

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ  
ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Сабырбаев Арнұр Құдайбергенұлы

«Қабылдағыш модульдерді талдау»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы

Алматы 2024

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ  
ЭТ ж ҒТ кафедра меңгерушісі

техн.ғыл.кан

Е.Таштай

« 30 » 05 2024 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Қабылдағыш модульдерді талдау»

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы

Орындаған:

*Sat*

А.К.Сабырбаев

Рецензент:

«Сайман Корпорациясы» ЖШС өндіріс  
жөніндегі директор орынбасары

Алиев А.С.

2024 ж.



Ғылыми жетекші

Экон.ғыл.кандидаты,  
ассоц. профессор

А.Е.Куттыбаева

« 27 » 05 2024 ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы

**БЕКІТЕМІН**  
ЭТ ж ҒТ кафедра меңгерушісі  
техн.ғыл.канд.  
Е.Таштай  
«30» 2024 ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Сабырбаев Арнұр Құдайбергелұлы

Тақырыбы: «Қабылдағыш модульдерді талдау».

Университет ректорының «4» желтоқсан 2023ж. №548 П/Ө бұйрығымен  
бекітілген

Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» сәуір 2023ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері:

1. ГОСТ Р ISO 11551-2015 Оптоэлектрондық және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Оптрондар. Таратылатын оптоэлектрондық модульдер.

2. ГОСТ 15114-78.

3. ГОСТ Р ISO 13694-2010 мәтіні Оптика және оптикалық құрылғылар. Жарық шығарғыш диодтар, лазерлік диодтар.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

- Мах-Цендер интерферометрі. Оптоэлектрондық құрылғылар түрлері.
- Таратылған брэгг шағылыстырғышы бар лазерлік диодтар.
- Қабылдау оптоэлектрондық модульдер.
- Лазерлік модульдер конструкциясын зерттеу.

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

- в) Қабылдау оптоэлектрондық модульдер.
  - г) Лазерлік модульдер конструкциясын зерттеу.
- Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

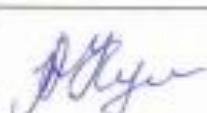
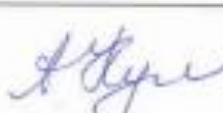

- 1.С.В.Коньшин, Б.Б.Агатаева, Оптические системы связи, Учебное пособие. Алматы 2018
- 2.[https://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/0/article\\_844\\_527.pdf](https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_844_527.pdf).
- 3.<https://avrobot.ru/index.php?cat=337>.
- 4.Дураев В.П. Источники оптического излучения. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2010, с. 73–92.
5. Слепов Н.Н. Оптические усилители. – В кн.: Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы: Сб. статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд. Connect, 2019, с. 97–116..

Дипломдық жұмысты дайындау  
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Оптоэлектрондық модульдер	1.02.2024 - 21.02.2024	Орындалды
Біржиілікті лазерлік диод	21.02.2024 - 01.03.2024	Орындалды
Қабылдағыш оптоэлектрондық модульдер конструкциясы	01.03.2024 - 14.05.2024	Орындалды


Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған

Қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Теориялық бөлім	Э.ғ.к., ЭтжҒТ каф қауымдастырылған профессоры Куттыбаева А.Е.	27.05.2024 ж.	
Есептеу бөлімі	Э.ғ.к., ЭтжҒТ каф қауымдастырылған профессоры Куттыбаева А.Е.	27.05.2024 ж.	
Норма бақылау	Техн.ғыл.магистры, ассистент П.Ақылжан	27.05.2024 ж.	

Ғылыми жетекшісі  А.Е.Куттыбаева

(қолы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  А.К.Сабырбаев

(қолы)

Күні «27» 05 2024 ж.

## АНДАТПА

Жұмыста 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 работе 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 электрооптического модулятора на характеристики оптической сигнальной сети.

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

## ANNOTATION

This work 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 electrooptical 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 Қабылдағыш модульдердің түрлері	9
1.1 Фотодетекторлар	9
1.2 Фоторезисторлар	9
1.3 Фотодиодтар	10
1.4 Фотодиодтардың шуы	13
1.5 Көшкін фотодиодтары	14
1.6 Фототранзисторлар	15
2 UFRM-100 әмбебап Фото қабылдау модулі	16
2.1 Циркуляторлар	17
3 Белсенді оптикалық модульдер	21
3.1 Акустооптикалық модуляторлар	21
3.2 Электр оптикалық модуляторлар	22
4 Литий ниобаты негізіндегі Мах-цендер электр оптикалық амплитудалық модуляторлары	27
4.1 Оптикалық компоненттерді модельдеу	33
4.2 OPTISYSTEM интерфейсінің негізгі мүмкіндіктері	36
4.3 Optiwave бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарымен интеграциялау	36
4.4 Модельдеу жүргізу үшін компоненттерді таңдау	38
4.5 Оптикалық модулятор жұмысын модельдеу	39
Қорытынды	
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	

## КІРІСПЕ

Дамыған елдерде талшықты-оптикалық байланыс басқа байланыс құралдарының арасында жетекші орынға ие болды. Оның айрықша ерекшелігі-сымды электр байланысы мен радиобайланыспен салыстырғанда ақпаратты берудің едәуір жоғары жылдамдығы және сенімділігі жоғары. Дәл осы қасиеттерсоңғы 10-15 жыл ішінде талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінің қарқындыдамуына себеп болды. Қазіргі уақытта әлемде 100 млн. км-ден астам осындай байланыс желілері салынды. Сонымен қатар, барлық континенттер су астындағыталшықты-оптикалық байланыс желілерімен байланысқан, олардың жалпы ұзындығы 300 мың км-ден асады. Бұл жүйелер ақпаратты берудің жаңа принциптерін - оптикалық солитондар мен спектрлік арналарды бөлуді, сондай- ақ жаңа материалдар мен заманауи технологияларға негізделген түбегейлі жаңа элементтер базасын қолданады.

Жаңа буын ақпарат беру жүйелерінің дамуы, ең алдымен, экономиканың қажеттіліктерінен туындайды. Ұлттық жалпы өнімнің жартысын ұлғайту үшін берілетін ақпарат көлемінің 4 есе ұлғаюын қамтамасыз ету қажет екені белгілі.

Әлемдегі талшықты-оптикалық байланыс жүйелерін дамытудың бүгінгі кезеңі ТОВЖ өткізу қабілетін арттыруда елеулі секіріс жасауға мүмкіндік берген элементтік база саласындағы елеулі технологиялық серпіліспен сипатталады. Күн тәртібінде өткізу қабілеті 1 Тбит/с және одан жоғары ТОВЖ практикалық енгізу туралы мәселе тұр.

Жоғары жылдамдықты талшықты-оптикалық желілердің маңызды элементтері тарату және қабылдау модульдері, модуляторлар, кең жолақты оптикалық күшейткіштер, дисперсиялық компенсаторлар, демультимплексорлар және қосқыштар болып табылады.

Жоғары жылдамдықты ТОВЖ үшін жоғары сапалы сәулелену көздері мен фотодетекторларды құру технологиясындағы жетістіктер байланыс желілерінің пайдаланушылары мен операторларының барлық заманауи қажеттіліктерін кең ауқымда қанағаттандыруға мүмкіндік берді.

Толқын ұзындығы бойынша қайта реттелетін жартылай өткізгіш лазерлер спектрлік арналарды бөлетін перспективалы ТОВЖ-да ең кең қолдануды таба алады. Бұл құрылғыларға спектрлік өнімділіктің тұрақтылығына қатаң талаптарқойылады. Әзірлеушілердің негізгі күш-жігері қазіргі уақытта басқа оптикалық талшықтарды пайдалануды немесе арналарды уақытша тығыздау кезінде берілужылдамдығын арттыруды талап ететін өткізу қабілеттілігін арттыруды талап ететін басқа түрлермен салыстырғанда арналарды спектрлік бөлумен ТОВЖ-ның жоғары бәсекеге қабілеттілігін қамтамасыз ету мақсатында осы құрылғылардың құнын төмендетуге бағытталған.



# 1 Қабылдағыш модульдердің түрлері

## 1.1 Фотодетекторлар

Фотодетекторлар - оптикалық сәулеленуді тіркейтін және фотодетектордың шығысындағы электр сигналына кіретін оптикалық сигналды түрлендіретін жартылай өткізгіш құрылғылар.

Фотодетектор термині эквивалентті фотодетектор терминіне де, оптикалық сәулелену қабылдағышына да сәйкес келеді.

Фотодетекторлардың негізгі міндеті тіркеу болғандықтан, фотодетектордың негізгі сипаттамаларын сипаттайтын статикалық сипаттамалар жиынтығы бар. Егер фотодетектордың шығысында тіркелген сигнал кернеу болса, онда вольт сезімталдығы ұғымы енгізіледі, бұл фотодетектордың шығуында вольт кернеуі қанша өзгеретінін көрсетеді, түсетін сәулелік ағынның ватт бірлігі өзгерген кезде

Егер фотодетектордың шығуында ток өзгерсе, онда фотодетектор сі ток сезімталдығымен сипатталады. Ток сезімталдығы-түсетін оптикалық сәулеленудің IP қуатының бір реттік өзгеруімен фотодетектор тізбегінде тіркелген I токтың өзгеруін сипаттайтын шама:

Фотодетекторда әрдайым қабылдағыштың микропараметрлерінің ауытқуымен байланысты хаотикалық сигнал болады. Бұл сигнал шу кернеуінің орташа квадраттық мәнімен сипатталады.

Фотодетекторда шу кернеуінің болуы сыртқы сигналды тіркеудің физикалық шекарасы болып табылады. Бұл әсерді сипаттайтын Параметр шекті сезімталдық деп аталады. Шекті сезімталдық

- бұл РМ оптикалық сәулеленудің минималды энергиясы, ол фотоқабылдағыштың шығуында шуға берілген қатынаста (m) сигналды тудырады.

## 1.2 Фоторезисторлар

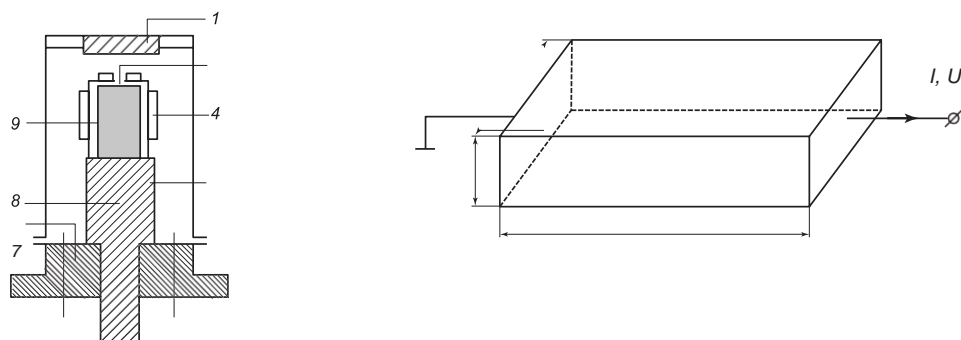
Біртекті жартылай өткізгіште генерациялау кезінде, мысалы, өткізгіштіктің n-типі, электронды тесік жұптары өзінің сіңіру жолағында жарықтандырылған кезде негізгі  $n_{p0}$  және негізгі емес  $p_{n0}$  тасымалдаушыларының концентрациясы өзгереді. Егер негізгі  $N_{n0}$  тасымалдаушыларының концентрациясының өзгеруі олардың бастапқы  $n_{p0}$  концентрациясымен салыстырылатын болса, онда негізгі тасымалдаушылардың жалпы концентрациясы  $NN = N_{n0} + n_{p0}$  артады, демек, меншікті өткізгіштік шамасы да артады. Егер негізгі тасымалдаушылардың концентрациясының жоғарылауы стационарлық концентрациядан едәуір көп болса, онда жалпы өткізгіштік тек фотоөткізгіштікпен анықталады.

Бұл физикалық құбылыс фоторезисторлардың жұмыс принципінің

негізінде жатыр. Оптикалық сәулеленудің әсерінен электр кедергісін өзгертетін жартылай өткізгішті резисторлар фоторезисторлар деп аталады. Фоторезисторлар әлсіз жарық ағындарын тіркеуге арналғандықтан, пайдалы сигналдың мәні көбінесе Шу тогымен салыстырылады. Осыған байланысты фоторезисторлар үшін шуды азайту үшін фоторезисторды салқындатуға мүмкіндік беретін арнайы конструкциялар қолданылады. Суретте

Термоэлектрлік салқындатумен осындай дизайн берілген.

Фоторезисторлардың негізгі сипаттамаларын қарастырыңыз. 1.1-суретте қарастырылып отырған фоторезисторлардың топологиясы және оларды жарықтандырудың геометриясы көрсетілген. Алдыңғы бөлімде жазылғандай, фоторезистордың негізгі сипаттамаларының бірі- сі ток сезімталдығы.



1.1 - сурет – Фоторезисторлар

- а) фоторезистордың дизайны: 1 – кіріс терезе; 2 – фотосезімтал элемент; 3 – істікшелі қалып; 4 – алдын ала күшейткіш; 5 – жылу таратқыш; 6 – Электр терминалдары; 7-негіз; 8-терморезистор; 9-термоэлектрлік салқындатқыш; б)ток сезімталдығын есептеу үшін фоторезистордың топологиясы

Тең емес тасымалдағыштардың концентрациясының өзгеруінебайланысты жарықтандыру кезінде резистордың меншікті Фотоөткізгіштігінің өзгеруі арақатынаспен сипатталады

### 1.3 Фотодиодтар

Жалпы мәліметтер. Ні энергиясы бар жарық кванты жартылай өткізгіште өзінің сіңіру жолағына түскенде, тепе – тең емес тасымалдаушылар жұбы пайда болады- электрон және тесік. Электр сигналын тіркеу кезінде тасымалдаушы концентрациясының өзгеруін тіркеу қажет. Әлбетте, бәрі тең болған жағдайда, негізгі емес тасымалдаушылардың концентрациясының өзгеруін тіркеу оңайырақ.

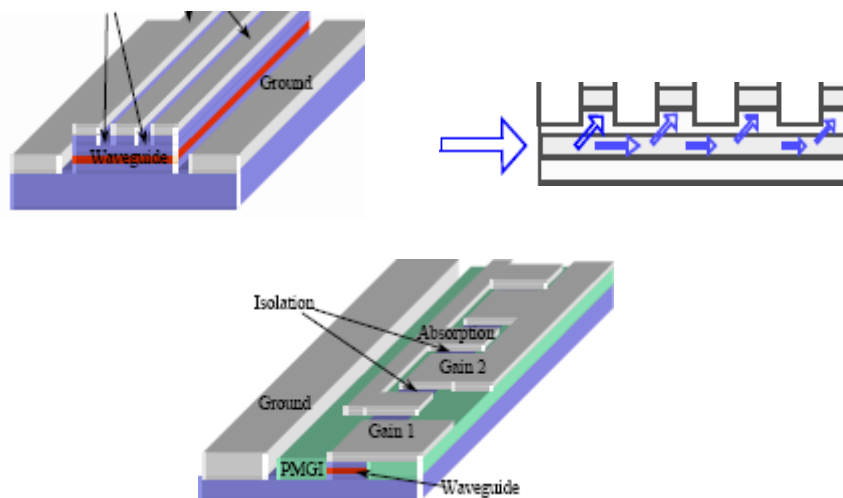
Мәселен, мысалы,  $10^{14}$  легирленген концентрациясы бар n-GaAs–да Негізгі электронды тасымалдаушылардың концентрациясы  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, ал негізгі

емес тесік тасымалдаушылардың концентрациясы 1 см – 3 құрайды. Сондықтан, егер оптикалық сіңіру кезінде GaAs негізіндегі фотодетекторда 1010 тепе-тең емес тасымалдаушы пайда болса, онда негізгі емес тасымалдаушылардың концентрациясының өзгеруін тіркеу оңайырақ. Фотоқабылдағыш құрылғыларда, әдетте, негізгі емес заряд тасымалдаушыларды тіркеу принципі қолданылады. Ең көп таралған фотодетекторлар диодтық құрылымдар негізінде жүзеге асырылады. Олардың ішінде P-N түйіспелеріне, Шоттки кедергілеріне және гетеро түйіспелеріне негізделген фотодиодтар бар. Төменде, 5.6 - суретте ең көп таралған фотодиодтардың дизайны келтірілген.

Ең көп таралған фотодиодтардың дизайны

а) p-n ауысу негізіндегі фотодиод, б) p-i-n фотодиод,  
 в) Шоттки тосқауылына негізделген фотодиод; г) көшкінді көбейту арқылы p-n ауысу негізінде фотодиод, д) p-i-n гетероқұрылымына негізделген фотодиод

P-n түйіспелеріне негізделген фотодиодтар оптикалық сәулелену нәтижесінде пайда болған негізгі емес тепе-теңдік емес тасымалдаушылардың электронды-тесік түйісу шекарасында бөлу әсерін пайдаланады. Схемалық түрде фотодиод 1.2-суретте көрсетілген.

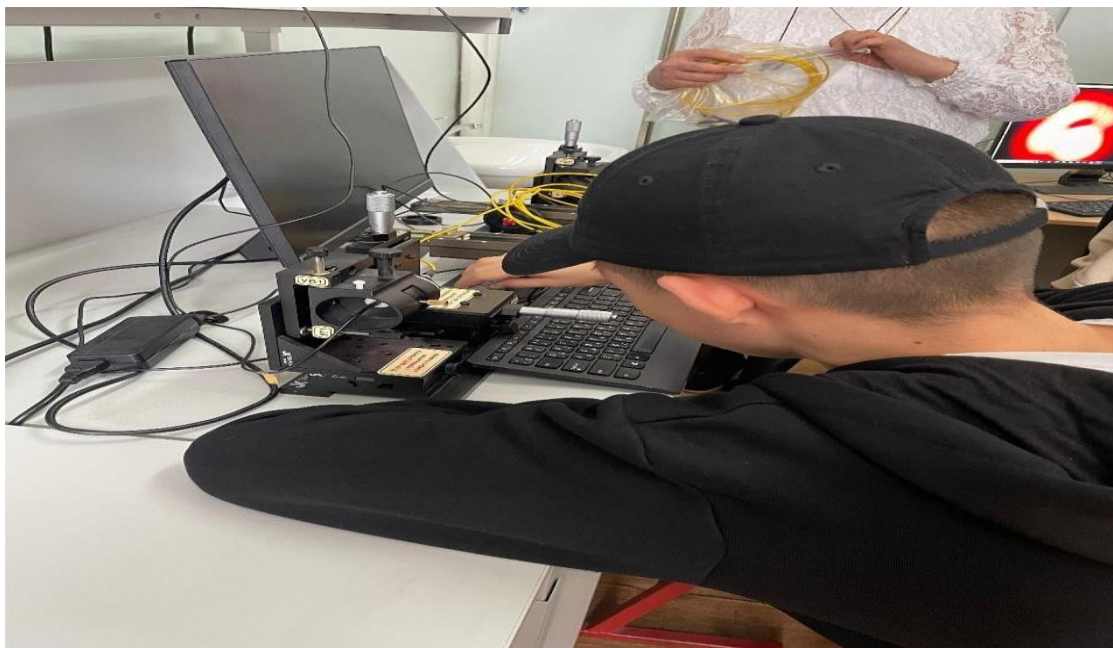


1.2 - сурет – Фотодиодтар а) TWPD құрылымы;  
 б) P-TWPD периодтық құрылымды; в) P-TWPD құрылымы

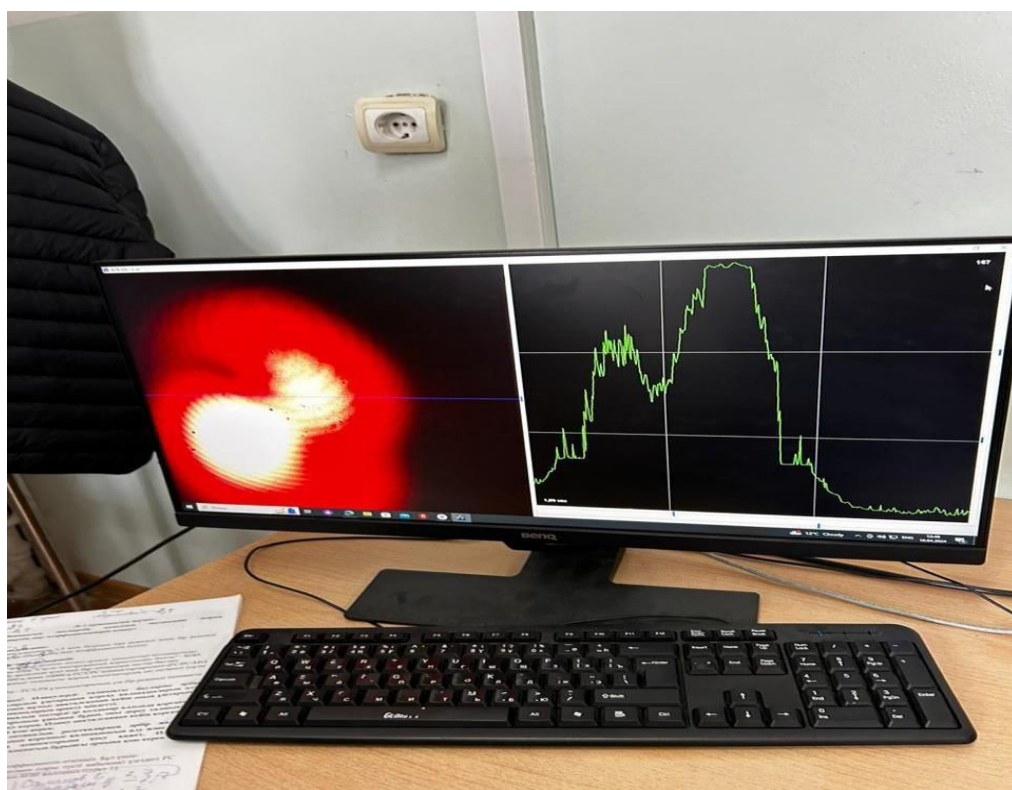
Фотодиодтың вольт-амперлік сипаттамасы келтірілген. P-n түйісуінің кері тогы токтың дрейфтік компоненттеріне байланысты және мұндағы  $p_0$  және  $n_0$  — негізгі емес медианың концентрациясы. Негізгі емес тасымалдаушылардың концентрациясының өзгеруі фототоктың өзгеруіне әкеледі. Фотодиодтың керімешысуындағы фототок шамасы қатынаспен көрсетіледі.

261 тау кен ғимаратындағы фотодиодтың (фотоқабылдағыш ретінде алынған бір модальды оптикалық кабельдің бойымен өткен сигналдың көрінісі

мынадай (1.3, 1,4 -суреттер).



1.3 - сурет – Фотодиодты қосу процесі



1.4 - сурет – БВС бағдарламасымен фотодиодтың шығарған нәтижесі (1 модальды оптикалық кабельдегі сәуле)

## 1.4 Фотодиодтардың шуы

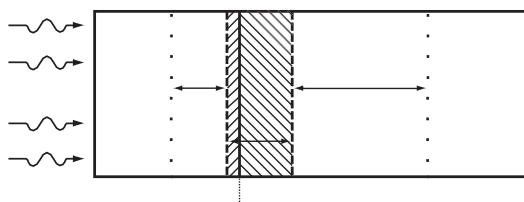
Фотодиодтың эквивалентті шу сызбасын қарастыруға болады. Фотодиодтардың шулары фототок шуларына және қараңғы ток шуларына бөлінеді.

Қараңғы токтың шуы еркін тасымалдаушылардың қозғалыс шуынан, заряд тасымалдаушылардың жұптарының жылу генерациясының шуынан, жұптардың рекомбинациясының шуынан, жұптардың қозғалыс шуынан, еркін тасымалдаушылардың жоғалу шуынан, температураның өзгеруінен туындайды. Фототок шуы заряд тасымалдаушы жұптардың кездейсоқ пайда болуының кванттық процестеріне, фондық Жарық шуына, терезедегі шағылысу және сіңіру шуына, бу генерациясы мен рекомбинациясының шуына және т. б.

Фототок шуы орташа дисперсиямен бағаланады. Енді біз фотодиодты монохроматикалық жарықпен жарықтандырамыз. Біз жарық ағынының шамасын тұрақты ұстаймыз. Жарықтың кез келген толқын ұзындығында. Фототоктың тәуелділігі  $J$  (деве) анықталады. Кванттық шығу коэффициентінің толқын ұзындығына тәуелділігі.

Спектрлік сезімталдықтың толқын ұзындығына тәуелділігі күрделі. Бұл тәуелділік белгілі бір толқын ұзындығында максимумға ие, ал ұзын толқындар аймағындағы құлдырау кванттық шығыстың толқын ұзындығына тәуелділігімен байланысты, ал қысқа толқын ұзындығы аймағында аймақаралық сіңіру коэффициентінің тәуелділігімен байланысты. Екі тәуелділіктің де қызыл шекарасы бар, өйткені  $h\nu$  кванттық энергиясы жолақ енінен аз бірлік аймақаралық Жарық сіңіру болмайды. Суретте германий мен кремний фотодиодтары үшін спектрлік сезімталдыққа тәуелділік берілген.

Фотодиодтың тереңдігі бойынша гетерогенді сіңірудің спектрлік сезімталдыққа әсері төмендегі 1.5-суретте көрсетілген. Қысқа толқынды сәулелену сіңіру коэффициентінің жоғары мәніне ие, сондықтан ол негізінен фотодиод эмитентінің беткі аймағында сіңеді. Бұл жағдайда фототок аз болатыны анық, өйткені жарық сіңіру аймағы p-n түйісуінен алыс. Ұзын толқындар жағдайында сіңіру фотодиодтың бүкіл тереңдігінде диффузиялық ұзындыққа тең немесе одан үлкен қашықтықта жүреді. Бұл жағдайда түрлендіру тиімділігі максималды болады. Ақырында, өте үлкен мәндерде фототок фотоэффекттің қызыл шекарасына жақындауына байланысты азаяды.



1.5 - сурет – Фотодиодтың өлшемдері және негізгі еместасымалдаушылардың диффузиясының тән ұзындықтары

p-i-n фотодиодтары. P-n ауысуына негізделген фотодиодтың көрсетілген кемшіліктері фотодиодтарда жойылады, мұнда p - және n-аймақтар арасында өзіндік өткізгіштігі бар i-қабат орналасқан. Бұл қабаттың қалыңдығы жеткілікті үлкен. Осы аймақта Жарық сіңіру үшін. I қабатта бос тасымалдаушылар болмағандықтан, p-n түйіспесінің керіменшісуымен барлық қолданылатын кернеу i қабатқа түседі. I қабаттағы фотогенерацияланған медиа күшті электр өрісінде бөлінеді және мұндай диодтардың Фото-реакциясы жылдам болады. p-i-n фотодиодтарының жұмыс принципін бейнелейтін дизайн және энергетикалық диаграмма көрсетілген.

Pin фотодиодтың жұмыс принципі. I-қабатта бос тасымалдаушылар іс жүзінде жоқ және n-аймақтағы донорлардан басталатын электр өрісінің қуат желілері i-қабат арқылы экрандаусыз өтеді және p-аймақ акцепторларында аяқталады.

I-қабаттың ені әдетте 500-700 мкм құрайды. I аймақтан айырмашылығы, легирленген қабаттар өте жұқа етіп жасалған. Мұның бәрі барлық оптикалық сәулеленуді i-қабатқа сіңіру және i-аймақтан легирленген аймақтарға зарядтардың тасымалдану уақытын қысқарту үшін жасалады.

Нәтижесінде құлаған фотондар сыртқы тізбектегі токты көбірек қоздырады, тиімді және аз кідіріспен. Таусылған аймақта пайда болған тасымалдаушылар күшті электр өрісінде диодтың p және n аймақтарына бірден ауысады.

Мұндай диодтардың кванттық тиімділігі әдетте 80 % жетеді. Талшықты-оптикалық желілерде қолдануға арналған диодтар үшін ауысу сыйымдылығы 0,2 пФ, диодтың жұмыс беті 200 мкм.

Сонымен, pin фотодиодының басты артықшылығы-жоғары коммутациялық жылдамдықтар, өйткені сәулеленуді сіңіру i қабатында жүреді, мұнда дрейфтік тасымалдау арқылы заряд тасымалдаушылар үшін жоғары жылдамдықтар жүзеге асырылады.

Тағы бір артықшылығы - жоғары кванттық тиімділік, өйткені i-қабаттың қалыңдығы әдетте кері сіңіру коэффициентінен үлкен және барлық фотондар i-қабатқа сіңеді.

Pin фотодиодтары үшін гетероқосылғыларды пайдалану фотодиод базасында жарықтың сіңуіне жол бермейді.

## **1.5 Көшкін фотодиодтары**

Көшкінінің фотодиоды - бұл фотодетектор, онда кванттық тиімділіктің жоғарылауы ішкі күшейту арқылы жүзеге асырылады, өйткені қар көшкінінің көбеюі кері p-n ауысуында.

Диод P типті германий субстратында ( $p \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) қалыптасады, содан кейін диффузия немесе иондық имплантация арқылы алынған бетінде n+ қабаты пайда болады. Беттік бұзылуды болдырмау үшін N + қабаты әлсіз легирленген n типті қауіпсіздік сақинасымен қоршалған. Инфрақызыл сәулелі тіркеу

аймағының диаметрі 100 мкм және қауіпсіздік сақинасының болуына байланысты ол N<sup>+</sup> қабатының беткі ауданынан кішірек. Ағартатын жабын осы диодтың кванттық тиімділігін арттырады.

Ішкі күшейтудің жоғары мәндерінің талабы жартылай өткізгіш материалдың сапасы мен біркелкілігіне айтарлықтай қатаң шектеулер қояды, өйткені көбейту коэффициенті электр өрісінің кернеулігіне экспоненциалды түрде тәуелді.

Жоғары кері кернеулер мен дәл кернеуді орнату қажеттілігі олардың жұмысын қиындатады. Әдетте қар көшкіні мен р-і-п фотодетекторының артықшылықтары біріктіріледі. 5.17-суретте дәл осындай дизайн көрсетілген - INP субстратындағы *ingaasp* гетерокұрылымы қуат кернеуі 300-ден 400 Вольтқа дейінгі жылдам әрекет ететін фотоқабылдағыштарды іске асыруға мүмкіндік береді.

## 1.6 Фототранзисторлар

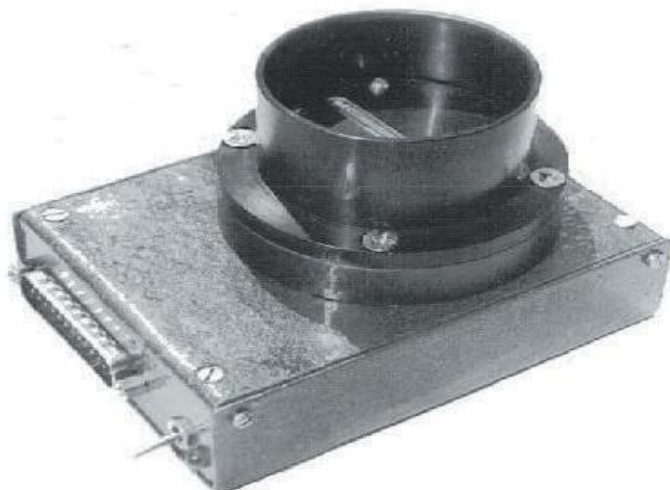
Фототранзистор ішкі фототокты күшейтетін жартылай өткізгіш фотоэлектрлік құрылғыларға жатады. Фототранзистордың құрылымы жалпы эмитенттік схемаға енгізілген кәдімгі биполярлы PNP транзисторының құрылымына тең. Биполярлық транзистордан айырмашылығы, фототранзистордың базаға электрлік байланысы жоқ, ал базалық токты басқару оның жарықтығын өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Осы себепті құрылымдық жағынан фототранзистордың тек екі терминалы бар – Эмитент және коллектор.

Жоғарыда айтылғандай, фототранзистордың тогын басқару базалық аймақты жарықтандыру арқылы жүзеге асырылады. Анықтама үшін р-п-р фототранзисторын қарастырыңыз. Жарық ағыны базаның п-аймағына тиген кезде онда тепе-тең емес электрондар мен тесіктер пайда болады. Тесіктер негізгі емес тасымалдаушылар болады, олардың концентрациясының жоғарылауы токтың дрейфтік компонентінің базадан коллекторға өсуіне әкеледі. Бастапқы мән фототок р-п түйісу негізіндегі диодтың фототоқымен бірдей қатынаспен көрсетіледі. Айырмашылық тек фототранзистордағы фототокқа қатысатын тепе-тең емес тасымалдаушылар ені  $W L_p$  диффузиялық ұзындығынан аз болатын базалық аймақтан жиналады.

Тепе-теңдік емес тесіктер базадан коллекторға кететіндіктен, база эмитентке қатысты теріс зарядталған, бұл фототранзистордың эмитенттік ауысуының тікелей ығысуына тең. Эмитенттік р-п түйіспесінің тікелеймещысуымен эмиттерден базаға токтың инъекциялық компоненті пайда болады. Эмитенттік токтың берілу коэффициенті кезінде  $\alpha$  базада ( $1 - \alpha$ ) инъекцияланған тасымалдаушылар қайта біріктіріледі немесе  $\hat{\alpha}$  инъекцияланған тасымалдаушылар санынан бір есе аз. Стационарлық ток жағдайында базадағы прорекомбинацияланған тасымалдағыштардың саны бастапқы фототокпен кеткен санына тең болуы керек. Сондықтан инъекциялық ток бастапқы фототоктан 2 есе үлкен болуы керек.

## 2 UFPM-100 әмбебап Фото қабылдау модулі

UFPM-100-оптикалық ақпаратты көп элементті желілік фотодетектормен тіркеудің корпустық модульдерінің сериясы, содан кейін оны компьютерге енгізу. Модульдер компьютерге стандартты LPT порты арқылы қосылады және қолдайды SPP және EPP деректер алмасу протоколдары. Заманауи элементтік базаны пайдаланудың арқасында Модульдер кез - келген фотодетекторды қолдануға тез бейімделуі мүмкін-CCD және фотодиод және басқа құрылымдар негізінде.



2.1 - сурет – UFPM - 100

UFPM - 100 спектрлік талдау, техникалық көру жүйелері және т.б. сияқты көптеген мәселелерді шешу үшін қолданылатын аспаптар мен жүйелердің бөлігі ретінде қолданыла алады.

Құрылымдық жағынан Модульдер қосқыштар мен қуат қосқышы орналасқанактам блокты білдіреді.

UFPM-100 компьютермен байланысу үшін техникалық сипаттамамен және драйвер мәтінімен бірге келеді. Тұтынушылардың өтініштері бойынша Модульдер MS DOS және Windows 95/98 операциялық жүйелеріндегі құрылғылармен жұмыс істеуге мүмкіндік беретін бағдарламалық жасақтама пакетімен жабдықталған. Бағдарламаларда ыңғайлы пайдаланушы интерфейсі бар, нақты уақыт режимінде деректерді талдауға, іске қосу режимін өзгертуге мүмкіндік береді (сыртқы іске қосу сигналдарымен немесе Басқару бағдарламасының асинхронды командаларымен синхронды), өлшеу параметрлерін басқаруды қамтамасыз етеді (интеграция уақыты, жинақтау режимдері және нәтижелерді көрсету).

Модульдердің қуаты компьютердің қуат көзінен де, дербес құрылғыдан да жүзеге асырылуы мүмкін. Стандартты оптикалық құрылғылармен жұптастыруға арналған фланецтер жеткізілім жиынтығына қосылуы мүмкін.

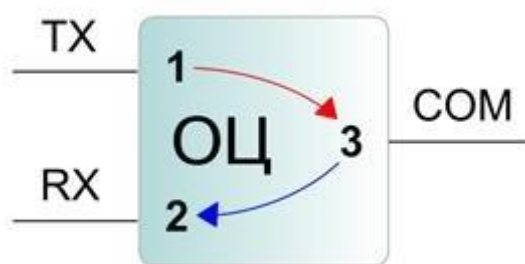


## 2.1 Циркуляторлар

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 [3].

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 2RX порттарын циклде (ілімектен) жабу мүмкін. Бұл іс кейінірек сипатталады.



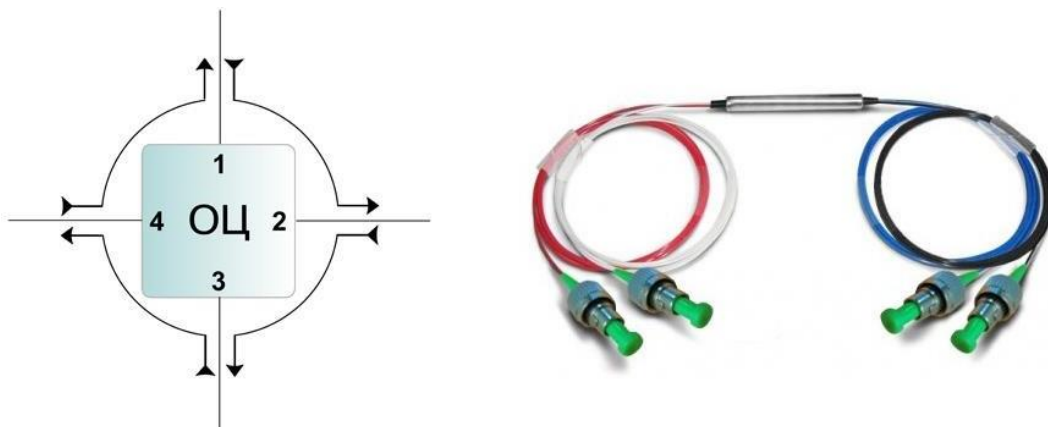
2.2 - сурет - Оптикалық циркулятор

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.

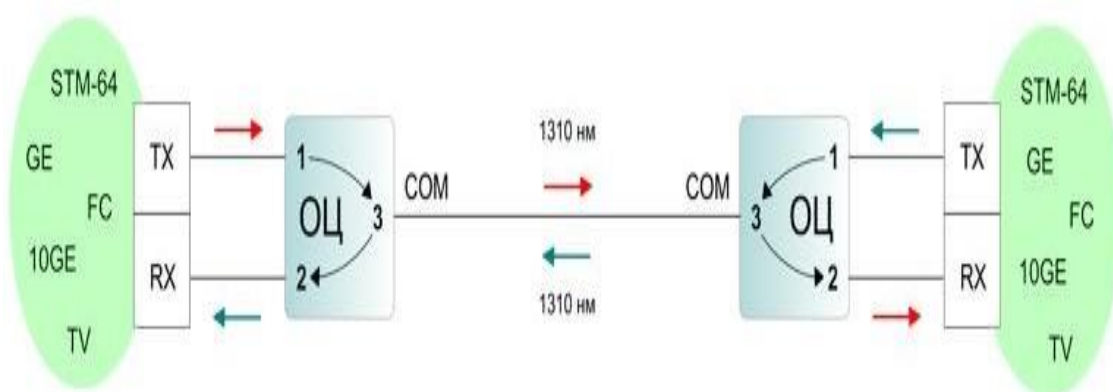
Оптикалық циркуляторлар тек телекоммуникациялық желілерде ғана емес, сонымен қатар өнеркәсіптік және ғылыми оптикалық жүйелерде де қолданылады. Мысал ретінде төрт полюсті оптикалық айналымды келтіруге болады.

Оптикалық циркуляторларды қолдану. Бір талшықты герметизациялау үшін екі бірдей оптикалық циркулятор қолданылады, оның СОМ шығысында сигнал поляризация жазықтығында  $45^\circ$  ығысады. Екі оптикалық циркулятордың СОМ порттарын қосу кезінде поляризация жазықтықтарының арасындағы айырмашылық  $90^\circ$  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 арқылымәліметтерді беруге болады.



2.3 - сурет – Оптикалық циркуляторларды қолдану

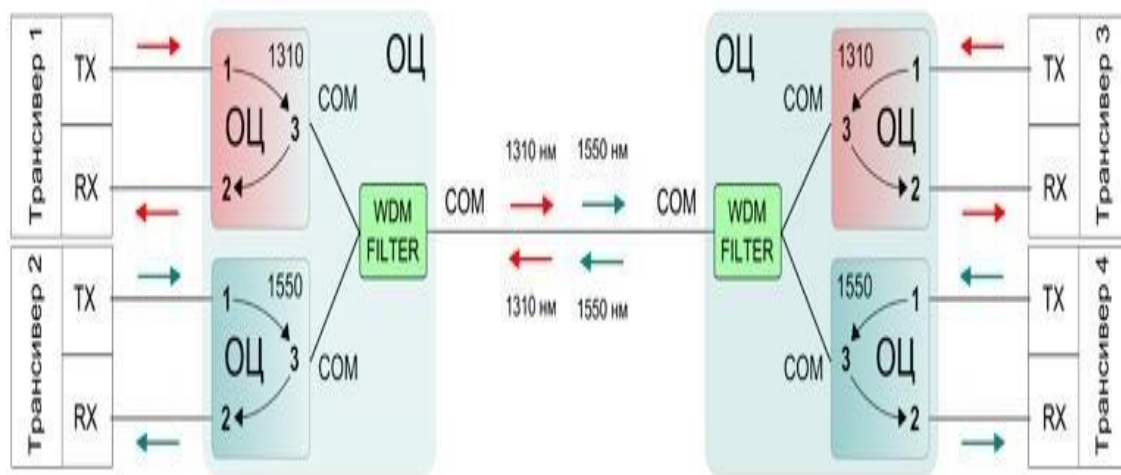
Бір талшықты герметизациялау үшін екі бірдей оптикалық циркулятор қолданылады, оның СОМ шығысында сигнал поляризация жазықтығында  $45^\circ$  ығысады. Екі оптикалық циркулятордың СОМ порттарын қосу кезінде поляризация жазықтықтарының арасындағы айырмашылық  $90^\circ$  болады. Оптикалық циркуляторлардың 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].



2.4 - сурет - 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 [4].



2.5 - сурет - 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 [5].

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 TX 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 [6].

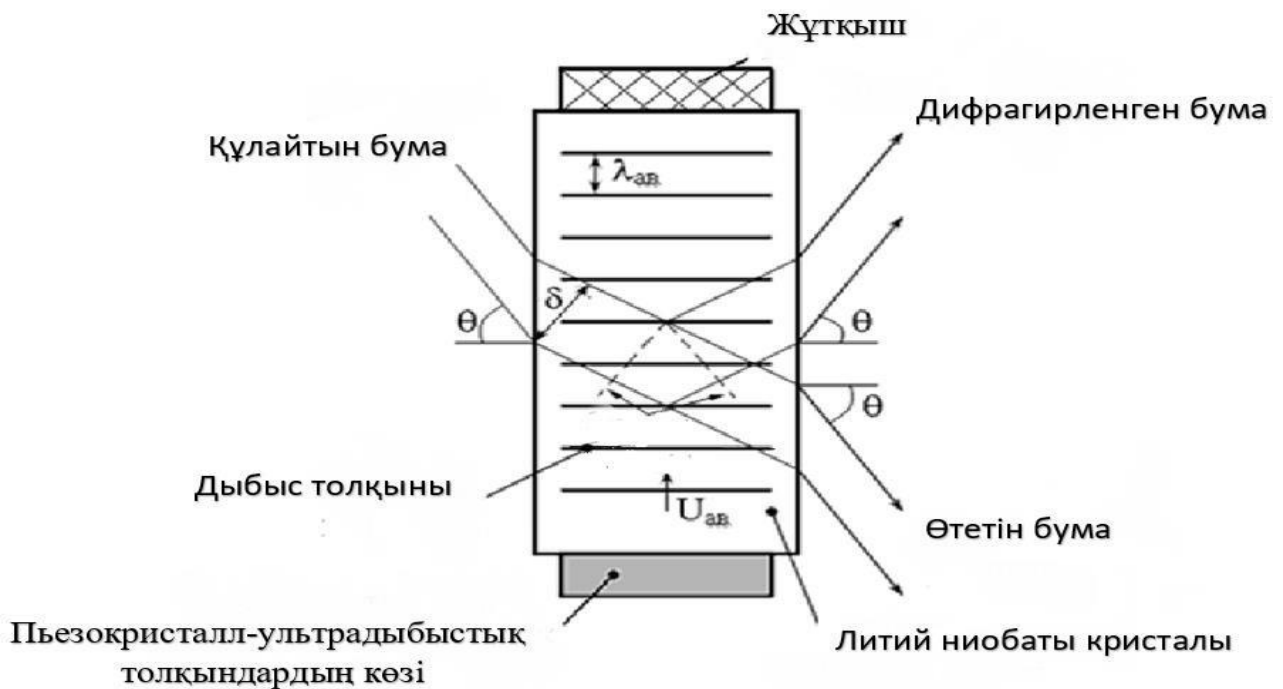
### 3 Белсенді оптикалық модульдер

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.

#### 3.1 Акустооптикалық модуляторлар

Акустооптикалық модулятордың (АОМ) жұмыс істеу принципі оптикалық мөлдір материалдардың сыну көрсеткішіне (мысалы,  $\text{LiNbO}_3$  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 (3.1-сурет).



3.1 - сурет – Акустико-оптикалық модуляторларда жарық шоғының өту сызбасы

Акустикалық толқын оптикалық ортада үнемі өзгертін сыну көрсеткіші бар, дифракциялық тордың рөлін атқаратын құрылымды жасайды. Сынукөрсеткішінің тең сызықтары (3.1-суретте олар тұтас көлденең сызықтармен көрсетілген)  $\lambda$  акустикалық толқын ұзындығына қашық болады. Шағылысқан акустикалық толқын болмауы үшін жұтқыш қолданылады [4].

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  $\delta$ , ұзындығы жарық толқынының  $\lambda$  және құлау бұрышын  $\theta$ . Оптикалық модуляторларда Брэгг дифракциясының пайда болу шарттары қолданылады, яғни ара қатынасы орындалғанда.

$$\lambda \sin \theta = m r^2 \quad (3.1)$$

мұндағы  $\theta$  - тұрақты тор рөлін атқарады;  
 $m$  - дифракция тәртібі ( $m=0,1,2,\dots$ );  
 $\lambda$ -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).

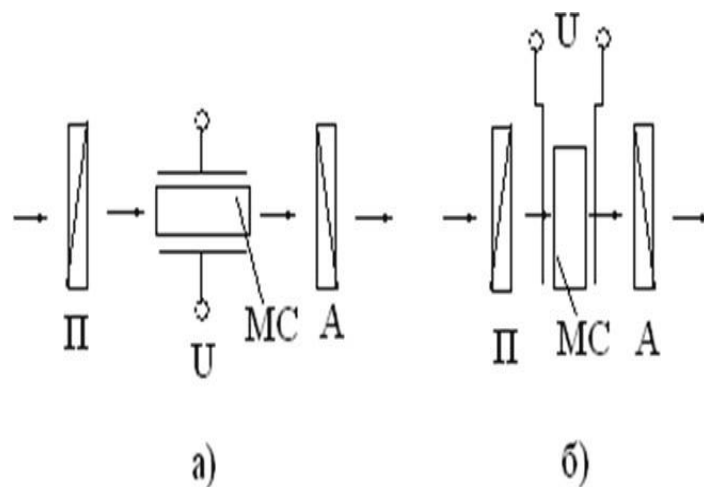
АОЖ акустооптикалық аспаптардың әртүрлі түрлерінде: дефлекторларда, сканерлерде, модуляторларда, сүзгілерде және процессорларда – оптикалық сәуленің қандай параметрімен басқару жүзеге асырылатындығына байланысты пайдаланылуы мүмкін [5].

### 3.2 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 Поккельстің сызықтық электрооптикалық әсері түрінде көрінеді. Орталық симметриялы орталарда, керісінше, Керрдің квадраттық электрооптикалық әсері байқалады. Бұл екі ең маңызды электрооптикалық әсер электрооптикалық модуляторларды құру кезінде пайдаланылуы мүмкін

а) Керр әсері негізінде электрооптикалық модуляторларға тоқталамыз. Жарық модуляциясы үшін изотропты затта сыртқы электр өрісінің әсерінен оптикалық анизотропия пайда болған Керрдің (1875 ж.) жақсы зерттелген электрооптикалық 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 қарқындылығынөлге 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  
3.2 - сурет - Керр (а) әсері және Поккельстің бойлық әсері негізінде оптикалық модуляторлардың жұмысы (б)

Сондықтан, Керр ұяшығынан өтіп, жарық толқыны екі сызықтық поляризацияланған құрауыштарға ыдырайды. Олардың бірі поляризацияланған, оның электрлік векторы сыртқы полюға перпендикуляр (кәдімгі толқын), ал екіншісі – параллель (ерекше толқын) бағытталған. Модульдің максималды тереңдігін қамтамасыз ету үшін поляризатордың басты жазықтығы  $45^\circ$  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. Теориямен тәжірибе  $n_o$  және  $n_e$  айырмашылықтары  $E^2$  пропорционалды екенін көрсетеді.

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_k E^2, \quad (3.2)$$

мұндағы  $k_k$  E-ге тәуелді емес коэффициент.

Модуляциялаушы ортада 1 жол өткеннен кейін қарапайым және ерекше сәулелер арасындағы фазалардың айырмасы:

$$\varphi = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} \cdot l = 2\pi \frac{k_k E^2 l}{\lambda} = 2\pi B l E^2, \quad (3.3)$$

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

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 10 пс құрайды. Бұл 100 мГц–1 ГГц үлкен модуляция жиіліктерінде Керрдің бағдарлы әсері іс жүзінде байқалмайды және жылдам әрекет етуі 0,1–1 нс уақытпен шектелген поляризациялық әсер ғанатиімді болып қала береді.

б) Поккельс әсері негізінде Электрооптикалық 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 Поккельс эффектісі деп аталады (1894 ж.). Керр әсеріне қарағанда Поккельс әсеріндегі  $n_o$  және  $n_e$  айырмашылығы  $E$  бірінші дәрежесіне пропорционалды:

$$\Delta n_o = n_e - n_o = k_n E, \quad (3.4)$$

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

Поккельстің әсері шамамен 10 мГц 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, Поккельс ұяшығы оған берілетін кернеудің амплитудалық модуляциясы кезінде Поккельс 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 болыптабылады.

в) Мах-Цендер интерферометрі негізіндегі Электрооптикалық модуляторлар.

Мұндай модулятор Маха-Цендер (ММЦ) интерферометрінің схемасына сәйкес интерферометрдің ұқсас екі иығынан тұрады (3.3- 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.



3.3 – сурет – Мах-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 жылжиды

$$\Delta\varphi = K_m * \Delta * n_{эф} * L \quad (3.5)$$

мұндағы  $K_m$  – сән сынуының тиімді көрсеткішін өзгерту амплитудасы;

$n_{эф}$  - тиімді сән сыну көрсеткіші;

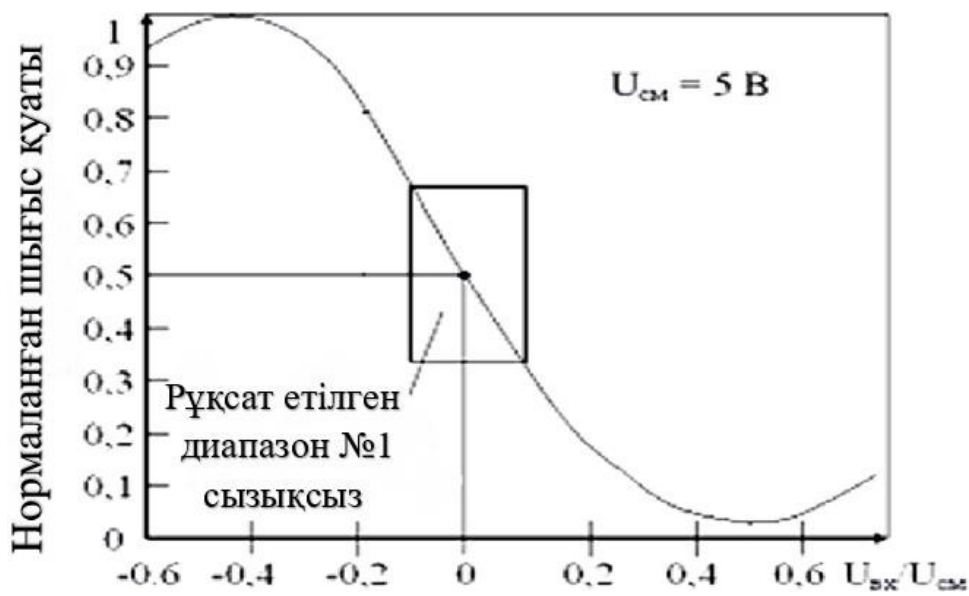
R - оптикалық жұмыс ортасының электрооптикалық коэффициенті;

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 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.



3.4 – сурет – ИМЦ типті модулятордың беріліс сипаттамасы

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

#### 4 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.

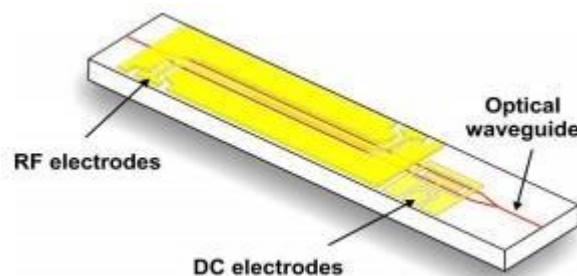
Модуляторлар сондай-ақ талшықты-оптикалық датчиктерде, өлшеу жабдықтарында, радиосигналды оптоалшық, радиофотоника бойынша таратуда қолданылады [6].

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.

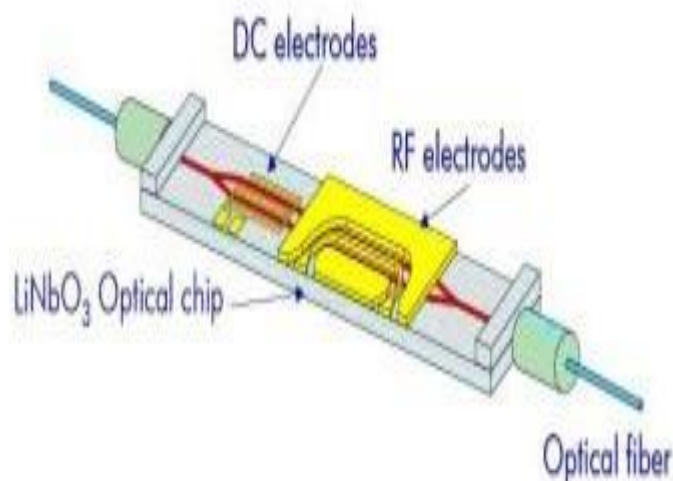
Маха-Цендердің сәуле шығару қарқындылығы модуляторлары ixblue Photonics (Франция), Lumentum Holdings Inc компанияларымен жасалады. (АҚШ), Optilab (АҚШ), Covega (АҚШ), EOspace (АҚШ), Thorlabs (АҚШ), Oclaro (АҚШ), Laser 2000 (Ұлыбритания), JENOPTIK (Германия), Sumitomo Osaka Cement (Жапония), Fujitsu (Жапония), 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).



4.1 - сурет – 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

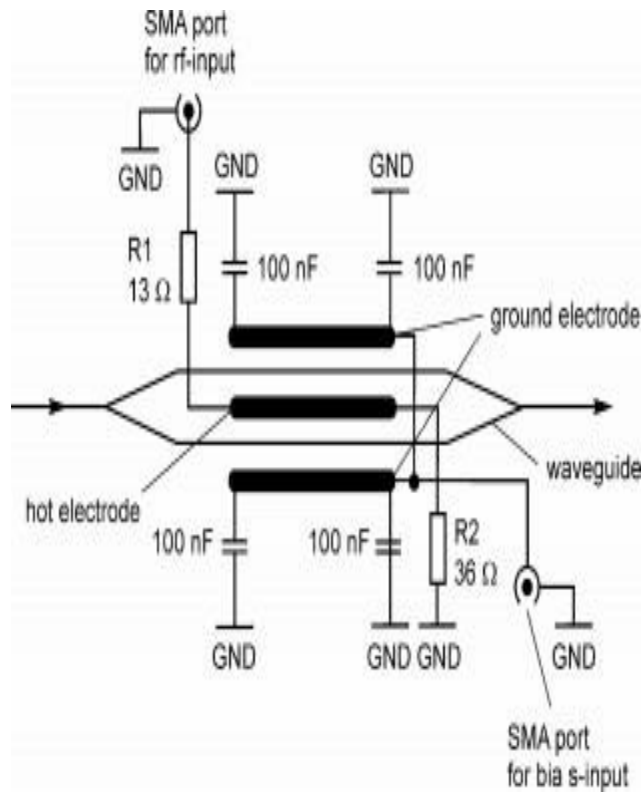


4.2 - сурет – Интегралды-оптикалық СВЧ–Маха – Пермалық ғылыми – өндірістік прибор жасау компаниясының Цендері модуляторы [6]: LiNbO<sub>3</sub> Optical chip- кристалды төсеніш (электрооптикалық кристалл); DC electrodes – DC-ығысу электродтары; RF electrodes – СВЧ-жүгіртпе толқынның копарналық желісі 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 [6]. RF модуляция сигналының кернеу тізбегінің және жұмыс нүктесінің (bias) жылжу кернеуінің схемасының нұсқасы суретте көрсетілген [7].



4.3 - сурет – 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:

$$I_{out}(t) = T_{mod} \frac{I_{in}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi}{V_{\pi}} V(t) - \phi \right) \right], \quad (4.1)$$

мұндағы  $I_{out}(t)$  Output intensity-сәуле шығару қарқындылығы;

$I_{in}$  -Input intensity-кіріс сәулесінің қарқындылығы;

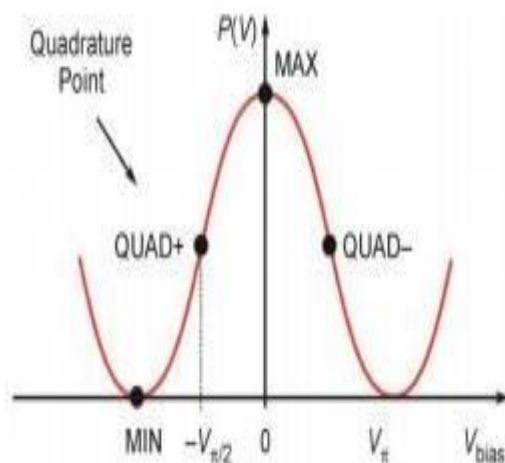
$T_{mod}$  -optical transmission of the device – модуляторды тарату коэффициенті;

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

$\phi$  – phase term – фаза.

Мах–Цендер фазасының  $\phi$  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  $\phi$  (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  $\phi$  компенсациясы кезінде) және интерферометр иықтарында сәулелену қарқындылығы тең болған кезде суретте келтірілген.



4.4 - сурет – 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.

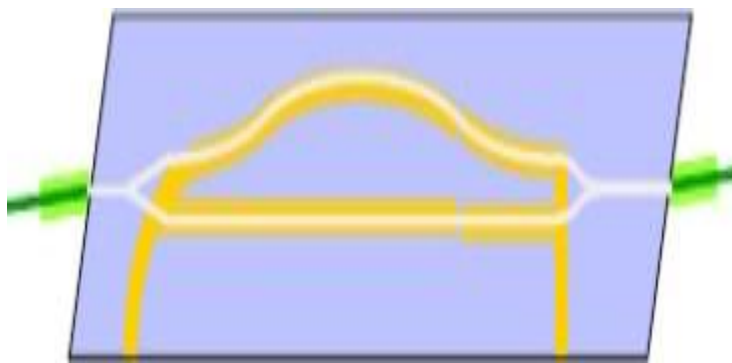
Маха-Цендер модуляторларының негізгі параметрлері: толқын ұзындығының жұмыс диапазоны, модуляция жолағы, енгізілетін шығындар, жартылай толқынды кернеу, экстинкция коэффициенті. Оптикалық модулятордың максималды өткізу коэффициентінің минималды қатынасы.

Кесте 4.1 - Ixblue Photonics компаниясының Маха–Цендер модуляторларының негізгі сипаттамалары

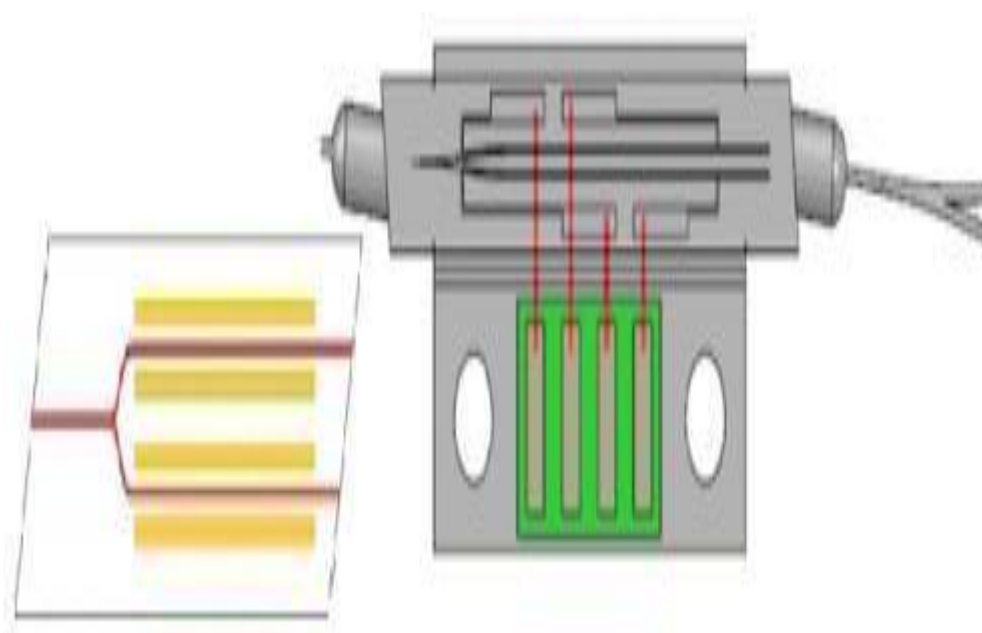
Модулятор түрі	NIRMX800-LN-20	NIRMX950-LN-20	NIR-MX-LN-20	MX 1300-LN-40	MXAN-LN-40	MX2000-LN-10
Operating wavelength	800nm (780–850)	900 nm (850-960)	1060 nm (980-1150)	1310 nm (1270-1330)	1550 nm (1530-1625)	2050 nm (1900-2200)
Electro-optical bandwidth	25 GHz	25 GHz	18 GHz	30 GHz	30 GHz	12 GHz
$V_{\pi}$ RF@ 50 kHz	3,5 V	3,5 V	3,5 V	4 V	5 V	9,5 V
$V_{\pi}$ 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

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).



4.5 - сурет – IMZI модуляторы (екі иық арасында жоғары жүрісті)



4.6 - сурет – Талшықты-оптикалық гироскоптар үшін Y-JPX-LN модуляторы

Optilab компаниясы (АҚШ) MIOC-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 MBC (Modulator Bias Controller) жұмыс нүктесінің контроллерлері мен модуляция сигналының Dc драйверлерін (формулировкаларын) шығарады.



## 4.1 Оптикалық компоненттерді модельдеу

### 4.1.1 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.

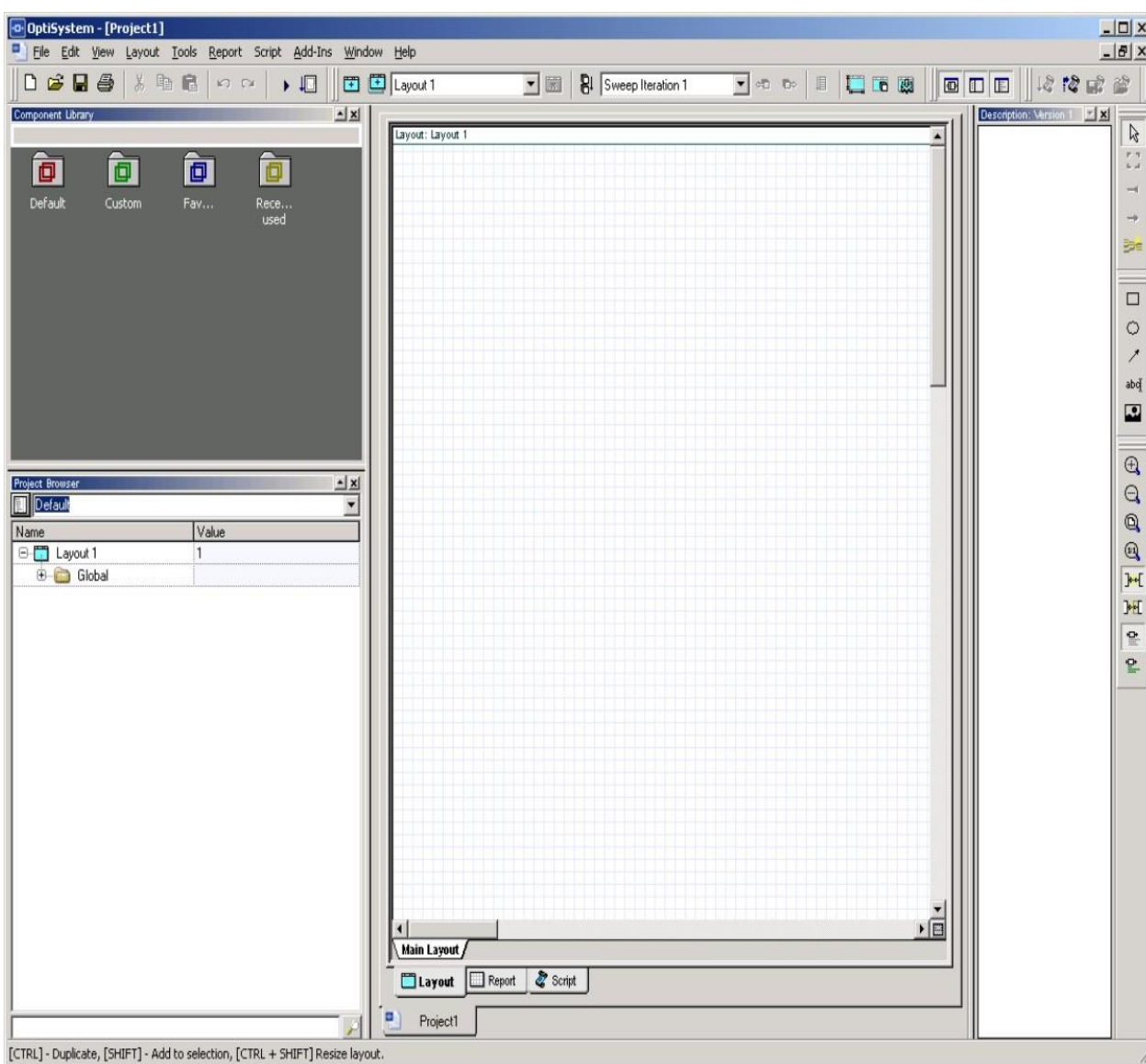
Есептеулерді жоспарлаушы деректер ағынының таңдалған моделінесәйкес құрамдас модульдерді орындау тәртібін анықтау арқылы модельдеуді басқарады. Негізгі моделі деректер ағынын, оған жүгінеді модельдеу қабатының беру компоненті болып табылады итерация деректер ағынының (CIDF). CIDF домені Итерация деректеріне 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 өзгертуге 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.



4.7 - сурет – 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 жол 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.

## **4.2 OPTISYSTEM интерфейсінің негізгі мүмкіндіктері**

### **4.2.1 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.

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

## **4.3 Optiwave бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарымен интеграциялау**

OptiSystem интеграцияланған және талшықты оптика үшін Optiwave арнайы бағдарламалық құралдарын OptiAmplifier, OptiBPM, OptiGrating, WDM\_Phasar, 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 Шумен 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 мониторлардықосу 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, кішіжүйелерді 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.

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.

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.

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.

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.

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

#### 4.4 Модельдеу жүргізу үшін компоненттерді таңдау

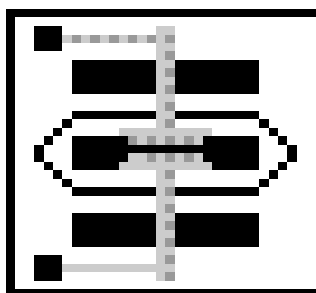
Оптикалық модулятордың жұмысын модельдеу үшін қажетті компоненттерді таңдаймыз.

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

Кесте 4.2 - Модулятор параметрлері

Параметр атауы мен сипаттамасы	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[

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



4.8 - сурет – Литий ниобаты негізіндегі модулятор

"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.

#### 4.5 Оптикалық модулятор жұмысын модельдеу

Таңдалған компоненттерден 4.9-суретте келтірілген сұлба жасалған, ол оптикалық модулятор жұмысын моделдеуді орындауға мүмкіндік береді.

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

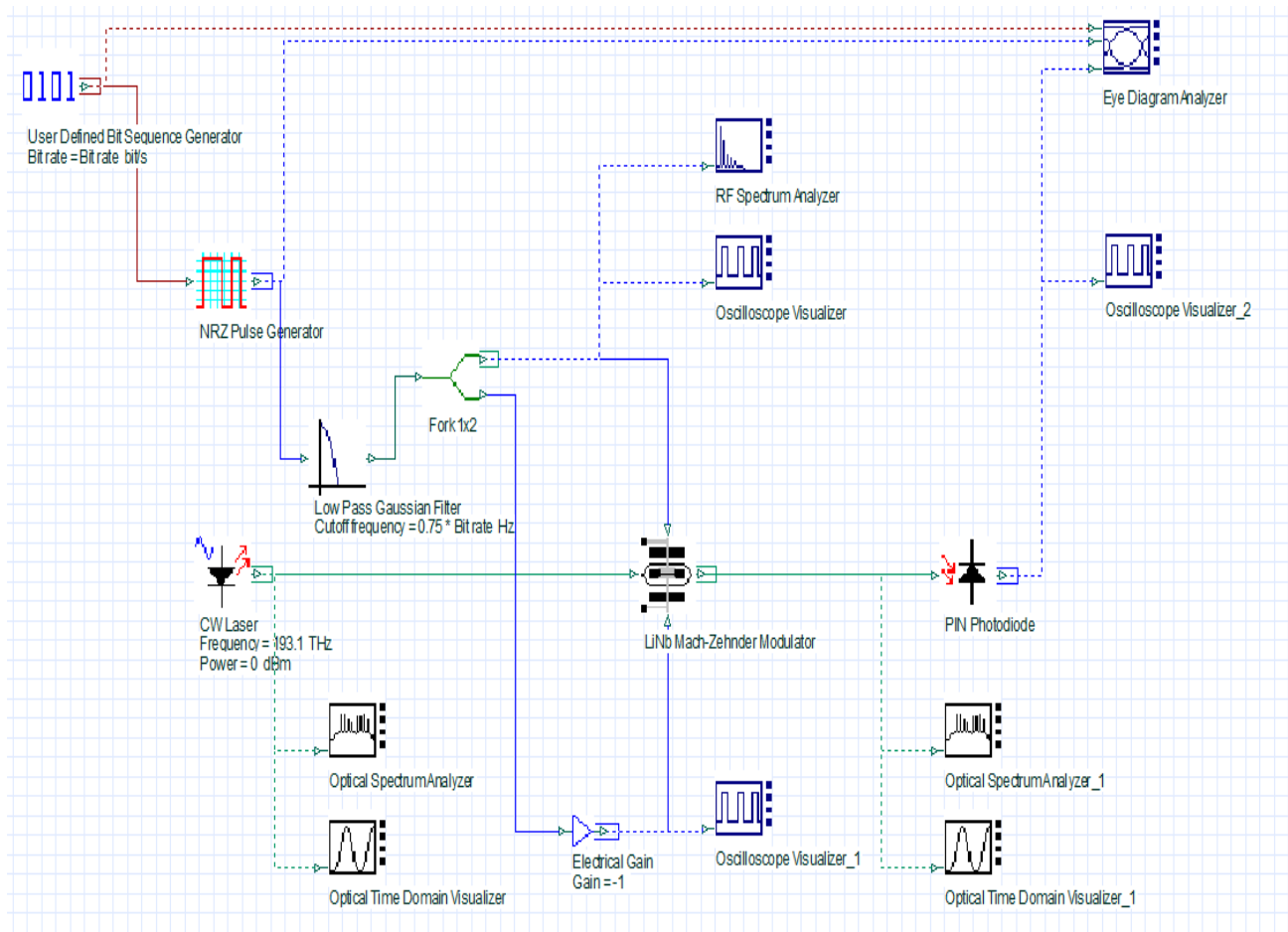
Жұмыс үлгілеуін жүргіземіз және модулятор иығына және модулятор шығысындағы оптикалық импульстердің чирпіне қосылған кернеу арасындағы байланысты көрсетеміз. жоғары жылдамдықты талшықты-оптикалық байланыс жүйелеріндегі маңызды фактор болып табылады, себебі ол рұқсат етілген таратылымға әсер етеді. Литий ниобаты негізіндегі сыртқы модуляторлар ширпіні азайтуға немесе жоюға мүмкіндік береді, өйткені лазерлік көз спектрдің тар енінде, стационарлық режимде ұсталады. Бұл мысалда сыртқы модулятор-бұл LiNbO<sub>3</sub> 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 мүлдембірдей. Чирпингті қоса берілген кернеу тұрғысынан білдіруге болады:

$$\alpha = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} \quad (4.1)$$

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



4.9 - сурет - Модельдеу схемасы



## ҚОРЫТЫНДЫ

Жұмыс барысында кристалдардың оптикалық және электр-оптикалық қасиеттеріне негізделген талшықты-оптикалық байланыс жүйелерінің компоненттері қарастырылды: фотодиодтар, фототранзисторлар, фотоқабылдағыштар. 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.

## ПАЙДАЛАНЫЛГАН 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., Тронев 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., Plichev 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., Plichev 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., Plichev I., Shamray A. Generation of high extinction optical pulses by means of LiNbO<sub>3</sub> 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.

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.

## ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

Дипломдық жұмыс

Сабырбаев Арнұр Құдайбергенұлы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering оқу бағдарламасы

Тақырыбы: «Қабылдағыш модульдерді талдау»

Жұмыста оптикалық модуляторлар қарастырылған. Интегралды-оптикалық жарық модуляторларының түрлері және олардың негізгі сипаттамалары келтірілген.

Бұл дипломдық жұмыста «Қабылдағыш модульдерді талдау» тақырыбы қарастырылды. Салыстырмалы талдау жүргізілді, сонымен қатар көптеген датчиктердің сипаттамалары ұсынылды. Сондай-ақ, дальномердің жұмыс істеу қабілетін едәуір арттыруға болатын нұсқалар ұсынылды.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер өте орынды.

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

Радиофотонды байланыс желісі бойынша өткен кезде радиосигналдың өзгеруі келтірілген.

Жалпы, дипломдық жұмысқа "жақсы" (80 %) деген баға қойылып, ал студент Сабырбаев Арнұр Құдайбергенұлы 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering оқу бағдарламасы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

### Ғылыми жетекші

ЭТ және FT каф.

қауымдастырылған профессоры,

экон.ғыл.канд.

 Куттыбаева А.Е.

(қолы)

«25» мамыр 2024 ж.

## РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс

Сабырбаев Арнұр Құдайбергеноұлы

6B07104 – Electronic and Electrical Engineering

Тақырыбына: «Қабылдағыш модульдерді талдау»

- а) графикалық бөлім парақ;  
б) түсініктеме бет.

### ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Берілген бітіру жұмысында Қабылдағыш модульдерді қолдана отырып, фотодиодтар, фототранзисторлар, оптикалық модульдер туралы ақпарат жиналған. Негізгі өлшемдер жүргізіп, параметрлері есептелген. Фотодиодтарды, оптикалық модульдерді қолдана отырып, есептеулер жасалған.

Фотодиодын қолдануды жақсарту мәселелері қарастырылады. Жұмыста жалпы фото диоды жайында мағлұматтар қарастырылған және оларды қолданудың бірнеше әдісі айтылған.

Фото диодтарына талдау жасалып, осы өлшемдерде олардың тиімділігі анықталды. Сонымен қатар оларды одан әрі пайдалану және жетілдіру бойынша практикалық ұсыныстар беру. Дипломдық жұмыста фото диодтары есептеулерін, құрылымы сызбасында студент өз тарапынан қандай жақсартулар енгізуі мүмкіндігін көрсете алмаған. Кейбір орфографиялық қателер кездеседі.

Графикалық және мәтіндік материалдар МСТҚ талабына сәйкес жазылған. Бұл дипломдық жоба жоғарғы оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғарғы дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер – фотодиодтарын оптикалық модульдерді тиімді пайдаланудағы бағытқа жауап береді.

### ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Жалпы, дипломдық жұмысқа "жақсы" (80%) деген баға, ал студент Сабырбаев Арнұр Құдайбергеноұлын 6B07104 – Electronic and Electrical Engineering білім беру бағдарламасының «техника және технологиялар бакалавры» дәрежесіне лайықты деп санаймын.

#### Рецензент:

«Сайман корпорациясы» ЖШС өндіріс  
бойынша директоры орынбасары

Қосқовалин А.С.Алиев  
Сайман  
2024 ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагияттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Сабырбаев Арнұр Құдайбергелұлы**

**Тақырыбы: Қабылдағыш модульдерді талдау**

**Жетекшісі: Айнур Куттыбаева**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 12.2**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 4.8**

**Дәйексөз (35): 1.6**

**Әріптерді ауыстыру: 3**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 0**

**Ақ белгілер: 0**

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

*Күні*

*Кафедра меңгерушісі*



*27.05.2024*

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Сабырбаев Арнұр Құдайбергелұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Қабылдағыш модульдерді талдау

**Научный руководитель:** Айнур Куттыбаева

**Коэффициент Подобия 1:** 12.2

**Коэффициент Подобия 2:** 4.8

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 3

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

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

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

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

Обоснование:

Дата

Заведующий кафедрой



27.05 24.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Сабырбаев Арнур Құдайбергелұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Қабылдағыш модульдерді талдау

**Научный руководитель:** Айнур Куттыбаева

**Коэффициент Подобия 1:** 12.2

**Коэффициент Подобия 2:** 4.8

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 3

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

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

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

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

Обоснование:

*Дата*

27.05.24

 Маркелова С.  
проверяющий эксперт