кестесін ұсынады, жүйе, жинақтау немесе компонент бойынша реттелген. Шығындар туралы деректерді басқа қолданбаларға немесе электрондық кестелерге экспорттауға болады.

5.4 Модельдеу жүргізу үшін компоненттерді таңдау

Оптикалық модулятордың жұмысын модельдеу үшін қажетті компоненттерді таңдаймыз.

Схеманың негізгі компоненті "Lithium Niobate Mach-Zehnder modulator" блогы болып табылады. Блоктың шартты белгіленуі 5.2-суретте келтірілген.



Сурет 5.9 - Литий ниобаты негізіндегі Модулятор

Бұл компонент литий ниобаты кристалының негізінде құрылған Маха-Цендер модуляторының жұмысын еліктейді. Компонент 5.1-кестеде жинақталған келесі параметрлерге ие

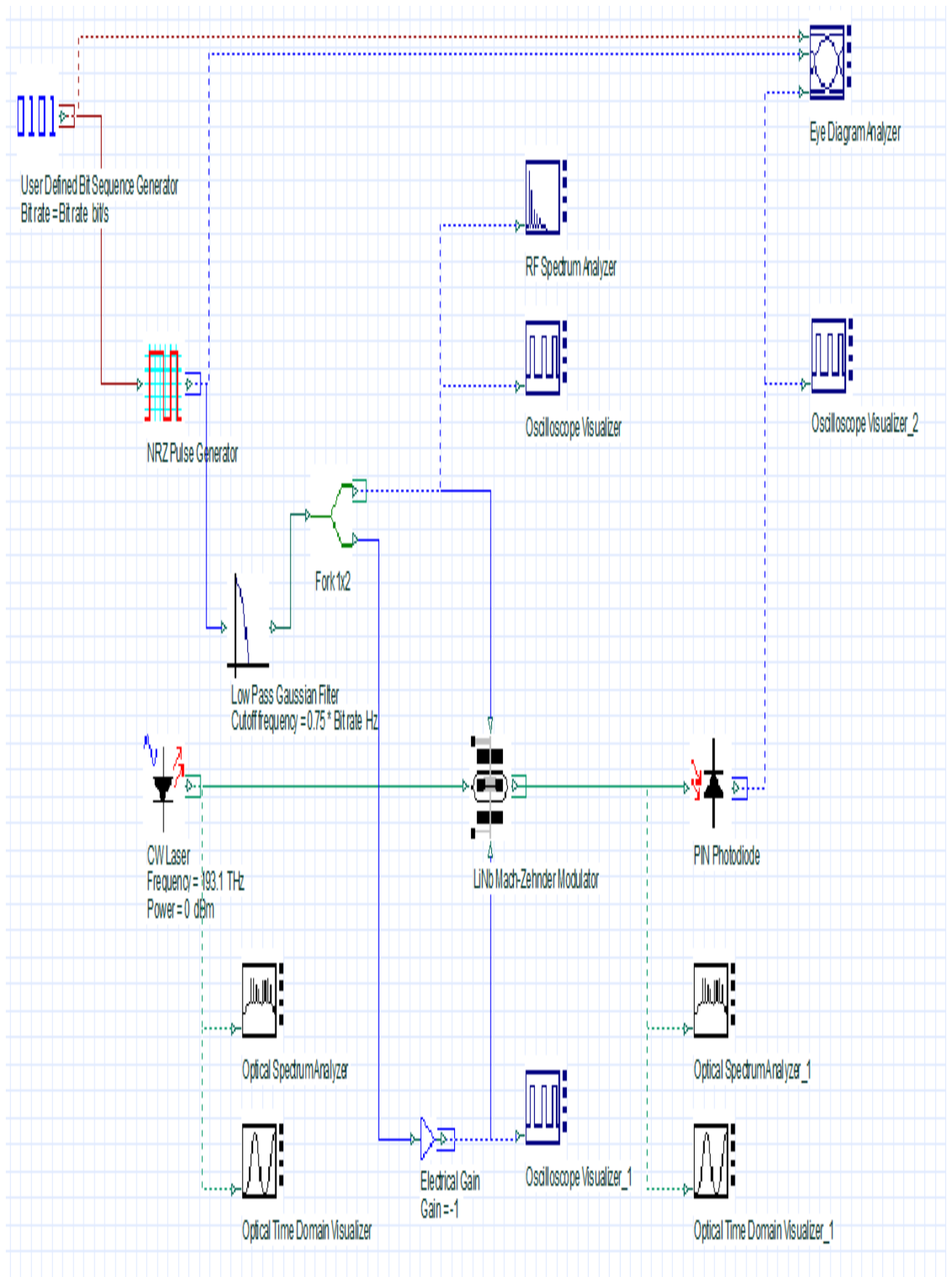
Кесте 5.2 - Модулятор параметрлері

Параметр атауы мен сипаттамасы	Әдепкі мән	Өлшем бірлігі	Мән ауқымы
Өшіру коэффициенті	20	dB	[0,+INF[
Қосу/өшіру ығысу кернеуі	4	V	[0,+INF[
RF модуляциясының кернеуі қосу/өшіру	4	V]-INF,+INF[
1 ығысу кернеулігі	0	V]-INF,+INF[
2 ығысу кернеулігі	4	V]-INF,+INF[
Енгізілетін шығындар	5	dB	[0,+INF[
Кіріс сигналын қалыпқа келтіру (иә / жоқ)	True	—	True, False
1 модуляция кернеуі	0	V]-INF,+INF[
2 модуляция кернеуі	4	V]-INF,+INF[

"User Defined Bit Sequence Generator" биттік тізбегінің генераторы және nrz импульс генераторы "NRZ Pulse Generator" модуляторға түсетін модульдік кернеуді қалыптастырады. Сұлба құрамына өлшеуіш аспаптарды қосу керек: осциллографтар және Спектр анализаторлары. PIN фотодиод оптоэлектронды түрлендіруді орындау үшін қызмет етеді. "Eye Diagram Analyzer" компоненті көз-диаграмманы көрсету үшін қызмет етеді және оптикалық байланыс арнасының сипаттамаларын бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін.

5.5 Оптикалық модулятор жұмысын модельдеу

Таңдалған компоненттерден 5.3 суретте келтірілген сұлба жасалған, ол оптикалық модулятор жұмысын моделдеуді орындауға мүмкіндік береді.



Сурет 5.10 - Модельдеу схемасы

Әзірленген схема литий ниобаты негізінде модулятор жұмысының ерекшеліктерін көрсетуге мүмкіндік береді.

Жұмыс үлгілеуін жүргіземіз және модулятор иығына және модулятор шығысындағы оптикалық импульстердің чирпіне қосылған кернеу арасындағы байланысты көрсетеміз. жоғары жылдамдықты талшықты-оптикалық байланыс жүйелеріндегі маңызды фактор болып табылады, себебі ол рұқсат етілген таратылымға әсер етеді. Литий ниобаты негізіндегі сыртқы модуляторлар ширпіні азайтуға немесе жоюға мүмкіндік береді, өйткені лазерлік көз спектрдің тар енінде, стационарлық режимде ұсталады. Бұл мысалда сыртқы модулятор-бұл LiNbO₃ ұйқы модуляторы. Әзірлеген схемасы чирп талданады өзара байланыста жұмыс кернеуі. Сұлбада екі модульдік кернеулі модулятор орнатылған. Реттеулерде $\Delta V_1 = -\Delta V_2$ мәндері берілген.

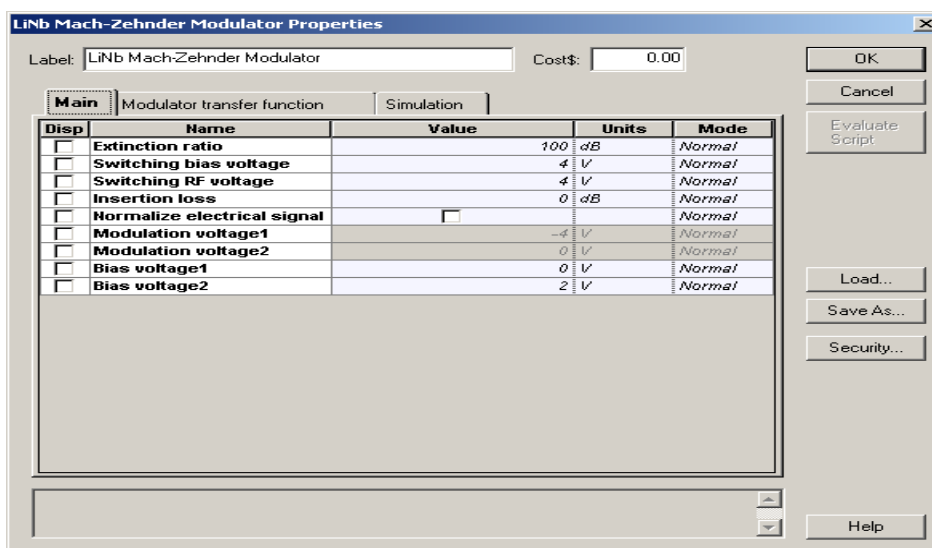
Модулятор шаршы режимде жұмыс істейді. Бұл дегеніміз, жылжу кернеуі модуляторды оптикалық жауап қисығының ортасына орналастырады, және, демек, қарқындылық оның ең жоғарғы мәнінің жартысын құрайды. Экстринкция коэффициенті у-тармағының асимметриялық толқындары тудырған кез келген шырышты болдырмау үшін 100 дБ тең. Модулятор нормаланбаған режимде жұмыс істейді, бұл электрлік кіріс сигналы нормаланбайды дегенді білдіреді.

Модулятор екі жетекті модулятор және геометриясы бар, ол екі иық үшін мүлдем бірдей. Чирпингті қоса берілген кернеу тұрғысынан білдіруге болады:

$$\alpha = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \quad (5.1)$$

мұндағы v_1 және V_2 - тиісінше 1 және 2 иықтарына қоса берілген кернеу.

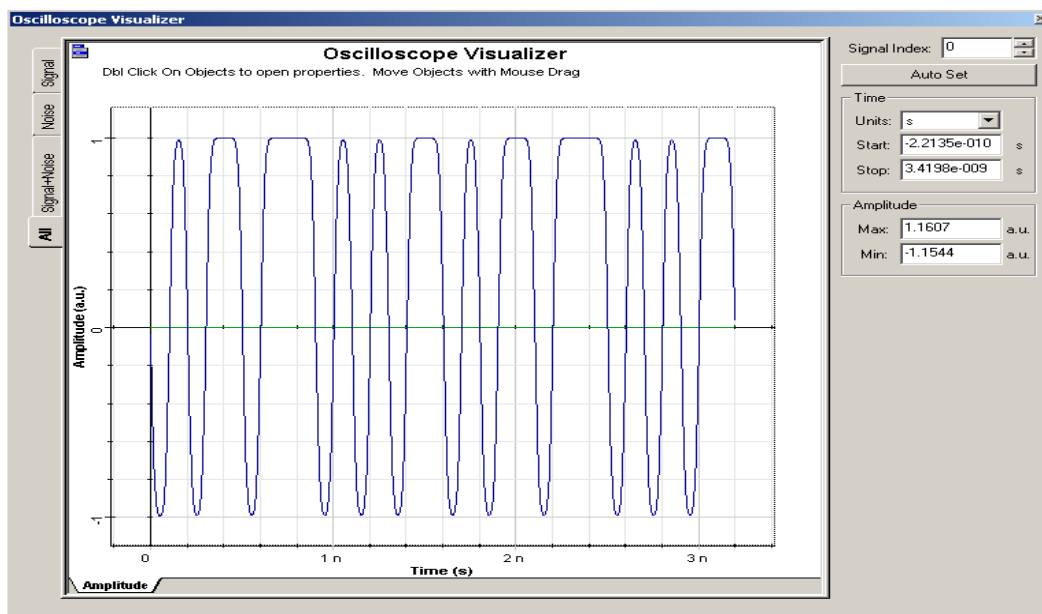
Суретте модулятор параметрлері бар терезе келтірілген.



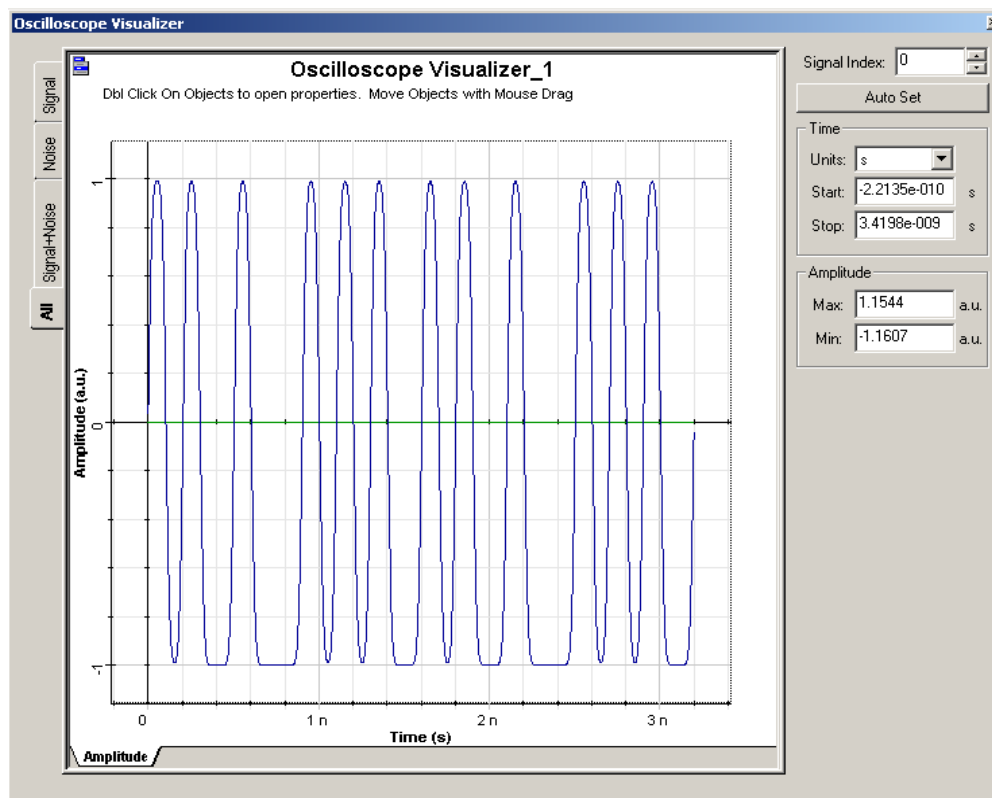
Сурет 5.11 - Модельдеуді жүргізу кезінде модуляторды баптау

Модулятордағы нөлдік чирпке жету үшін иықтарға қосылған кернеу модуль бойынша тең болуы қажет, яғни $V1 = -V2$.

5.12 және 5.13-суреттерде модулятордың кіруіне қоса берілген модуляциялаушы кернеудің уақытша диаграммалары келтірілген.



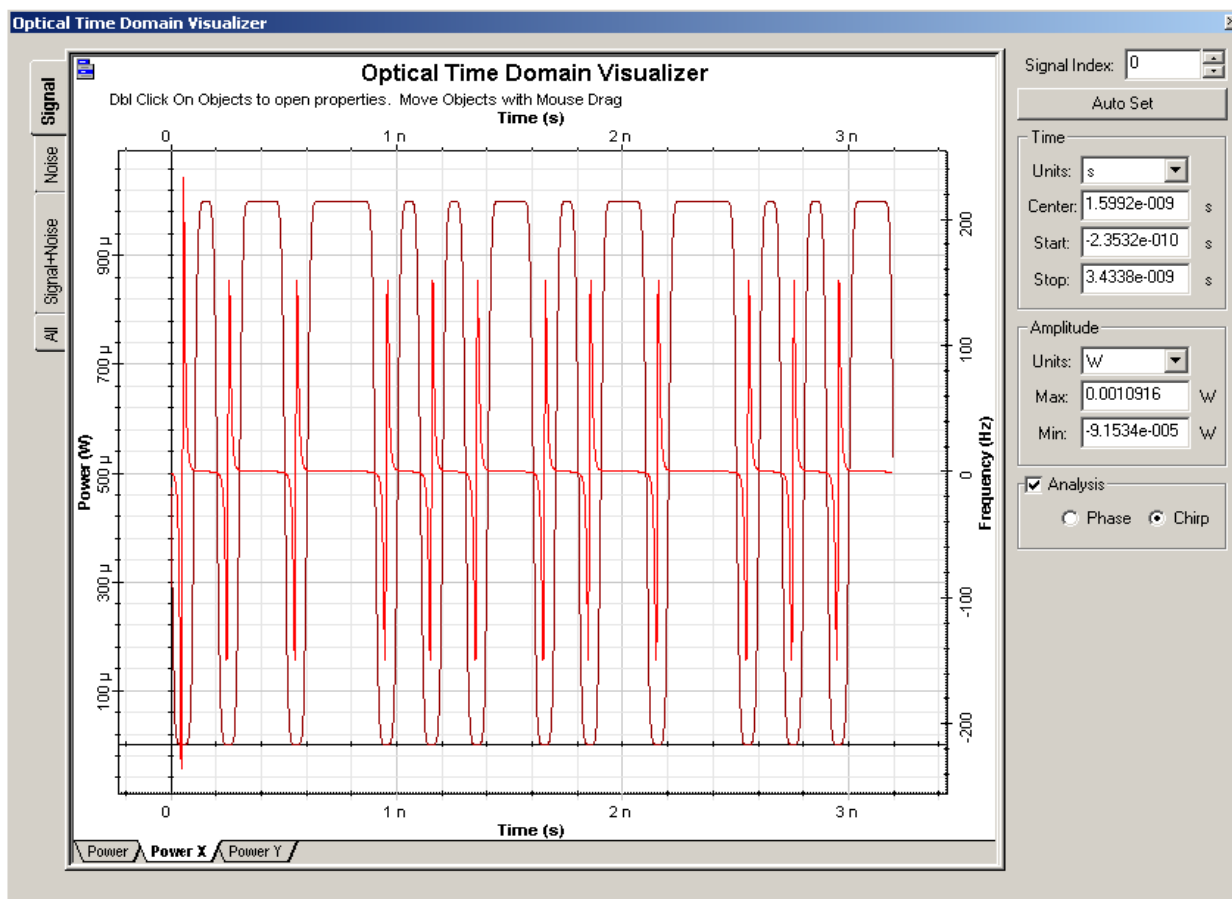
Сурет 5.12 - Кіріс кернеуінің тәуелділігі 2



Сурет 5.13 - Кіріс кернеуінің тәуелділігі 3

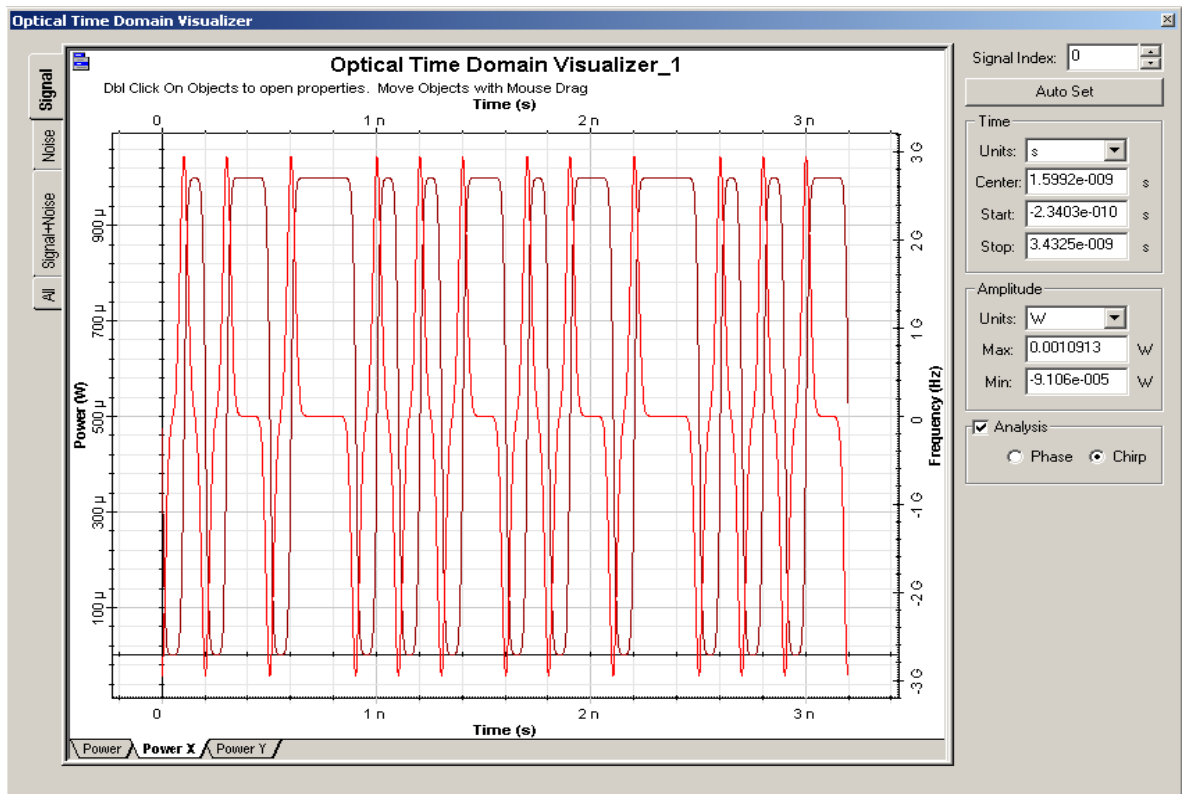
Берілген суреттерден кернеу амплитудасына тең және фазаға қарама-қарсы. Фазаға қарсы кернеуді қалыптастыру үшін модельдеу схемасына инвертер (Electrical Gain) орнатылған.

Осы кернеудің Шығыс (промодулированный) оптикалық сигналы 4.14 суретте келтірілген.

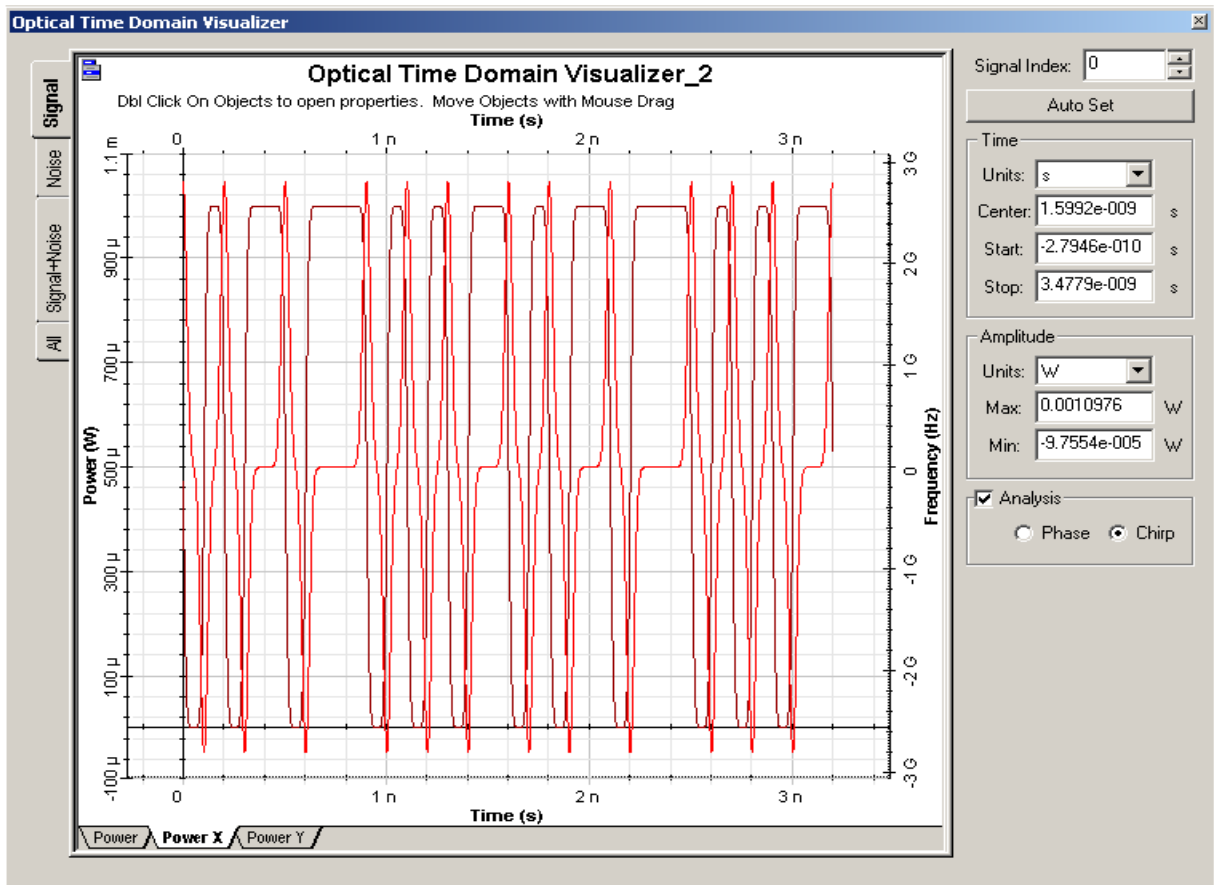


Сурет 5.14 - Модуляцияланған оптикалық сигнал

Оптикалық сигналдың амплитудасы 0-ден 1 мВт-ға дейін өзгереді. Чирпа амплитудасы шамамен 100 Гц құрайды (оны оның кішігірім мәнінен нөлдік деп санауға болады). Кернеудің өзгеруімен чирп мәніндегі айырмашылықты көрсету үшін, шекті кернеу $\alpha = 0,5$ алу үшін $v_{1pp} = 3,0$ В, $V_{2pp} = 1,0$ В тең болады. 5.15 суретте өзгертілген жағдайда электр кіріс сигналдары көрсетілген.



Сурет 5.15 - Өзгертілген жағдайда электр кіріс сигналдары



Сурет 5.16 - Оптикалық сигнал және чирп өзгерту

Оптикалық сигнал бірдей болып көрінеді, бірақ сигналдағы чирп 4.16 суретте көрсетілгеннен әлдеқайда көп. Чирп амплитудасы - 3 ГГц.

$V_{1pp} = 1.0 \text{ V}$, $V_{2pp} = 3.0 \text{ V}$ кернеулердің өзгеруі кезінде және $\alpha = -0,5$ мәні оптикалық сигнал нысаны және тирап мәні 5.9 суретте келтірілген.

5.14, 5.15 және 5.16- суреттерде келтірілген модельдеу нәтижелерін талдай отырып, Маха-Цендер модуляторының иықтарындағы кернеуді өзгерте отырып, Шығыс оптикалық сигналдың чирп мәнін бақылауға болады деген қорытынды жасауға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыс барысында кристалдардың оптикалық және электр-оптикалық қасиеттеріне негізделген талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінің компоненттері қарастырылды. Оптикалық материалдардың жіктелуі келтірілген, кристалды материалдарға ерекше көңіл бөлінген. Байланыс жүйелері үшін оптикалық компоненттер саласындағы қазіргі жағдай мен перспективалар талданды. OptiSystem бағдарламасын қолдана отырып, литий ниобаты негізінде модулятордың жұмысын компьютерлік моделдеу жүргізілді. Жұмыс нәтижелері байланыс желілерін құру, талшықты-оптикалық байланыс жүйелерін талдау және жобалау үшін компоненттерді таңдау кезінде, оқу процесінде кристалдарда және олардың негізінде құрылғыларда оптикалық құбылыстарды зерделеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Лебедев В.В., Ильичев И.В., Агрузов П.М., Шамрай А.В. Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т.40. № 17. С. 39–46.

2 Петров А.Н., Тронеv А.В., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Величко Е.Н., Шамрай А.В. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 131–136.

3 Petrov A., Il'ichev I., Agruzov P., Lebedev V., Velichko E., Shamray A. Influence of external electrooptical modulator biasing on gain and nonlinear distortions in analog fiber-optic links // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 541. № 1. P. 12047.

4 Petrov A., Tronev A.V., Lebedev V., Il'ichev I.V., Velichko E., Shamray A. High dynamic extinction ratio and pulse modulation of optical signals // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 643. № 1. P. 12038.

5 Лебедев В.В., Ильичев И.В., Каретко В.С., Шамрай А.В. Анализ конфигурации интегрально-оптического СВЧ модулятора // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 2016. С. 352–356.

6 Lebedev V., Tronev A., Petrov A., Agruzov P., Il'ichev I., Shamray A. Generation of high extinction optical pulses by means of LiNbO₃ Mach-Zehnder modulators // 2016 International Conference Laser Optics (LO), 2016. P. R8-49-R8-49.

7 Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика [Текст] / Пер. с англ. Под ред. П.В.Мамышева; - М.: Мир, 1996. - 324 с.

8 Алексеев, Е.Б., Попов, А.Г., Попов, В.И. Волоконно-оптический коммутатор на интерферометрах Маха-Цендера [Текст] / Е.Б. Алексеев, А.Г. Попов, В.И. Попов // Телекоммуникации и транспорт. - 2011. - №8. - С.9-14.

9 Андреев, В.А., Бурдин, В.А., Попов, В.Б. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для вузов [Текст] / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, В.Б. Попов; - М.: Радио и связь, 1995. - 200с.

10 Андреев, В.А., Бурдин, В.А., Попов, В.Б., Польшников, А.И. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для вузов / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, В.Б. Попов А.И. Польшников; - М.: Радио и связь, 1996. - 200с.

11 Айхлер, Ю., Айхлер Г. И. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г. И. Айхлер; - М.: Техносфера, 2008. - 438с.

12 Бейли, Д., Райт, Э. Волоконная оптика. Теория и практика [Текст] / Д. Бейли, Э. Райт; - М.: Кудиц-Образ, 2006. — 320 с.

13 Борисенко, В.Е., Воробьева, А.И., Уткина, Е.А. Наноэлектроника [Текст] / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А. Уткина; - М.: «Бином», 2009. - 223 с.

14 Величко, М.А., Наний, О.Е., Сусьян, А.А. Новые форматы модуляции

в оптических системах связи [Текст] / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян; LIGHTWAVE Russian Edition, №4. - 2005. - С.21-30.

15 Вербовецкий, А.А. Основы проектирования цифровых опто-электронных систем связи [Текст] / А.А. Вербовецкий; - М.: Радио и связь, 2000. - 159 с.

16 Верещагин И.К., Кокин С.М., Никитенко В.А., Селезнев В.А., Серов Е.А. Физика твердого тела [Текст] / И.К. Верещагин, С.М. Кокин, В.А. Никитенко, В.А. Селезнев, Е.А. Серов; – М.: Высшая школа, 2001. - 236с.

17 Власов, Н.А. Нейтроны [Текст] / Н.А. Власов – М.: Наука, 1975. -426 с.

18 Гаврилов, С.А., Белов, А.Н. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники [Текст] / С.А. Гаврилов, А.Н. Белов; - М.: Высшее Образование, 2009. - 272 с.

19 Гаскевич, Е., Убайдулаев, Р. "PON-широкополосная мультисервисная сеть доступа" [Текст] / Е. Гаскевич, Р. Убайдулаев // ТелеМультиМедиа. - 2002.-№2(12), - С.29-32.

20 Гауэр, Дж. Оптические системы связи [Текст] / Пер. с англ. под ред. А.И. Ларкина; - М.: Радио и связь, 1989. — 504 с.

21 Герасименко, Н.Н., Пархоменко, Ю.Н. Кремний - материал нанoeлектроники [Текст] / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко - М.: Техносфера, 2007. - 352 с.

22 Гончаров, В.Л., Липская, М.А. Техническая эксплуатация ВОЛС [Текст] / В.Л. Гончаров, М.А. Липская; - Алматы: КазАТК, 2012. - 158 с.

23 Гочжун Цао, Ин Ван. Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение [Текст] / Пер. с англ./ Под ред. В.Б. Зайцев. - М.: Научный мир, 2012. -515 с.

24 Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев; - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 416 с.

25 Данилина, Т.И., Кагадей, В.А., Анищенко, Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники. Учебное пособие [Текст] / Т.И. Данилина, В.А. Кагадей, Е.В. Анищенко; - Т.: В-Спектр, 2011. - 263 с.

26 Дмитриев, А.Л. Полупроводниковые источники света для систем передачи и обработки информации [Текст] / А.Л. Дмитриев. - Учебное пособие. -СПб: СПбГУИТМО, 2006. - 48 с.

27 Дмитриева, С.А., Слепов, Н.Н. Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы. [Текст] / Под. ред. С.А. Дмитриева, Н.Н. Слепова; - М.: АО "ВОТ", Изд-во Connect, 2000. - 376 с.

29 Журавлева, Л.М., Бухалкин, М.Ю., Кручинин, А.С., Новожилов, А.В. Современные технологии в волоконно-оптических системах связи [Текст] / Л.М. Журавлева, М.Ю. Бухалкин, А.С. Кручинин, А.В. Новожилов // Проектирование и технология электронных средств. - 2008. - №4.- С. 5-12.

30 Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Текст] / О.К. Скляр; – М.: Солон-Пресс, 2004.- 261с.

31 Скляр, О.К. Современные волоконно-оптические системы

- передачи/ О.К. Складов; - М.:Салон-Р, 2001. - 237с.
- 32 Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов; – М.: Радио и связь, 2000. - 468с.
- 33 Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (АТМ, РDН, SDН, SONET и WDM) [Текст] / Н.Н.Слепов; - М.: "Радио и связь", 2-е исправленное изд., 2003. - 468 с.
- 34 Слепов, Н.Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы [Текст] / Н.Н.Слепов; - М.: Электроника: НТБ., 2000. - №6 - С.6-10.
- 35 Смирнов, И.Г. Структурированные кабельные системы [Текст] / И.Г. Смирнов; - М.: Эко-Трендз, 1998. - 179 с.
- 36 Смирнов, Л.С., Соловьев, С.П., Стась, В.Ф., Харченко, В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций [Текст] / Л.С. Смирнов, С.П. Соловьев, В.Ф. Стась, В.А. Харченко; - Новосибирск.:Наука, 1981. - 182 с.
- 37 Снайдер, А., Лав, Дж. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав; - М.: «Радио и связь», 1987. - 655 с.
- 38 Строшио, М., Дутта, М. Фононы в наноструктурах / М. Строшио, М. Дутта; - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 320 с.
- 39 Строшио, М., Дута, М. Фононы в наноструктурах / М. Строшио, М. Дута; - М.: Физматлит 2-е издание, 2008.- 319 с.
- 40 Убайдулаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдулаев; - М.: Эко-Трендз, 2-е стереотипное изд. 2002. - 269 с.
- 41 Фостер, Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности / Л.Фостер; - М.: Техносфера, 2008 г. - 352 с.
- 42 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р.Фриман; - М.: Техносфера, 2006. - 495 с.
- 43 Чаплыгин, Ю.А. Нанотехнологии в электронике / Под ред. Ю.А. Чаплыгина; - М.: Техносфера, 2005. - 446с.
- 44 Шлимак, И.С. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложение / И.С.Шлимак // Физика твердого тела, 1999. Т. 41, вып.5.- С.794-798.
- 45 Шмалько, А.В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения / А.В. Шмалько; - М.: Эко-Трендз, 2001. - 283 с.
- 46 Щука, А.А. Наноэлектроника [Текст] / А.А. Щука; –М.: Физматкнига, 2007. - 463с.
- 47 Cardona, M., Thewalt, M.L.W. Isotope effect on optical spectra of semiconductor / M. Cardona, M.L.W. Thewalt // Rev. Mod. Phys. 77, October 2005. - P. 1173-1224. ITU-T Recommendation G.651. Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical.