

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

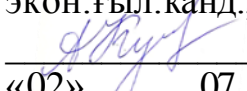
Қолжазба нұсқасында

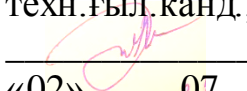
Мырзабеков Олжас Максатулы

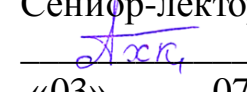
Магистрі академиялық дәрежесін іздену үшін

### МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация тақырыбы Оптикалық жүйелер мен талшықтағы лазерлік сәулеленудің тиімділігін зерттеу  
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 *Мырзабеков Олжас Максатулы*

Тақырыбы: *«Оптикалық жүйелер мен талшықтағы лазерлік сәулеленудің тиімділігін зерттеу»*

Университет ректорының 06.12.2019 ж. № 460-М бұйрығымен бекітілген.

Дайын диссертацияны тапсыру уақыты *«5» шілде 2020 ж.*

Магистерлік диссертацияға берілген алғашқы мәліметтер: 1) Талшықты-оптикалық байланыс желілері; 2) Жарық диоды модульдерінен жарық шығару; 3) Жарық диодты модульдердің оптикалық сипаттамаларын зерттеу әдістері, оптоталшыққа лазерлік сәуле тарату жүйелері.

Диссертациялық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату үшін оптикалық жүйелерді зерттеу;

б) Оптикалық сипаттамаларды зерттеудің тәжірибелік әдістері;

в) Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдердің тәжірибелік үлгілерін шығару.

а) Бір арналы талшықты-оптикалық байланыс желісінің құрылымы;

б) Жарықдиодты чиптерінің құрылымы;

в) Микросферадан жасалған жабыны бар жарықдиодты чип;

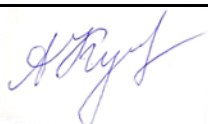

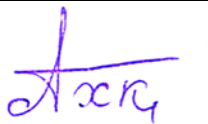
г) Беттегі әртүрлі текстуралары бар және беті тегіс тік чиптер;

Ұсынылатын негізгі әдебиет 55 атау.

магистерлік диссертацияны дайындау  
**КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Талшықты-оптикалық байланыс желілері	04.01.2020 -25.01.2020	орындалды
Зерттеу әдістері	20.01.2020 -25.02.2020	орындалды
Лазерлік жүйені беру үшін оптикалық талшықтағы сәуле шығару	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	10.01.2020 ж.	
Теориялық ақпарат	А.Е.Куттыбаева, ЭТжҒТ каф.лекторы	03.02.2020 ж.	
Норма бақылау	PhD докторы, ЭТжҒТ каф.сениор-лекторы Хабай А.	02.07.2020	

Ғылыми жетекші 

А.Е.Куттыбаева

Магистрант 

О.М.Мырзабеков

Мерзімі

«02» шілде 2020 ж.

## АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыста жеке жарықдиодты чиптерден жарық шығару тиімділігін арттыру әдістері қарастырылды. Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату үшін оптикалық жүйелер зерттелді. Жарық диодты модульдердің оптикалық сипаттамаларын зерттеу әдістері, оптогалшыққа лазерлік сәуле тарату жүйелері қарастырылды.

Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдердің тәжірибелік үлгілері ұсынылды. Люминофоры бар жарықдиодты модульдері зерттеліп, оңтайландырылды.

Лазерлік жүйені беру үшін оптикалық талшықтағы сәуле шығару көздері қарастырылды. Лазерлік сәулеленуді оптогалшыққа беру үшін жүйелердің параметрлік есептеулері жүргізілді.

## АННОТАЦИЯ

В данной диссертации рассматриваются методы повышения эффективности излучения света от отдельных светодиодных чипов. Исследованы оптические системы для распространения волоконно-оптического лазерного излучения. Рассмотрены методы исследования оптических характеристик светодиодных модулей, систем передачи лазерного излучения в волоконную оптику.

Представлены экспериментальные модели светодиодных модулей без люминофоров. Светодиодные модули с люминофорами были изучены и оптимизированы.

Источники излучения в оптическом волокне были рассмотрены для пропускания лазерной системы. Системные параметрические расчеты проводились для передачи лазерного излучения на волокно.

## ABSTRACT

This dissertation discusses methods for increasing the efficiency of light emission from individual LED chips. Optical systems for the propagation of fiber-optic laser radiation are investigated. Methods for studying the optical characteristics of LED modules and systems for transferring laser radiation to fiber optics are considered.

Experimental models of LED modules without phosphors are presented. LED modules with phosphors have been studied and optimized.

The radiation sources in the optical fiber were considered for transmitting a laser system. System parametric calculations were performed to transmit laser radiation to the fiber.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Талшықты-оптикалық байланыс желілері	9
1.1 Жартылай өткізгіш аспаптар	11
1.2 Жеке жарықдиодты чиптерден жарық шығару тиімділігін арттыру әдістері	16
1.3 Жарық диодты чип-плата модульдерінен жарық шығару тиімділігін арттыру әдістері	20
1.4 Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату үшін оптикалық жүйелерді зерттеу	20
2 Зерттеу әдістері	28
2.1 Жарық диодты модульдердің оптикалық сипаттамаларын зерттеу әдістері, оптоалшыққа лазерлік сәуле тарату жүйелері	28
2.2 Оптикалық сипаттамаларды зерттеудің тәжірибелік әдістері	32
3 Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру	37
3.1 Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдердің тәжірибелік үлгілерін шығару	37
3.2 Люминофор жоқ чип-платада жарықдиодты модульдің есептік моделін орнату және верификациялау	39
3.3 Люминофор жоқ чип-платадағы жарықдиодты модульдердің оңтайландырылған есептеулерін жүргізу	42
4 Люминофоры бар жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру	51
4.1 Люминофоры бар оптикалық жабын материалының үлгілері үшін есептеулер жүргізу	51
4.2 Люминофоры бар платадағы чип жарықдиодты модульдерінің эксперименттік үлгілерін дайындау және зерттеу	54
4.3 Люминофорлар бар платада жарықдиодты Чип Модулінің есептеу моделін қою және верификациялау	55
4.4 Люминофор бөлшектерінің орташа радиусының әсерін зерттеу	56
4.5 Люминофор бар платадағы чип LED модуліндегі оптикалық жабынның беті формасының әсерін зерттеу	57
4.6 Жарықдиодты Чип модульдерінің тиімділігі	58
5 Лазерлік жүйені беру үшін оптикалық жүйелерді зерттеу оптикалық талшықтағы сәуле шығару	63
5.1 Лазерлік берілістің есептік моделін қою және верификациялау оптикалық талшықтағы сәуле шығару	63
5.2 Лазерлік сәулеленуді оптоалшыққа беру үшін жүйелердің параметрлік есептеулерін жүргізу	64
Қорытынды	70
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	71

## КІРІСПЕ

Жартылай өткізгіш аспаптар – бұл жартылай өткізгіш материалдардың бірегей қасиеттерін пайдаланатын электронды және оптоэлектронды құрылғылардың кең класы. Жартылай өткізгіштік оптоэлектронды аспаптарға фоторезисторлар, фотодиодтар, фототранзисторлар, күн элементтері, ядролық сәулелену детекторлары, жарық диодтар, жартылай өткізгіш лазерлер жатады. Бұл жұмыста екі типті жартылай өткізгіш оптоэлектронды аспаптар: жарықдиодты және лазерлік диодтар негізіндегі құрылғылар қарастырылды.

Жарық диоды – электр тогы арқылы өткізгенде ол үшін когерентті емес жарықты сәулелендіретін жартылай өткізгіш құрал [1,2]. Бүгінде светодиода – жарық көздері саласындағы ең дамып келе жатқан бағыт. Жарық диодты жарықтандыру құрылғыларының әртүрлілігі мен танымалдығы олардың қолданылу аясының кеңдігі мен басқа жарық көздеріне қарағанда сөзсіз артықшылықтарға байланысты, оның ішінде энергияның жоғары тиімділігі, ұзақ қызмет ету және экологиялық таза болуы (улы компоненттердің болмауы). Жарықдиодты жарық көздерінің кең таралуының негізгі кедергісі дәстүрлі жарық көздерімен салыстырғанда олардың жоғары құны болып табылады. Қазіргі заманғы жарықдиодты шамдар құрастырудың екі негізгі технологиясын қолданады: дискретті корпусық жарық диодтары және "чип–на–плате" интегралды жарықдиодты модульдері. Чип-на-платада жарықдиодты модульдерді өндіру айтарлықтай арзан, өйткені жарықдиодты чиптердің саны бірдей болғанда дәл осындай жарық ағынын қамтамасыз ететін корпусық жарықдиодтармен салыстырғанда корпусқа және оптикалық компоненттерге шығын аз қажет. Жарық диоды модулінің конструкциясы – жарықдиодты чиптер, қорғаныс материалы қабатымен қапталған (бұдан әрі — оптикалық жабын) төсеніш [3]. Жарықдиодты чип модульдерін өндіру үшін, әдетте, сапфир төсенішіндегі галлий нитридіннің құрылымы негізінде дайындалған жоғары қуатты чиптері қолданылады. Мұндай жарықдиодты чиптердің сәулеленуі спектрдің көк бөлігінде орналасқан, сондықтан оптикалық жабынға ақ жарық алу үшін люминофор қосады.

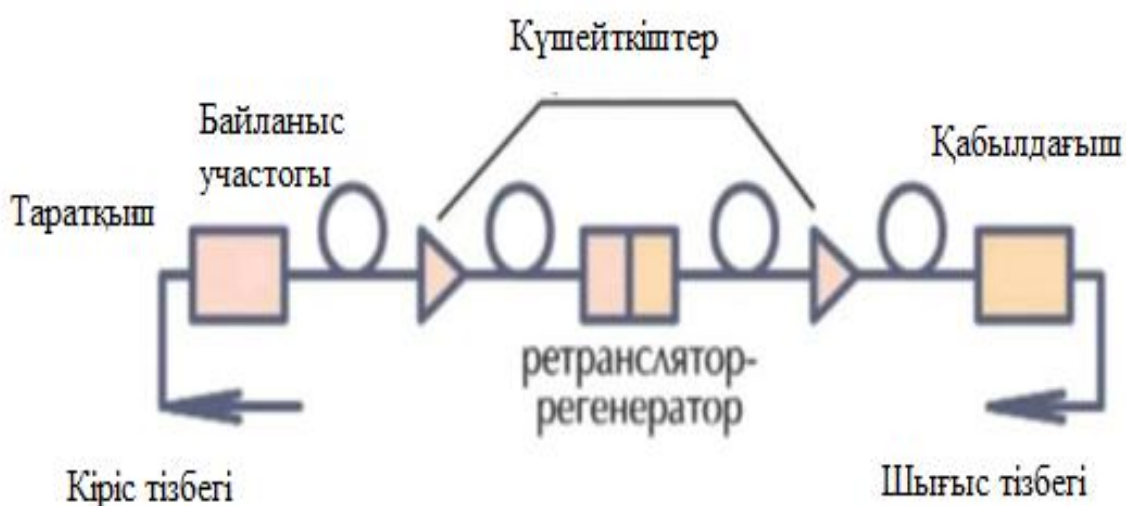
Сонымен қатар, Чип-на-плата модулі өлшемдері ықшам, әрі көптеген шамдар конструкциялары үшін жақсы, мысалы, E27 және E14 цокольдері бар алмастыру шамдары үшін өте ыңғайлы. Жарықдиодты чип-на-плата модульдің басты кемшілігі – орамаланған жарықдиодтарға және олардың массивтеріне қатысты оптикалық қуаттың қосымша жоғалуы, бұл субстраттағы чиптердің жоғары тығыздығымен және қосымша жарық сіңірумен байланысты.



## 1 Талшықты-оптикалық байланыс желілері

Лазерлік диод – диод негізінде құрылған жартылай өткізгіш лазер. Оның жұмысы заряд тасымалдаушыларды инжекциялау кезінде p-n өту аймағында орналасу инверсиясының пайда болуына негізделген [1].

Сонымен қатар, өткен ғасырдың 70-ші жылдарының басталуымен оптикалық талшықтар мен оптикалық сигналдарды қабылдағыштардың кеңжолақты оптикалық талшықтары, оптикалық сигналдарды қабылдағыштары, сонымен қатар жергілікті байланыс желілерінде де жоғары сапалы оптикалық талшық пайда болып, соның негізінде Цифрлық талшықты-оптикалық байланыс желілері ТОБЖ болды. ТОБЖ келесі негізгі компоненттерден тұрады [2]: таратқыш, оптикалық талшық, регенераторлар, оптикалық күшейткіштер және қабылдағыш (1.1-сурет).



Сурет 1.1 - Бір арналы талшықты-оптикалық байланыс желісінің құрылымы [2]

Жарық сигналдарының көзі ретінде жарық диодтары немесе лазерлік диодтар қолданылады. Қабылдағыштар – жартылай өткізгіш фотодиодтар. Оптикалық талшыққа сәулеленуді енгізу тиімділігін арттыру үшін оптикалық талшықтың өзегінің өлшемдерімен оптикалық талшықтың апертурасын сәулеленудің бағыт диаграммасымен келістіруді қамтамасыз ететін оптикалық жүйелерді пайдалану қажет. Мұндай оптикалық жүйе ретінде линзалардың түрлі типтері немесе сәуле шығару көзінен сәуленің жүрісін өзгертетін басқа элементтер болуы мүмкін [3].

Оптикалық қуаттың жоғалуын азайту мақсатында чип-на-платада жарықдиодты модулінен сәуле шығарудың оптикалық жүйелерін оңтайландыру және лазерлік диодтың сәулеленуін оптикалық талшыққа беру міндеттерін шешу осы жұмыстың өзектілігін негіздейді.

Жұмыс мақсаты – чип-на-платада жарықдиодты модулінен сәуле шығаруды шығарудың оптикалық жүйелерінің тиімділігін арттыру және оптикалық талшыққа лазерлік диод сәулеленуін беру.

Осы мақсатқа жету үшін келесі негізгі міндеттер шешілді:

1) Чип-на-платада жарықдиодты модульдерінің есептік моделін әзірлеу және жүргізілген эксперименттердің нәтижелері негізінде оны верификациялау.

2) Чип-на-платада жарықдиодты модульдерінің параметрлік есептеулерін жүргізу, ол оптикалық жабынның үстіңгі бетінің нысанын оңтайландыруды, төсеніштің, орналасуының, чиптердің мөлшері мен санын, люминофор бөлшектерінің орташа радиусын бейнелейтін және шашырататын қасиеттерін оңтайландыруды қамтиды.

3) Оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді таратудың есептік моделін әзірлеу және әдебиетте бар эксперименттік деректер негізінде оны верификациялау.

4) Лазерлік сәулеленуді оптоталшыққа берудің параметрлік есептеулерін жүргізу, оған келісуші элементтерді оңтайландыру да кіреді.

Жұмыс кезінде ZEMAX® бағдарламалық кешенінде Чип-на-платадағы жарық диодты модульдерден Жарық шығарудың есептік моделі әзірленді және верификацияланды. Чип-на-плата модулінде өтетін оптикалық үдерістерді егжей-тегжейлі зерттеу және оптикалық қуат шығынын төмендету мақсатында модульдің оптикалық компоненттерін оңтайландыру жүргізілді. ZEMAX® бағдарламалық кешенінде оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленудің есептік моделі әзірленді және верификацияланған. Әр түрлі келісуші элементтермен оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді берудің параметрлік есептеулері жүргізілді.

Жұмысты орындау барысында чип-на-плата жарықдиодты модулінің қолданыстағы конструкциясы оңтайландырылды және оңтайландырылған модульдердің тәжірибелі үлгілері дайындалды. Конструктивтік элементтерді оңтайландыру есебінен Чип-на-плата жарықдиодты модульдерінде оптикалық қуаттың шығынын төмендету бойынша жалпы ұсынымдар әзірленді. Әр түрлі келісуші элементтермен оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді берудің параметрлік есептеулері жүргізілді [4].

Бірінші тарауда жеке чиптерден жарық шығару тиімділігін арттыру әдістеріне, чип-на-платадағы жарықдиодты модульдерінен жарық шығару тиімділігін арттыру әдістеріне шолу, люминофор сипаттамаларының жарық диодтардан жарық шығаруға әсерін зерттеу, оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату үшін оптикалық жүйелерді зерттеу кіреді.

Екінші тарауда чип-на-платадағы жарықдиодты модульдерді және оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді таратудың оптикалық жүйелерін зерттеу және оңтайландыру үшін осы жұмыста қолданылған эксперименталдық және сандық әдістердің сипаттамасы келтірілген.

Үшінші тарауда люминофоры жоқ жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру жүргізілді. Люминофоры жоқ чип-на-платада

жарықдиодты модульдерінің эксперименттік үлгілері дайындалды және олардың энергетикалық және гониометриялық сипаттамалары өлшенді, люминофоры жоқ чип-на-платада жарықдиодты модульдерін есептеу үшін ZEMAX® бағдарламасында есептеу моделі әзірленді және верификацияланды. Чип-на-платада оптикалық жабынның нысанын оңтайландыруды, өзара орналасуды, чип-на-платада төсенішіндегі жарықдиодты чиптердің мөлшері мен санын, Чип-на-платада төсемінің шағылысатын және шашырайтын қасиеттерін бейнелейтін оптикалық жабынның қалыңдығын оңтайландыруды қамтитын чип-на-платада жарықдиодты модульдерін оңтайландыру есептері жүргізілді. Есептеу нәтижелері келтірілген және конструктивтік элементтерді оңтайландыру есебінен чип-на-платадағы жарықдиодты модулдерінде оптикалық қуаттың шығынын төмендету үшін жалпы ұсынымдар әзірленді.

Төртінші тарауда люминофор бар жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру жүргізілді. Люминофоры бар чип-на-платада жарықдиодты модульдерінің эксперименттік үлгілері әзірленді және олардың энергетикалық сипаттамалары өлшенеді, люминофоры бар чип-на-платада жарықдиодты модульдерін есептеу үшін ZEMAX® бағдарламасында математикалық (есептік) модель әзірленді және верификацияланды. Оптикалық жабынның әр түрлі материалдарына арналған чип-на-платадағы жарықдиодты модулінде оптикалық қуатты жоғалтуға люминофор бөлшектерінің орташа радиусының әсерін зерттеу жүргізілді. Люминофоры бар оптикалық жабынның әр түрлі формасымен чип-на-плата модулінің параметрлік есептері жүргізілді. Құрамында люминофор бар және коррелирленген түс температурасы (2700-6500 К), оптикалық жабын бетінің пішіні, чиптердің саны мен өлшемі бойынша ерекшеленетін чип-на-платада жарықдиодты модульдерінің тәжірибелік партиясы дайындалды. Олардың фотометрлік, энергетикалық және спектрлік сипаттамалары өлшенді.

Бесінші тарауда лазерлік диодтың сәулеленуін есептеу модельдері және осы сәулеленуді оптикалық талшыққа берудің оптикалық жүйесі сипатталған. Әр түрлі сәйкестендіру элементтерін қолдана отырып, лазерлік сәуленің оптикалық талшыққа ауысуының есептеулері жүргізілді, оптикалық қуаттың жоғалуы ең аз болатын параметрлер анықталды.

## **1.1 Жартылай өткізгіш аспаптар**

Жартылай өткізгіш аспаптар – бұл жартылай өткізгіштерден жасалған электронды аспаптардың кең класы. Бұл жұмыста екі типті жартылай өткізгіш оптоэлектронды аспаптар: жарықдиодты және лазерлік диодтар негізіндегі құрылғылар қарастырылды.

Светодиодтарды әртүрлі белгілері бойынша жіктеуге болады. Алайда, бірінші кезекте барлық светодиодтарды екі бөлек топқа бөлуге болады:

органикалық емес және органикалық жарық диодтары. Органикалық емес светодиод (Light-Emitting Diode, LED) — құрылымы тек бейорганикалық қосылыстардан тұратын светодиод, ал органикалық светодиод (Organic Light-Emitting Diode, OLED) — қабаттар құрылымына органикалық қосылыстар кіретін светодиод. Қуатты жарық диодты шамдарды өндіру үшін органикалық емес жарық диодтары қолданылады.

Жарықдиодты чип дайындау таңдалған төсеніште жартылай өткізгіш гетероқұрылымды қабаттап өсіруден басталады. Алынған гетероқұрылымның сәулеленетін жарық толқынының ұзындығы оның құрамы мен физикалық қасиеттеріне байланысты (1.1 – кесте). Жарықдиодты чиптің тиімділігін бағалау үшін келесі шамалар қолданылады: ішкі кванттық тиімділік ( $\eta_{int}$ ), жарық шығару тиімділігі (light extraction efficiency, LEE,  $\eta_{extraction}$ ) және сыртқы кванттық тиімділік ( $\eta_{ext}$ ). Ішкі кванттық тиімділік дегеніміз - жарықдиодты чипте пайда болған фотон санының берілетін электрондар санына қатынасы. Қазіргі заманғы жарықдиодты микросхемаларда ішкі кванттық тиімділігі бірлікке жақын, яғни әр электрон фотонды шығарады. Жарық шығару тиімділігі дегеніміз – жарықдиодты чиптен шығарылған фотон санының жарықдиодты чипте пайда болған фотон санына қатынасы. Сыртқы кванттық тиімділік дегеніміз - жарықдиодты чиптен шығарылған фотон санының берілетін электрондар санына қатынасы немесе ішкі кванттық тиімділік пен жарық шығару тиімділігінің өнімі [5].

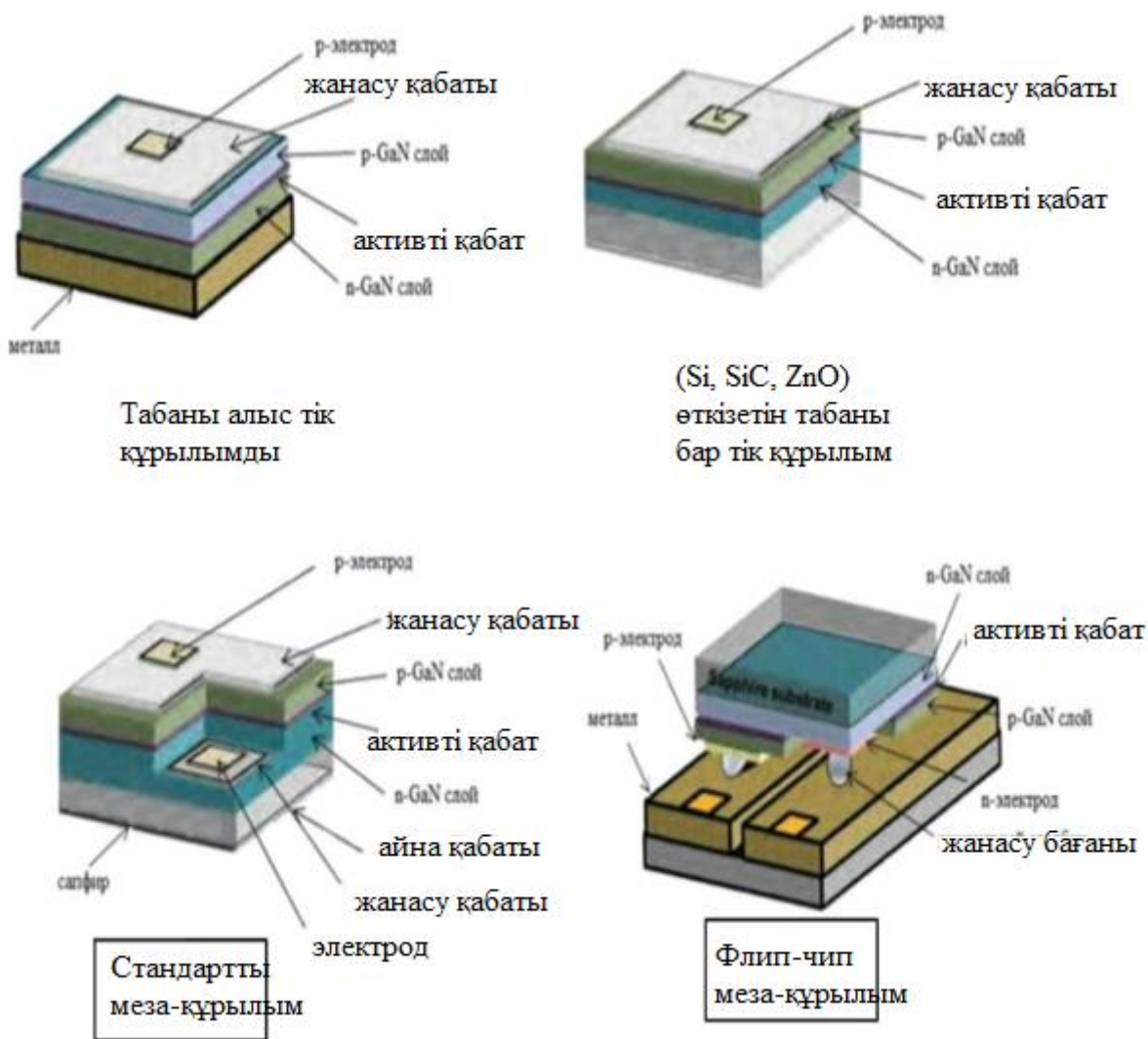
Кесте 1.1 - Жарық диодты жарықтандырудың түрлі спектрлерінің белсенді аймағының материалдары

Түс	Толқын ұзындығы, нм	Белсенді аймақтың материалы
Инфрақызыл	700-1450	GaAs, GaAlAs(P), GaInAs(SbP)
Қызыл	640-700	InGaP, GaP, GaAsP, GaAlAs
Қызыл-қызғылт сары	625-640	InGaAlP, GaP
Қызғылт-сары	615-625	InGaAlP, GaP
Кәріптас (Янтарные)	600-615	InGaAlP, GaP
Сары	585-600	InGaAlP, GaP
Сары-жасыл	555-585	InGaN, GaP
Жасыл	555-520	InGaN, GaP
Жасыл-көкшіл	480-520	InGaN
Көк	450-480	InGaN
Күлгін	400-450	InGaN
Ультракүлгін	210-400	GaN, AlN

Жарық диодынан жарық шығару тиімділігі гетероқұрылымның физикалық сапасына, яғни онда ішкі ақаулар мен қоспалардың болуына,

сондай-ақ чип құрылымына: қабаттар мен контактілердің орналасуына, сондай-ақ олардың пішіні мен мөлшеріне байланысты [6].

Жартылай өткізгіш чип құрылымының төрт негізгі түрін атап көрсетуге болады: стандартты меза-структура, флип-чип меза-құрылым, алыстан төсеніші бар тік құрылым және өткізгіш төсеніші бар тік құрылым (1.2–сурет).



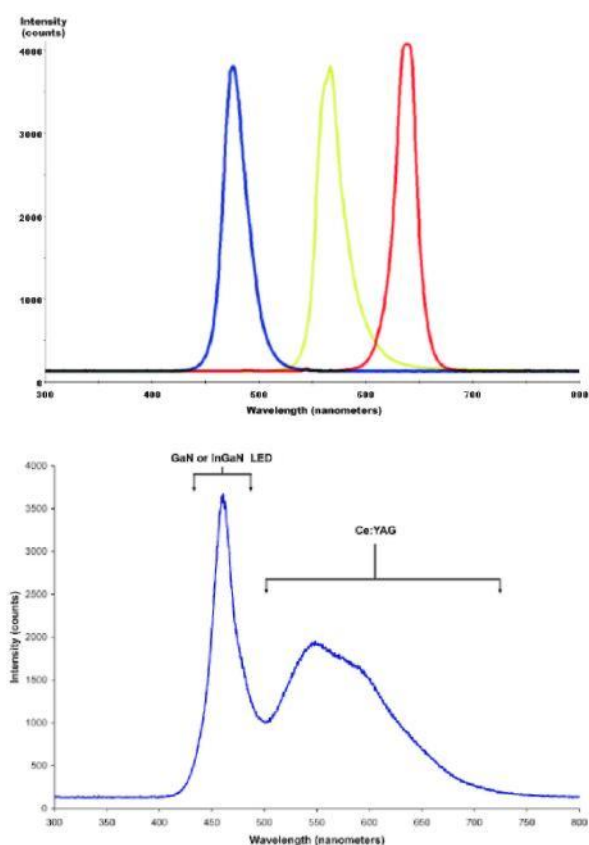
Сурет 1.2 - Жарықдиодты чиптерінің құрылымы

Үй-жайларды жарықтандыру үшін ақ жарық диодтар қолданылады. Ақ түсті светодиодтарды екі негізгі топқа бөлуге болады[7,8,9]:

1) RGB – түрлі түсті жарықдиодты бір уақытта пайдалану арқылы ақ түс алатын жарық диодтары. Ең кең таралған трихроматикалық дизайн қызыл (R), жасыл (G) және көк (B) көздерден [7].

2) Люминофорлы жарық диодтары – жарықдиодты чип негізінде жасалатын, көк, күлгін немесе ультракүлгін сәулеленуге ие, люминофоры бар материалмен қапталған жарық диодтары. Люминофор жарықдиодты чиптің сәулеленуінің бөлігін спектрдің сары аймағында кең таралған сәулеленуге түрлендіреді [8].

Осы әдістердің әрқайсысының өз артықшылықтары мен кемшіліктері бар. RGB – светодиодтарды қолданатын шамдарда түстерді басқару мүмкіндігі оларды сәндік жарықтандыруда, электрондық таблода және бейне экрандарда пайдалану үшін перспективалы етеді. Ақ RGB – жарықдиодты дайындау үшін бір көзде бірден үш жарық диодты пайдалану және түсті басқару мүмкіндігі үшін реттеуші құрылғыларды пайдалану қажет [10]. RGB-светодиод спектрі спектрдің көк, жасыл және қызыл диапазонында үш айқын сәулелену жолақтары бар (3,а – сурет), сондықтан RGB – жарықдиодтың түс беру индексі (CRI) төмен, бұл жарық диодтарын үй-жайларды жарықтандыру үшін перспективалы емес етеді. Ақ люминофорлы жарықдиодты пайдалану үй-жайлар мен көшелерді жарықтандыру үшін қолайлы, өйткені олар ең жақсы түс беруді қамтамасыз етеді және RGB қарағанда жоғары энергия тиімділігі ерекшеленеді [9, 10].



Сурет 1.3 - Типтік спектр: а) RGB-жарықдиоды; б) көк GaN немесе InGaN жарықдиодтарды және иттрий люминофорлық жабынды пайдаланатын люминофорлы жарық диоды

Люминофорлы жарық диодтың конструкциясында ең көп тараған галлий нитридінің (GaN) негізінде жасалған көк жарық диодты чип, иттрий люминофоры-үш валентті (ИАГ, YAG: Ce) легирленген алюминий гранаты бар [11]. Осындай жарықдиодтың спектрі галлий нитридіне негізделген жарықдиодты чиптің радиациялық толқын ұзындығына, спектрдің жасыл, көк-жасыл аймағына түсіп, спектрдің сары аймағында кең таралуына байланысты көк аймақта шыңға ие болады (1.3,б – сурет).

Ақ люминофорлы Жарық диодтың коррелирленген түс температурасы мен түс беру индексі сияқты колориметриялық сипаттамалары пайдаланылған жарық диодты чиптің сәуле шығару толқынының ұзындығына және люминофорлы жабынның құрамына байланысты.

Лазерлік диод – диод негізінде құрылған жартылай өткізгіш лазер. Оның жұмысы заряд тасығыштардың инжекциясы кезінде р-п өту аймағында орналасу инверсиясының пайда болуына негізделген. Лазерлік диодтар өнеркәсіптің, медицинаның, спектроскопияның, оптикалық деректер берудің, қатты денелі лазерлерді және т. б. әр түрлі салаларында қолданылады. Монохроматикалық, когеренттілік және жиіліктің тұрақтылығы лазерлік сәуленің оптикалық талшықта аз шығынмен таралуына мүмкіндік береді. Пассивті режимді құлыптауы бар лазерлер (ПСМ бар лазерлер) байланыс жүйелерінде талшықты-оптикалық байланыс желілері бойынша сигналдарды тарату үшін сәуле көзі ретінде пайдаланылатын пикосекунд импульстарын құруға мүмкіндік береді [12]. ПСМ лазерлерінің артықшылығы – ықшамдық, аз қуат тұтыну, импульстің ұзақтығының қолайлы сипаттамасы және импульсті қайталау жылдамдығы, жұмыс толқындарының ұзындығы оптикалық талшықтың мөлдір терезелерімен сәйкес келуі. 1300–1550 нм спектрлік диапазонды пайдалану оптикалық байланыс жүйелерінде тиімді, өйткені кварцтық оптикалық талшықтың екі мөлдір терезесі осы диапазонға түседі [13]. ПСМ лазерлерінің негізгі сипаттамалары сәулелену толқынының ұзындығы, импульстің қайталану жиілігі және қуаты болып табылады, олар лазер мен лазерлік конструкцияда қолданылатын эпитаксиалды гетероструктурамен анықталады. Ұзақ уақыт бойы ПСМ лазерлерінің көпшілігі InGaAsP/InP гетероструктуралары негізінде жасалды. Алайда, жақында AlInGaAs/InGaAs негізіндегі құрылымдардың ПСМ лазерлерінің температуралық тұрақтылығын жақсартатын өткізгіштік диапазондағы жоғары энергия және валенттік диапазондағы төменгі ажыратулар сияқты бірнеше артықшылықтары бар екендігі көрсетілді [14]. Бұдан басқа, [15] жұмыста көрсетілгендей, мұндай құрылымдарда қанықтырылған жұтқыштың қалпына келу уақыты аз, бұл импульспен джиттер ұзақтығы (уақытша дірілдің орташа квадраттық мәні) сияқты лазердің уақытша сипаттамаларын да жақсартады.

Лазерлік сәуле оптикалық талшықпен енгізіледі, оның соңында жарық фотоқабылдағышқа түседі. Оптикалық талшыққа сәулеленуді енгізу тиімділігін арттыру үшін оптикалық талшықтың өзегінің өлшемімен көздің сәулелену дақтарының мөлшерін келісуді қамтамасыз ететін оптикалық талшықтың апертурасын сәулелену көзінің бағыттылық диаграммасымен және оптикалық осьтердің аздаған ауытқулары жағдайында сәулеленудің төмен жоғалуын келісуді қамтамасыз ететін оптикалық жүйелерді пайдалану талап етіледі (орналасу және көлбеу бұрышы бойынша). Мұндай оптикалық жүйе ретінде линзалардың түрлі типтері немесе сәуле шығару көзінен сәуленің жүрісін өзгертетін басқа элементтер болуы мүмкін. Оптикалық талшыққа сәулеленуді енгізу тиімділігі (77 оптикалық қуатты беру коэффициенті)



оптикалық талшықтан шығудағы сәулеленудің кіріс қуатының (лазердің сәулеленудің шығу қуатының) сәулелену қуатына қатынасы ретінде анықталады, енгізілетін шығындар децибелдерде ара қатынасынан өлшенеді:

$$q = -10 \lg f_0 \quad (1.1)$$

Оптикалық жүйелерді сандық модельдеу үшін Монте-Карло сәулелерін трассалау әдісін және осы әдіске негізделген бағдарламалық құралдарды (ZEMAX®, LightTools®, TracePro®) қолданады [16].

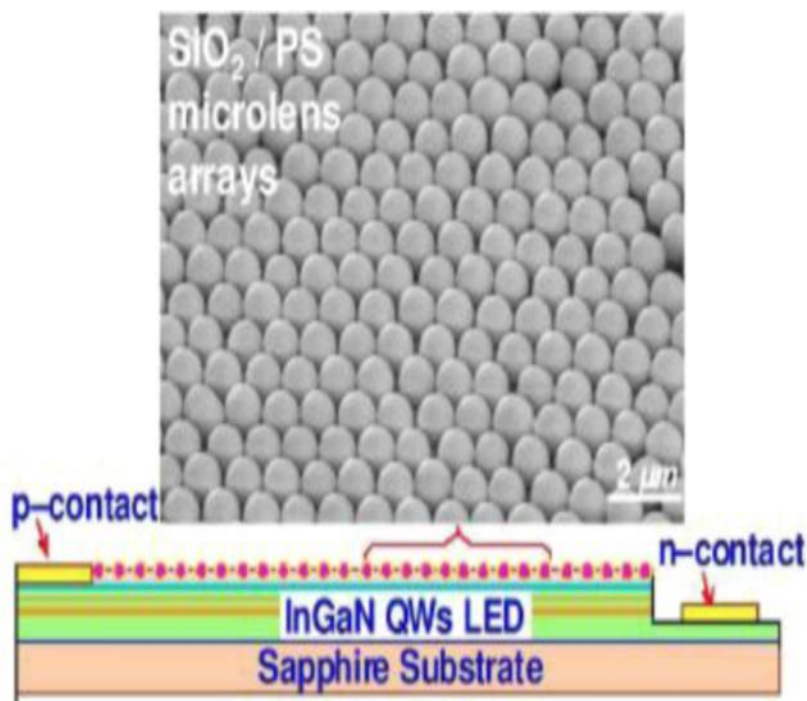
## **1.2 Жеке жарықдиодты чиптерден жарық шығару тиімділігін арттыру әдістері**

Жеке жарықдиодты чиптерден жарық шығару тиімділігін арттыру мәселесі қазіргі әдебиетте кеңінен жарияланған. [17] шолу жарықдиодты чиптерден жарық шығару тиімділігін арттырудың негізгі тәсілдерін сипаттайды. Бұл мақалада оптикалық қуатты жоғалтудың негізгі себебі ретінде чип материалының сыну көрсеткіштерінің үлкен айырмашылығынан (III топтағы нитридтер үшін шамамен 2.5 жарықдиодты чипінде жарық ("Light escape" problem) құлыптау қарастырылады, сондықтан тәсілдердің басым бөлігі осы мәселені шешуге бағытталған. Сипатталған тәсілдердің көпшілігінде жарықдиодты чиптің модификациясы (пішіннің өзгеруі, чиптің бетіне текстуралау, чиптің дизайнындағы әртүрлі шағылыстырғыштарды пайдалану және т.б.) жатады [18].

Чип беттерін текстуралау жарықдиодты чиптердің энергия тиімділігін арттырудың ең танымал әдістерінің бірі болып табылады. Төменде жарық шығаруды жақсарту, әртүрлі чип беттерінің текстурасы ұсынылатын жұмыстар қарастырылады.

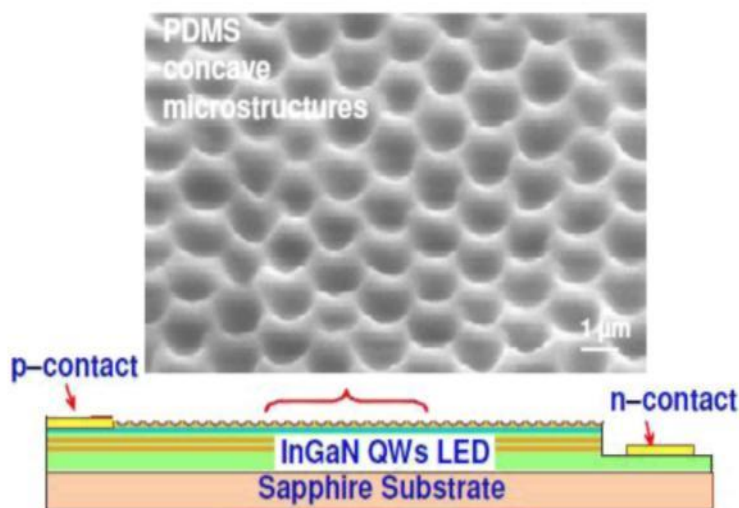
p-GaN жоғарғы бетіне  $SiO_2$  микросфералары бар полистиролдың жұқа қабатын жағу ұсынылды, ол Чип бетінде микролинздан массив түзеді (1.4–сурет), бұл жарықдиодты чип/ауа шекарасындағы толық ішкі көрініске (ПВО) түспейтін жарық мөлшерін ұлғайтуға мүмкіндік береді. Алынған тәжірибелік нәтижелер бастапқы чиппен салыстырғанда жарық шығару тиімділігін 2.49 – 2.64 есе (микросфераның диаметріне байланысты) арттыру мүмкіндігін көрсетеді, есептік нәтижелер 1.75 – 2.08 есе ұлғаюын көрсетеді [19].





Сурет 1.4 - Микросферадан жасалған жабыны бар жарықдиодты чип [17]

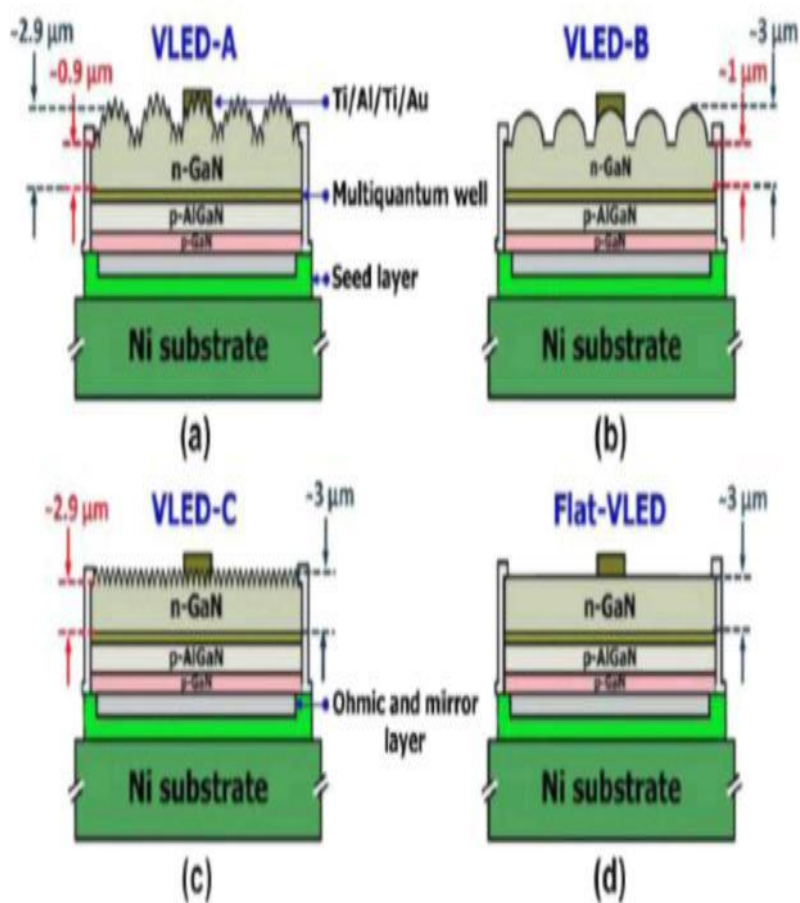
Осыған ұқсас әдіс [18] қаралды, мұнда p-GaN жоғарғы бетіне полидиметилсилоксанның қабаты салынған, оның беті тереңдеу массивімен текстураланған (1.5-сурет). Жұмыста тәжірибелік үлгілерге эксперименттік өлшеу және Монте-Карло сәулелерін трассалау әдісімен сандық зерттеу жүргізілді. Алынған эксперименталды нәтижелер бастапқы чиппен салыстырғанда жарық шығару тиімділігін 1.7 – 1.77 есе (микросфераның диаметріне байланысты) арттыру мүмкіндігін көрсетеді, есептік нәтижелер 1.5 – 2 есе ұлғаюын көрсетеді. Мысалы, бұл жұмыс барысында екі жұмыста да, эксперименталды зерттеулер сандық үлгілеуді болжауға қарағанда, жарық шығару тиімділігінің үлкен өсуін көрсетеді[20].



5 – сурет. Текстураланған беті бар жарықдиодты чип [18]

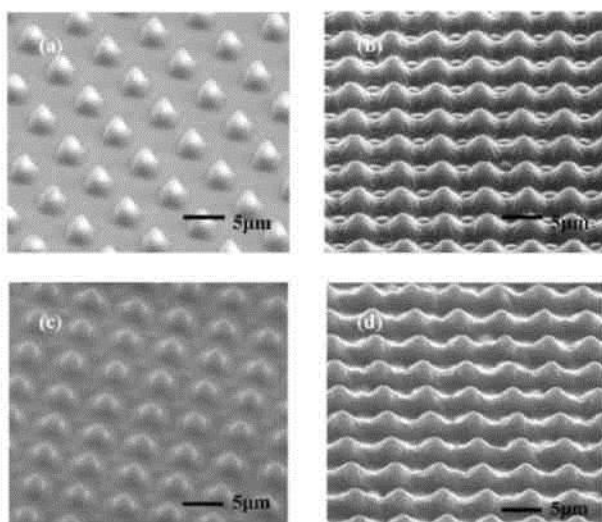
Жарық диодты чиптің бетін текстурациялаудан тұратын жарық шығарудың тиімділігін арттыру үшін ұқсас тәсіл тік чиптер үшін [19,20] және флип-чиптер үшін ұсынылған [21,22,23].

Тік чиптер қарастырылды, онда n-GaN-дің жоғарғы беті конустық құрылым түрінде кедір-бұдырлы, оған сұйық тарту арқылы қол жеткізіледі, ал эксперименттік және теориялық зерттеулер жарық шығару тиімділігінің екі есе артуын көрсетеді. Ұқсас тік чиптер қарастырылған, бірақ N-GaN жоғарғы бетінде күрделі текстуралары бар: кедір-бұдырлығы, микролинзалар, кедір-бұдырлығы бар микролинзалар (1.6-сурет). Эксперимент нәтижелері көрсеткендей, беттегі кедір-бұдыр микролинздері бар чиптер жазық беттегі чиптермен салыстырғанда жарық шығару тиімділігін 95% - ға арттыруға мүмкіндік береді.



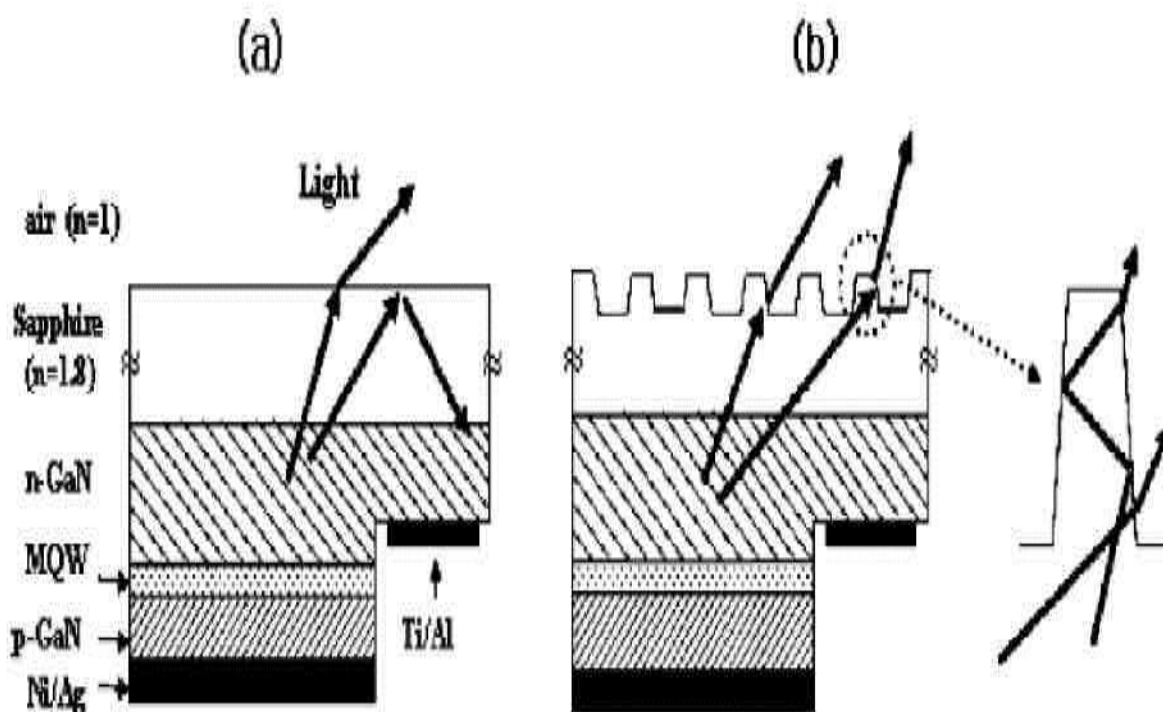
Сурет 1.6 - Беттегі әртүрлі текстуралары бар және беті тегіс тік чиптер [24]

Бет жағында үшбұрыш және синусоидальды профилі бар микротекстурасы бар мөлдір полимер салынған флип-чиптер қарастырылған (1.7-сурет). Микротекстура импринт-литография арқылы жасалады. Үшбұрышты және синусоидальды профильді чиптен жарық шығару тиімділігі тегіс беткейлі чиппен салыстырғанда сәйкесінше 32% және 47% артқандығы көрсетілген.



Сурет 1.7 - Полимерлі жабынның бетіндегі әр түрлі текстуралар [21]

Сондай-ақ, сапфирдің текстураланған беті бар флип-чиптер де қарастырылған (1.8-сурет). Сапфир бетін текстуралау құрғақ өңдеу әдісімен жүргізілді, түрлі тереңдіктегі текстуралары бар бірнеше эксперименттік үлгілер жасалды. Бұл әдіс ағытылмаған чиптермен салыстырғанда жарық шығару тиімділігін 40.2% - ға арттыруға мүмкіндік береді [25].



Сурет 1.8 - Текстурленбеген және текстурленбеген беті бар Флип-чиптер [22]

Сапфирдің беті тегіс болды, соның арқасында ол қатты құрылымға ие болды. Эксперименталды түрде өрілген сапфирдің жарықдиодты чиптерінің

оптикалық қуаты тегіс сапфир бетіне ұқсас микросхемаларға қарағанда 35% артық екендігі анықталды [26].

### **1.3 Жарық диодты чип-плата модульдерінен жарық шығару тиімділігін арттыру әдістері**

Жоғарыда айтылған чип-плата технологияны қолдану арқылы жиналған жарықдиодты модульдер жеке қарастыруды қажет етеді.

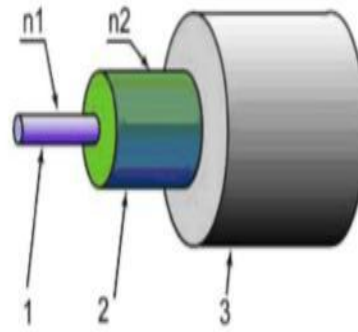
Жарықдиодты чип-на-плата модулінің конструкциясы люминофор болуы мүмкін және қорғаныс функциясын, соның ішінде орындайды оптикалық жабынның жалпы қабатымен жабылған жарықдиодты чиптер орналасқан төсеніш болып табылады. Корпустық жарықдиодтармен салыстырғанда чип-на-плата модульдерінің бірқатар артықшылықтарын атап өтуге болады: арзан өндіріс, жоғары меншікті қуат, шағын өлшемдер, монтаждың ыңғайлылығы. Чип-на-плата модулінің басты кемшілігі ретінде модульдің дизайн ерекшеліктерімен байланысты оптикалық қуаттың қосымша жоғалуын қарастырған жөн: жарықдиодты чиптер бір-біріне жақын, бұл өзара жарықтың сіңуіне әкеледі. Оптикалық жабынның және ауаның шекарасында толық ішкі көрініске ұшыраған сәулелер энергиясы жартылай чип-на-платада модулінің конструкциясының элементтерімен жұтылады. Әрбір чип жарық шағылыстырғыш корпуста тұратындықтан, корпустық жарықдиодты өзара жарықты чиптермен сіңіру конструкциясында болмайды. Оптикалық жабынмен және төсенішпен жарықты сіңірумен байланысты жарық жоғалтулары чип-на-плата модуліне және корпустық жарықдиодтарға тән [27].

Жеке чиптер үшін жарық шығару тиімділігін арттыру үшін қолданылатын кейбір тәсілдер (атап айтқанда, конструкцияның беттерін текстуралау) чип-на-плата модулінде жарықдиодты жинақтарына да қолданылады [28].

### **1.4 Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату үшін оптикалық жүйелерді зерттеу**

Оптоталшықты кабель, әдетте, дөңгелек қимасы бар және үш қабаттан тұрады: өзекше, шағылыстырғыш қабық және қорғаныс қабығы. Өзекше – орталық жарық бағыттағышының өзекшесі, оның сипаттамалық радиусы бір режимді талшықтар үшін 2 – 5 мкм және мультимодты талшықтар үшін 20 – 30 мкм құрайды. Шағылыстырғыш қабық мөлдір болып табылады, оның сыртқы радиусына тән мәні 50 – 70 мкм. Қорғаныс қабығы мөлдір емес

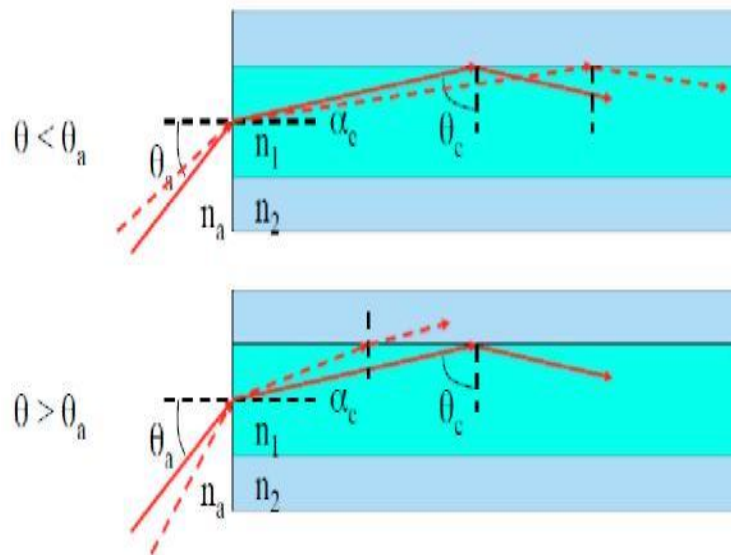
полимерлі материалдан жасалады, қорғаныс қабығы бар оптоалшықты кабельдің сыртқы радиусының тән мәні 500 – 1000 мкм кұрайды (1.9-сурет).



Сурет 1.9 - Оптикалық талшықты кабельдің құрылымы: 1 –  $n_1$  сыну көрсеткіші бар өзек; 2 –  $n_2$  сыну көрсеткіші бар шағылыстырғыш қабық; 3 – мөлдір емес қорғаныс жабыны.

Оптикалық талшықтың ең маңызды қасиеті-өте аз шығындармен сәулеленуді үлкен қашықтыққа тасымалдау қабілеті (1550 нм толқын ұзындығында шамамен 0.2 дБ/км). Оптикалық талшықтың өзекшесінде жарықтың таралуы өзекше/қабықша шекарасында толық ішкі шағылысу есебінен жүреді (1.10–сурет), оған  $\theta$  өзегінің сыну көрсеткішінің және  $\theta$  қабығының сыну көрсеткішінің әртүрлілігі есебінен қол жеткізіледі ( $n_1 > n_2$ ) [29]. Оптикалық талшықтың маңызды параметрлерінің бірі –  $NA$  сандық апертура, ол оптикалық талшықтың апертуралық бұрышынан синус болып табылады. Апертуралық бұрыш – оптикалық талшықтың өзегі бойынша оптикалық сәулеленуді тарату кезінде толық ішкі шағылысу шарттары орындалатын бұрыш. Сандық апертураны мына формула бойынша анықтауға болады [30]:

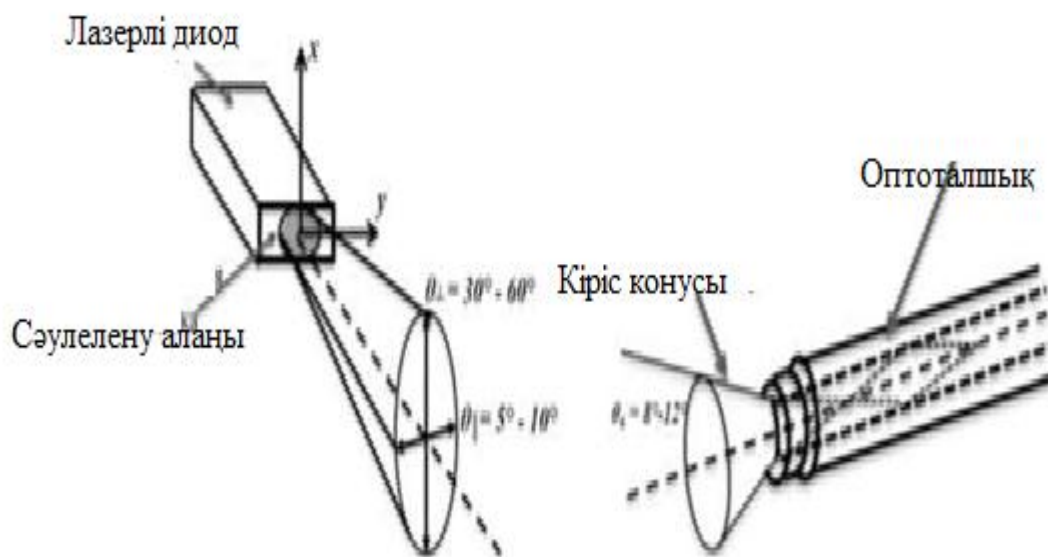
$$NA = n_a \sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



Сурет 1.10 - Өзекше/қабықша шекарасында толық ішкі көрініс

Оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді енгізу үшін сәулелену көзінің оптикалық талшықтың шетімен оптикалық түйісуі қажет. Лазер мен оптоталшықты тікелей түйістіру – лазерлік сәулеленуді оптоталшыққа берудің ең оңай жолы. Бұл жағдайда оптикалық талшықтың шеткі беті талшықты оптикалық осіне перпендикуляр, ол лазерлік сәулеленудің оптикалық осімен сәйкес келеді. Бұл жағдайда сәуле шығару тиімділігі өте төмен [31].

Лазерлік диодтардың көпшілігінің белсенді қабатының қалыңдығы  $d_x = 0.1 - 0.3$  мкм шегінде жатыр, ал ені  $d_y = 2 - 10$  мкм. Дифракцияның әсерінен лазер диоды шығаратын жарық ағыны көбірек кеңейеді, лазер диодының сәуле шығаратын ұшы азаяды, бұл тік  $\theta^\perp$  және көлденең бағытта сәулеленің дивергенциясының бұрыштарының айырмашылығына әкеледі  $\backslash\backslash$ . Лазерлі диодтың сәулелік сәулесінің айырмашылық бұрыштарының сипаттамалық мәні  $\theta = 5^\circ - 10^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ - 60^\circ$ , яғни радиациялық қимасы тік бағытта үлкен осі бар эллипс формасына ие (1.11–сурет). Лазер диодының сәулелену нүктесінің өлшемдері әдетте оптикалық талшықтың диаметрімен кішірек немесе салыстырылады, ал тікелей қондырмалы оптикалық талшыққа радиацияны енгізудің төмен тиімділігі негізінен лазер диодының сәулелік сәулесінің айырмашылық бұрыштарының асып кетуіне байланысты ( $\theta = 5^\circ - 10^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ - 60^\circ$ ) – талшықтың диафрагмалық бұрышынан жоғары ( $\varphi_a = 8^\circ - 12^\circ$ ).



Сурет 1.11 - Лазерлік диодтың сәулелену диаграммасы және оптикалық талшықты кіру конусы

Оптикалық талшықты лазерлік сәуле шығару тиімділігін арттыру үшін бірнеше негізгі тәсілдер бар [32]:

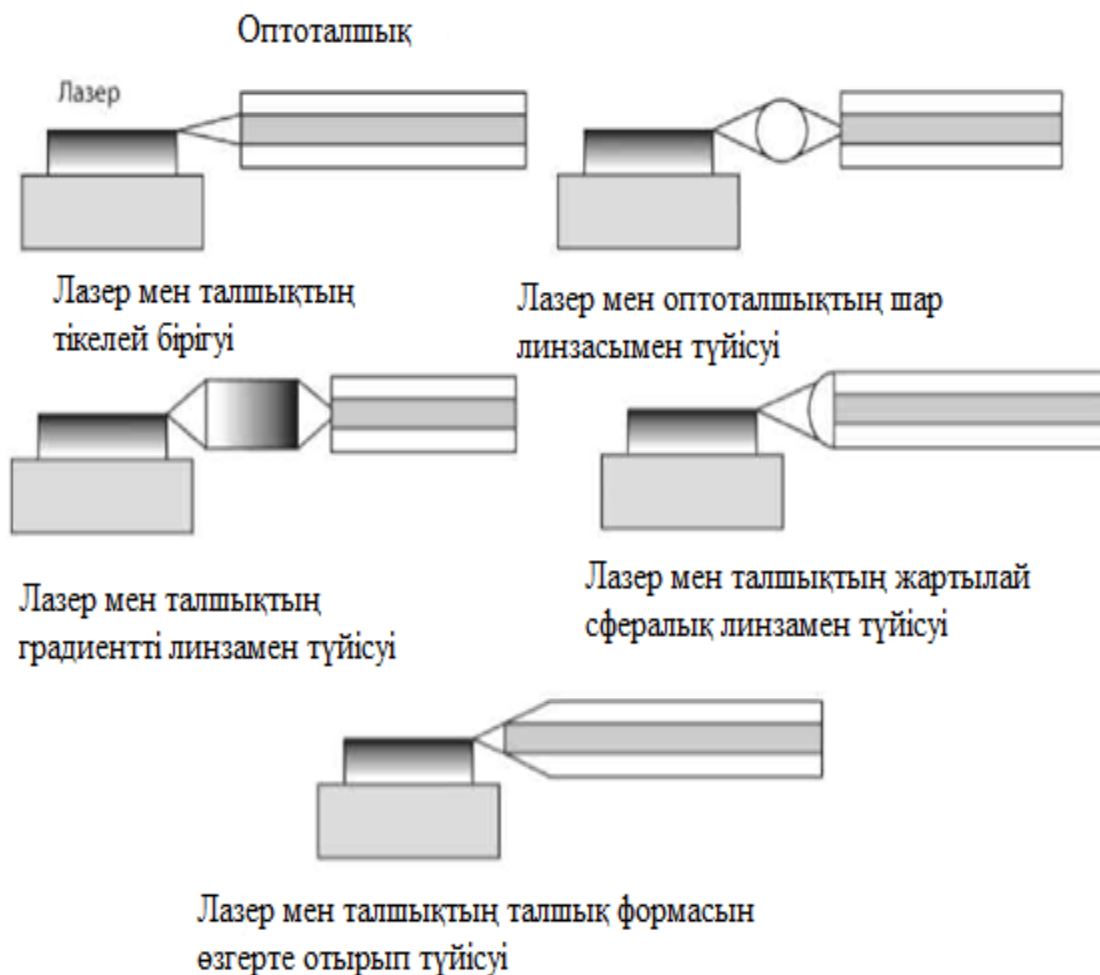
1) оптикалық талшық өзегінің өлшемдерімен сәулелену дақтарының өлшемдерін келісу мақсатында лазерді түрлендіру;



2) сәуле шығару көзінің бағыттылық диаграммасымен апертурлық бұрышын келісу мақсатында оптогалшықты түрлендіру;

3) лазер мен оптогалшық арасында келісілген оптикалық элементтерді пайдалану.

1.12-суретте лазерлік сәулеленуді оптикалық талшыққа енгізудің кеңінен қолданылатын әдістері бейнеленген, олар [33] қарастырылған: лазер мен оптогалшықты тікелей түйістіру, лазер мен оптогалшықтың арасында орналасқан оптикалық элемент арқылы түйістіру, лазер мен оптогалшықты торцтың текстурацияланған формасымен тікелей түйістіру.



Сурет 1.12 - Лазерлік сәулеленуді оптикалық талшыққа енгізу тәсілдері [34]

Көпмодтық оптикалық талшыққа лазерлік диодтың InGaAsP сәулеленуін енгізу шығындары эксперименталды өлшенген. Келесі оптикалық жүйелер қарастырылды (шығындарды көрсетумен): тура түйісу (6.4 дБ), шар линзасы арқылы түйісу (4.06 дБ), градиенттік линзасы арқылы жартылай сфералық аяқталуы бар түйісу (3.2 дБ), сфералық линзадан және тік бұрышты градиенттік линзадан жүйе арқылы түйісу (2.32 дБ), екі сфералық линзадан жүйе арқылы түйісу (2.82 дБ). Ұқсас оптикалық жүйелер қарастырылды, бірақ

бір режимді талшық, линзалар жүйесін қолдану арқылы шығынның минималды деңгейі 3 дБ болды.

Шар линзасын пайдаланып оптикалық талшыққа лазер сәулесін енгізу тиімділігіне теориялық талдау жасалды. Есептеу екі әдіспен жүргізілді: диэлектрлік сферадан шоғырдың шашырауы үшін Максвелл теңдеулерінің нақты шешімі және геометриялық және дифракциялық әдістің жиынтығы болып табылатын әдіс. Осы әдістер үшін тиімділіктің алынған оңтайлы мәндері тиісінше 48% және 56% құрады [35].

Әр түрлі оптикалық жүйелерді (шығындарды көрсете отырып) пайдаланатын бір модальды оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді (сәуленің дивергенциясының бұрышы  $\theta = 2 - 5^\circ$ ,  $\theta_{\pm} = 15^\circ - 30^\circ$ ), шығындар теориялық және эксперименталды түрде өлшенді: тікелей түйісу (6.2 дБ эксперимент, 5 дБ есептеу), градиенттік линзаны пайдалану (6.5 дБ эксперимент),  $r = 22; 16.7; 14.6; 12.5$  мкм радиусы бар цилиндрлік линзаларды қолдану (4.3; 2.3; 1.9; 1.8 дБ эксперимент), цилиндрлік линзаны және дөңгелек линзаны бірлесіп пайдалану (4 дБ эксперимент). Тиімділікті есептеу сәулелік матрица әдісімен жүргізілді.

Сонымен қатар, бір модальды талшыққа линзалар жүйесін қолдану арқылы титан-сапфир лазерінің сәулеленуін енгізу тиімділігін арттыру бойынша эксперименттер жүргізілді. 70% тиімділікке қол жеткізілді [36].

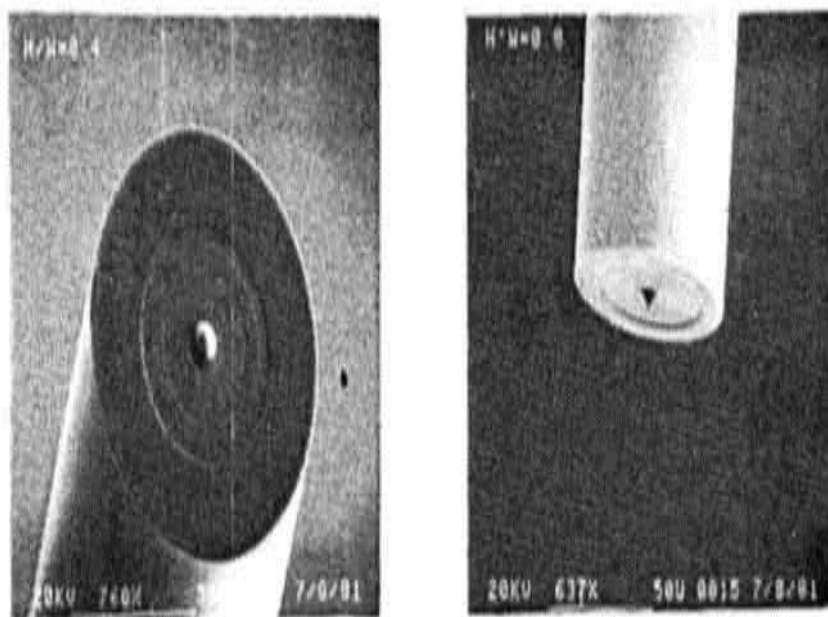
Сәулелік галлий арсенидінің лазерінен анаморфты градиент линзасы арқылы көп модальды градиент талшығына ауыстыру есептелді. Есептеу сәулелерді трассалау әдісі арқылы жүргізілді және оптикалық талшықтың қабығынан өзегіне түсетін Френель шығындары мен сәулелерді ескермеді. Есептеу көрсеткендей, анаморфты объективтің белгілі бір конфигурацияларын айнымалы сыну көрсеткіші 100% сәулеленудің тиімділігіне қол жеткізуге мүмкіндік береді, ал лазер мен оптикалық талшықтың тікелей байланысы тек 54% береді [37].

Оптикалық талшықтың түпкі бетінің пішінін өзгерту лазерлік сәулеленудің енуін жоғарылатудың негізгі әдістерінің бірі болып табылады, бұл әдіс қаралған. Бұл әдістің артықшылығы оптикалық жүйеге жеке тұрған оптикалық элемент енгізілмейді, сондай – ақ оптикалық талшықтың соңындағы линза автоматты түрде оптикалық талшықтың өзегіне сәйкес келтірілген.

Лазерлік сәулеленуді енгізу тиімділігін арттыру үшін негізі оптикалық талшықтың өзегіне сәйкес келетін конустық линзаны жасау үшін ішінара ысыру арқылы бір режимді оптикалық талшықтың беткі қабатын өзгерту ұсынылады (1.13–сурет). Алдын ала өңдеу арқылы алынған конустық линзаны шыныны отпен жылтырату арқылы өңдеуге немесе жартылай сфералық линзаны алу үшін доғалы пеште балқытуға болады. Тәжірибе мен есептеулерде лазер сәулесінің әртүрлі өлшемдері бар екі лазер зерттелді. Бірінші лазерде сәуленің мөлшері 1,55 мкм-ден 5,65 мкм-ге дейін болды. Жалпақ шеткі жағдайы үшін тиімділіктің есептік мәні – 64%, линзаны пайдаланған жағдайда – 67%, жалпақ шеткі жағдайы үшін эксперименталды



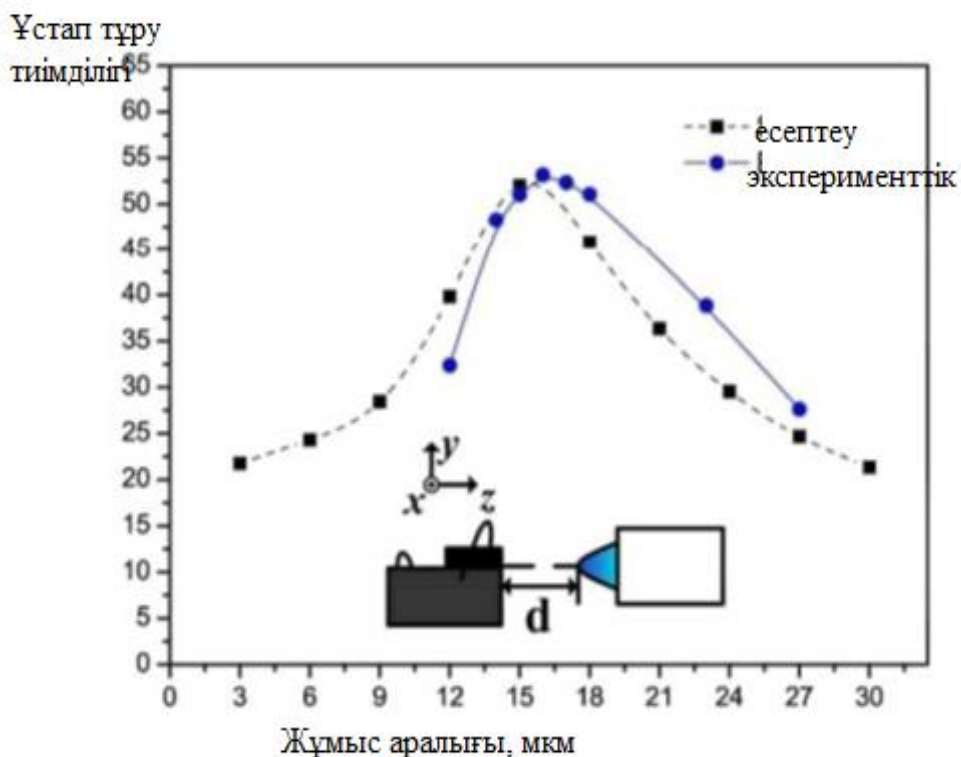
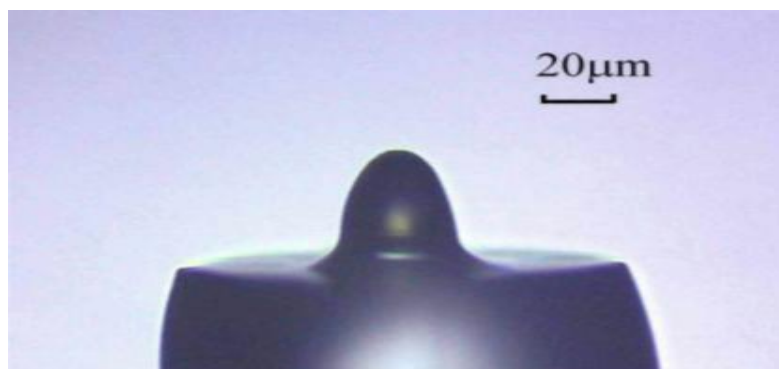
мәні – 51%. Екінші лазерде сәуленің өлшемі 1,05 мкм-ден 1,39 мкм-ге дейін болды. Жалпақ шеткі жағдайы үшін тиімділіктің есептік мәні – 26%, линзаны қолданған жағдайда – 78%, жалпақ шеткі жағдайы үшін эксперименталды мәні – 10% – дан кем, линзасы бар жағдай үшін – 49-52% [38].



Сурет 1.13 - Химиялық өңдеу әдісімен жасалған оптикалық талшықтың шетіндегі конустық линза [39]

Оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді енгізу қарастырылды, оның беті гиперболалық пішінге ие. Мұндай оптикалық талшықты өндіру әдісі өңделу кезінде талшықты симметриялы түрде тарылту және синтез процесі арқылы гиперболалық ақырғы линза қалыптастыру жолымен жасалған. Салыстырмалы өлшемдері 1:1,5 болатын лазер сәулесі және гиперболалық торциялы бір модалы талшық үшін енгізу тиімділігі 82% жетеді, дифракция теориясы бойынша есептелген тиімділік мәні 100% жуық.

Бір модалы оптикалық талшықтың соңында микроленс жасау әдісі жасалды (22,а-сурет) және әр түрлі соңғы радиустары бар линзаларға оптикалық талшыққа лазер сәулесін енгізудің тиімділігі, сондай-ақ тиімділіктің көзден оптикалық талшықтың қашықтығына тәуелділігі зерттелді (22,б-сурет). ZEMAX® бағдарламалық кешенінде эксперимент және теориялық есептер жүргізілді. Қол жеткізілген ең үлкен тиімділік 53.5% құрады [40].



Сурет 1.14 - а) оптикалық талшықтың шетіндегі линза; б) сәуле шығару тиімділігінің көзі мен оптикалық талшықтың арасындағы қашықтыққа эксперименталды және есептік тәуелділігі [41]

Сонымен қатар, оптикалық талшыққа лазерлік сәуле шығаруды енгізу қарастырылған, оның шеті дөңгелектелген тікбұрышты пирамида түрінде бүйірлі оптоталшыққа енгізу қарастырылған. Дифракциялық теория негізінде есептеу және дөңгелектеу радиусына байланысты сәулеленуді енгізу тиімділігін эксперименталды өлшеу жүргізілді. Ең жоғары алынған тиімділік 83% құрады.

Бір модальды оптикалық талшықтың соңында лазерлік сәулеленуді енгізу тиімділігін арттыру үшін ұшты фотополимеризация арқылы өсіреді, оның қисықтық радиусын өсу кезінде басқаруға болады. Оптикалық талшықтан сәуле шығару көзінің қашықтығына және ұштықтың қисық радиусына байланысты сәуле шығаруды енгізу тиімділігін эксперименталды өлшеу

жүргізілді. Сонымен қатар электр өрісін есептеу соңғы элементтер әдісімен жүргізілді. Қол жеткізілген ең жоғары тиімділік 70% құрады [42].

Берілген әдебиеттерді шолуды ескере отырып, осы жұмысты жүргізудің негізгі ынталандыру себептері мынадай болды:

1) Келесі параметрлердің модулінің энерготиімділігіне әсерін кешенді зерттеуді қамтитын чип-на-платадағы жарықдиодты модульдерден жарық шығаруды зерттеу: төсеніштің қасиеттерін бейнелейтін және шашырататын оптикалық жабынның бетінің пішіні, орналасуы, өлшемдері және жарықдиодты чиптердің саны, люминофор бөлшектерінің өлшемдері.

2) Zemax® бағдарламалық кешенінде чип-на-платадағы жарықдиодты модульдердің параметрлік есептеулері үшін математикалық модельдерді әзірлеу және верификациялау.

3) Оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді енгізу тиімділігін параметрлік есептеу үшін ZEMAX® бағдарламалық кешенінде математикалық модельдерді әзірлеу және верификациялау [43].

## 2 Зерттеу әдістері

Бұл жұмыста біз оптикалық жүйелерді зерттеудің екі негізгі әдісін қолдандық: математикалық (сандық) модельдеу және эксперименттік зерттеу. Жарықдиодты модульдердің прототиптерін эксперименттік зерттеу кейіннен оңтайландыру есептеулерінде қолдануға болатын сандық модельді тексеруге мүмкіндік береді. Лазер сәулесінің оптикалық талшыққа берілуін есептеудің сандық моделін тексеру модельдеу нәтижелерін әдебиетте келтірілген тәжірибелік нәтижелермен салыстыру арқылы жүргізілді. Оптимизация тұжырымдамасы модульдегі оптикалық қуаттың жоғалуы ең аз болатын оптикалық жүйенің параметрлерін анықтайды.

Борттық модульде жүретін оптикалық процестерді егжей-тегжейлі зерттеу құрылымдық элементтерді оңтайландыруға байланысты жарықдиодты модульдердегі оптикалық қуаттың жоғалуын азайтуға арналған жалпы ұсыныстарды жасауға мүмкіндік берді.

Жарықдиодты технологиялар және оптоэлектроника кафедрасында әзірленген пассивті режимді лазерлік сәулеленуді бір режимді талшыққа енгізудің оптикалық жүйесін оңтайландыру қарастырылады.

Бұл мәселелерді сандық модельдеуді шешу қымбат эксперименттік зерттеулерсіз оңтайлы дизайн параметрлерін таңдауға мүмкіндік береді.

### 2.1 Жарық диодты модульдердің оптикалық сипаттамаларын зерттеудің әдістері, оптикоталшыққа лазерлік сәуле тарату жүйелері

Есептеу модельдері SolidWorks 2010® және ZEMAX 2012® коммерциялық бағдарламаларында құрастырылған [44]. Есептеулер ZEMAX 2012® коммерциялық бағдарламасында жүргізілді. Бағдарламаның сандық алгоритмінде Монте-Карло әдісін тікелей сәулелерді бақылау әдісі қолданылады [45].

ZEMAX® бағдарламасында сәулені есептеу екі режимі бар: Секвенциалды режим және тізбекті режим, сәуленің бағытын есептеудің бірізді емес режимі (Секциялық емес режим). Сәулелік жолды дәйекті есептеу сәуленің алдын-ала белгіленген тәртіппен беткі қабатқа сәйкес келетіндігін білдіреді (сәйкесінше, бірінші беті пучка бірінші өтеді, екінші алдын-ала анықталған бет екінші және т.б.), сәйкес келмейтін есептеу режимінде сәулелер беткі қабаттың орналасу реті бойынша өтеді. Шынымен кездесіңіз (пучка бірінші бетінен өте алады, содан кейін бірден төртіншіге соқтығысады, содан кейін шағылысып, екіншіге оралады). Жарықтандыру жүйелерін сапалы есептеу үшін сәйкессіз сәулелік жолды пайдалану қажет.

Мәселелерді шешудің негізгі кезеңдері оптикалық жүйенің геометриясының міндеті, оптикалық жүйе элементтерінің материалдық

қасиеттерінің міндеті, сәулелену көздерінің міндеті, детекторларды орнату болып табылады. Барлық осы қадамдар төменде толығырақ қарастырылады.

Оптикалық жүйенің геометриясы. Бұл кезеңде геометриялық оптикалық жүйе элементтерінің сипаттамалары және олардың салыстырмалы жағдайы. Үшін зерттеліп жатқан борттық жарықдиодты модульге субстрат сұралды, Оптикалық талшыққа лазер сәулесін енгізу үшін жарықдиодты чиптер, оптикалық жабын, лазер көзінің өлшемдері мен оптикалық талшықтың элементтері: өзегі мен қабығы көрсетілген.

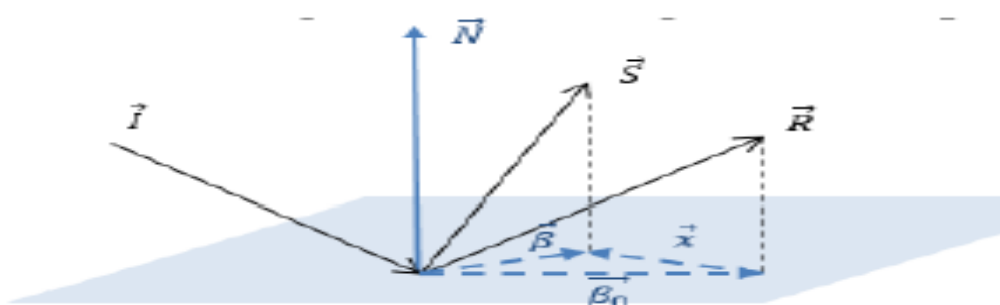
Материалдың қасиеттері. Әр объект үшін оптикалық сипаттамалары: сіңіру коэффициенті, шағылысу заңдылықтары және радиациялық шашырау, сыну көрсеткіштері, көлемнің шашырауы.

Нысанның мөлдір емес бетіндегі радиациялық оқиғаның шашырауы Bi-Directional Scatter Distribution функциясы (BSDF) арқылы сипатталған:

$$BSDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\theta_s, \varphi_s)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2.1)$$

мұндағы  $L$  – жарықтылық;

$E$  - жарықтандыру, сәуленің вольярлық координаттары, қалыпты және азимуталды бұрыштар, сәйкесінше көрсеткіштер / және с оқиғаларға (оқиғаға) және шашыраңқыға (бағытқа) сәйкес келеді (2.1-сурет).



Сурет 2.1 - Түсетін сәуле (I), шашыраңқы (S) және айнамен шағылысқан (R) сәуленің бетіне (N) қатысты сызбалық бейнесі

Көптеген дисперсиялық модельдер үшін маңызды параметр бетінің шашырау қабілетін сипаттайтын интегралдық мәні болып табылады (Total Integrated Scatter, TIS), ол келесідей анықталады:

$$TIS(\theta_i, \varphi_i) = \iint BSDF(\theta_i, \varphi_i, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.2)$$

ZEMAX®-та қолданылатын беттік эмиссияның шашырау модельдерінің кейбіреулері төменде қарастырылады.

Ламберттік шашырауы, сәуле шашырайтын беттерді сипаттайды, ол қатты бұрыш  $2\pi$  ішінде барлық бағытта біркелкі шашырайды және жарық

ағыны түсетін қатты бұрышқа тәуелді емес. Бұл жағдайда екі жақты бағытталған шашырау функциясы келесідей болады:

$$BSDF = 1/\pi \quad (2.3)$$

Ламберттің дисперсиясы бар беттерге мысал ретінде ақ қағаз немесе сүт стақаны жатады.

Гаусс шашырауы бар беттер үшін екі бағытта шашырау функциясы келесідей анықталған:

$$BSDF(\vec{x}) = Ae^{-\frac{|\vec{x}|^2}{\sigma^2}}, \quad (2.4)$$

мұндағы  $A$  - нормалдау тұрақтысы.

Шашыраған сәулелердің таралуы бағыттаушы косинустардың кеңістігінде асимметриялық болып табылады. Өлшемсіз  $o$  саны Гауссий үлестірімінің енін анықтайды.  $o > 5.0$  шамалары үшін Гаусстың шашырауы Ламбертке жақындады.

Шашырау моделінің АВg екі бағытта шашырау функциясы келесідей анықталады:

$$BSDF(\vec{x}) = \frac{A}{B + |\vec{x}|^g} \quad (2.5)$$

Осы модельдің коэффициенттеріне келесі шектеулер қойылады:  $A > 0$ ; Мұндай дисперсиялық модель, егер кедір-бұдырлықтың сипаттамаларының өлшемдері оқиғаның жарық толқынының ұзындығынан аз болса, біркелкі кедір-бұдырлы беттер үшін қолданылады.

Мөлдір нысандар үшін жарықтың берілу жылдамдығы, сыну көрсеткіші және жарықтың шашырауы (көлемді шашырау) орнатылған. Жарықтың интенсивтілігі Бер заңымен анықталады:

$$t = e^{-\alpha r}, \quad (2.6)$$

мұндағы  $a$  - сіңіру коэффициенті;

ал  $t$  - сәуленің орташа еркін жолы.

Егер материалда біртектес емес немесе бөлшектер болса (мысалы, фосфор бөлшектері) болса, көлемді жарық шашырауы көрсетіледі.

Көлемді жарық шашырауы  $P$  шашының шашырауынан кейін ауытқатын бұрышы үшін  $P$  ықтималдылықты бөлу функциясын қолдана отырып орнатылады (шашырау бұрышы  $c$ ).

Төменде ZEMAX® бағдарламалық жасақтамасында қолданылатын көлемді шашыраудың кейбір үлгілері келтірілген.

Бұрышты шашырау. Үлгінің параметрі - шашыраған сәуле ауытқатын конустың бұрышы, ықтималдылықты бөлу функциясы тұрақты [46]:

$$P = 1/2 \quad (2.7)$$

Полиномдық шашырау үшін шашырау ықтималдығын бөлу функциясы келесідей анықталады:

$$P(\theta) = \sum c_i \theta^i \quad (2.8)$$

Хеней-Гринштейннің шашырауы. Бұл үлгінің параметрлері  $g$  коэффициенті (0-ден 1-ге дейін өзгереді), шашырау ықтималдығын бөлу функциясы бұл жағдайда келесідей анықталады:

$$P(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad (2.9)$$

Бұл модель кішкене бөлшектерге жарықтың шашырауын модельдеу үшін қолданылады (мысалы, атмосферадағы судың ұсақ бөлшектеріне жарықтың шашырауын модельдеу үшін).

Rayleigh шашырауы. Үлгі жарықтың толқын ұзындығынан әлдеқайда аз болатын бөлшектер шашыраған жағдайда қолданылады. Rayleigh шашырауының шашырау ықтималдығын бөлу функциясы келесідей анықталған:

$$P(\theta, \lambda) = 0.375 \frac{1 + \cos^2 \theta}{\lambda^4} \quad (2.10)$$

Мии шашырау моделі - бұл электродинамиканың классикалық мәселесінің шешімі - еркін өлшемдегі сфералық бөлшекпен жарықтың шашырауы. Рейн шашырауы - радиусы жарықтың толқын ұзындығынан әлдеқайда аз болатын бөлшектер үшін Mie шашырау моделінің ерекше жағдайы. Бұл модельді ZEMAX®-де қолдану үшін келесі параметрлерді орнату қажет: бөлшектердің сыну индексі, бөлшектердің радиусы, бөлшектердің концентрациясы, ең төменгі шекті мән (ықтималдық функциясы үшін полярлық интегралдың минималды мәнін анықтайды), бөлшектердің сіңіру коэффициенті.

Жарық көздері. Сәулелену көздері нүктелік, жазық немесе көлемді болуы мүмкін. Көзді модельдеу кезінде сәулелер саны, сәулеленудің толқын ұзындығы және оптикалық қуат (немесе жарық ағыны) көрсетіледі, жазықтық пен көлем көздері үшін радиация үлгісі де орнатылады. Эмитенттің Ламберт моделі көздің қарапайым моделі болып табылады, оның сәулелену қарқындылығы тұрақты және бағытқа тәуелді емес. Мұндай қарапайым үлгіні

қолдану жарықтандыру жүйесінің іргелі мүмкіндіктерін бағалау немесе жарықтандыру шамаларын шамалы, болжалды есептеу кезінде негізделген. Радиацияның нақты көздері әдетте анағұрлым күрделі сәулелену сипатына ие. Бұл жағдайда олар ымыраға келуге тырысады: модель неғұрлым дәл болса, есептеу соғұрлым ұзаққа созылады; егер сізге тез бағалау қажет болса, қарапайым, жуық модельдерді қолданған дұрыс. Лазердің сәулелену көзін модельдеу үшін сәулелену қарқындылығы Гаусстың таралуына негізделген:

$$I(l, m) = I_0 e^{-(G_x l^2 + G_y m^2)}, \quad (2.11)$$

мұндағы / және m - сәуленің x және y осі бағыттарындағы косинустары, ал  $G_x$  және  $G_y$  тұрақты,  $G_x$  пен  $G_y$  үлкенірек, тиісті бағыттар бойынша таралу тар болады.

Детекторлар. Есептеу аймағында детекторлар орналастырылады - жазық немесе үш өлшемді беттер, оларда оқыс оқиғаның радиациясы параметрлері бекітілген.

Есептеуді бастамас бұрын, сандық модельдің осындай параметрлері сәуленің минималды қуаты, объектілермен болуы мүмкін сәулелік соқтығысулар саны және т.б.

Оптикалық жүйелерді модельдеу кезінде оптикалық қуаттың жоғалуына талдау жасалды және қажет болған жағдайда радиациялық құрылымға талдау жасалды [47].

## 2.2 Оптикалық сипаттамаларды зерттеудің тәжірибелік әдістері

Жарықдиодты және жарықдиодты модульдер.

Эксперименттік зерттеуге олардың сипаттамаларын кейін өлшеу арқылы эксперименттік үлгілерді жасау мен жасау кіреді.

Барлығы жарық диодты сипаттамаларда шамамен 70 түрлі сипаттамалар мен параметрлер қолданылады, олар егжей-тегжейлі сипатталған. Бұл жұмыс үшін біз жарық диодтарының сипаттамаларын таңдадық, олар энергия тиімділігі мен жарық сапасын толық сипаттайды.

Светодиодтардың фотометриялық (жарық) сипаттамалары. Фотометрия - бұл жарықтың көрінетін спектрдегі өлшеуі, ол толқын ұзындығына 380-770 нм сәйкес келеді және адам көзімен қабылданады. Бұл жұмыста тәжірибелік үлгілер үшін жарық ағыны ( $F$ ,  $L_m$ ) өлшенді - адам көзімен қабылданатын жарық көзінің сәулелік қуаты. Энергия тиімділігін анықтайтын жарықдиодтың маңызды сипаттамасы жарық шығару ( $\Phi_{ff}$ ,  $L_m / W_t$ ), бұл жарық диодының жарық ағынының жарықдиодқа берілетін электр қуатына қатынасы.

Диодтардың энергетикалық сипаттамалары. Бұл жұмыста біз бүкіл радиациялық спектрдің (көрінетін, инфрақызыл және ультракүлгін оптикалық



диапазондардың) толқын ұзындығындағы оптикалық қуаттың интегралы болып табылатын оптикалық сәулелену қуатын (Поупт, Вт) өлшедік.

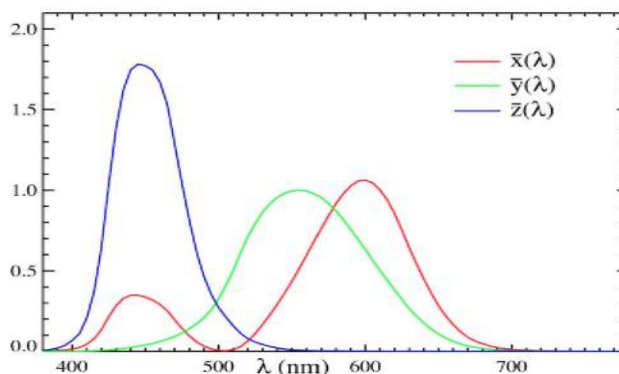
Светодиодтардың колориметриялық сипаттамалары. Көзі колориметриялық шам - жарықдиодтың сәулелену спектрі ( $I(\lambda)$ ) - бұл жарық энергиясының толқын ұзындығына таралуы. Жарық диодтың қалған барлық колориметриялық сипаттамалары эмиссия спектріне байланысты есептеледі. Бұл жұмыста радиациялық спектрден басқа келесі колориметриялық параметрлер де анықталды: хроматикалық координаталар ( $x, y$ ), корреляцияланған түс температурасы (CCT, K), түсті көрсету индексі (CRI)

1931 жылы Халықаралық жарықтандыру комиссиясы (CIE) математикалық мағынада XYZ [94] түстер кеңістігінің моделін анықтады, соның арқасында жарықтандыру құрылғыларының, соның ішінде жарық диодтарының түс сипаттамалары бүгінгі күнге дейін анықталды.  $X, y, z$  хроматикалық координаталары формулалар бойынша анықталады:

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \\
 x &= X / (X + Y + Z) \\
 y &= Y / (X + Y + Z) \\
 z &= Z / (X + Y + Z)
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

(2.15) - (2.16) формулаларында  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$  және  $z(\lambda)$  бөлу түс функциялары болып табылады.

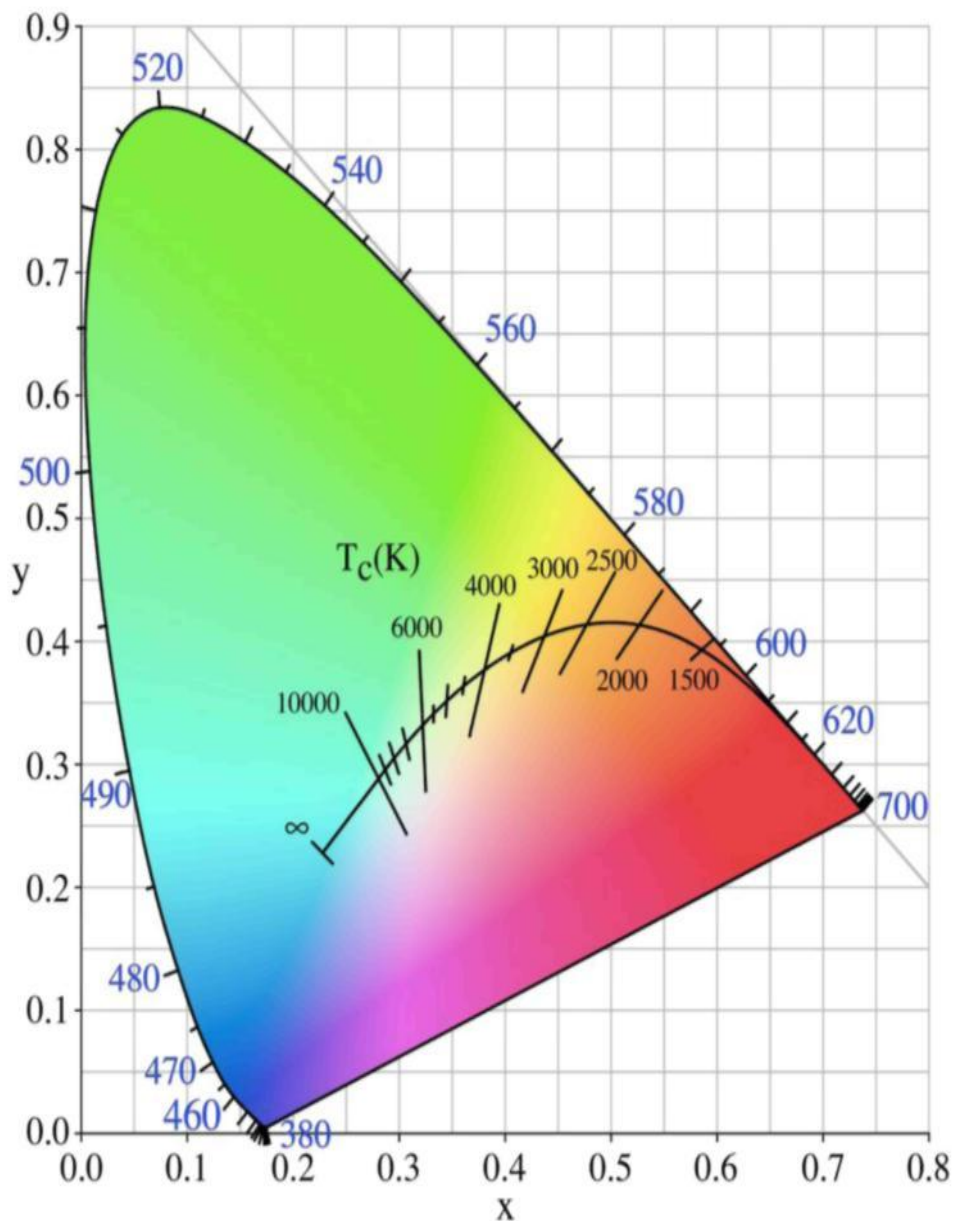
Стандартты колориметр бақылаушылары анықталған ХКБ комитеті 1931 ж. (2.2-сурет).



Сурет 2.2 - Стандартты колориметриялық түс сәйкестендіру функциялары бақылаушы

Қазіргі уақытта қолданыстағы басқа барлық түсті модельдер (CIE  $L^* a^* b^*$ , YUV және т.б.) XYZ моделіне негізделген.

Корреляцияланған түс температурасының мәні зерттелетін көздің хроматикалық координаттарын CIE XYZ түс кестесінде қыздырылған қара дененің хроматикалық координаттарымен салыстыру арқылы анықталады (2.3-сурет). Корреляцияланған түс температурасының мәні эмитенттің ақ сәулесінің қандай көлеңкеде болатынын түсінуге мүмкіндік береді: жоғары мәндер (4500 К - 6000 К) суық (көкшіл) реңктерге сәйкес келеді, төмен мәндер (2500 К - 3000 К), керісінше жылы (қызғылт).



Сурет 2.3 - CIE XYZ 1931 түсті диаграмма эмиссия қисығын көрсетеді

Түсті көрсету индексі (CRI) зерттелген көзбен жарықтандырылған кезде дененің табиғи түсінің оның дененің көрінетін түсіне сәйкестігін сипаттайды.

Қазіргі уақытта CRI түстерді көрсетуді бағалау үшін халықаралық деңгейде келісілген жалғыз метрика болып табылады. Есептеу процедурасы,

біріншіден, анықталған жарық көзімен және жарықтандырылған жарық көзімен жарықтандырылған кезде, он төрт таңдалған Мансель түс үлгілері үшін LEI түстерінің айырмашылықтарын (түс кеңістігіндегі екі нүктенің арасындағы қашықтық) есептеуден тұрады. Алғашқы сегіз үлгілер орташа хроматикалық қанықтылыққа ие, ал соңғы алтысы жоғары қанық түстерге ие. Анықтамалық жарық көзі зерттелетін түстің корреляцияланған температурасына сәйкес келеді және корреляцияланған түс температурасы CCT <5000,000 бар зерттелетін көздер үшін Планк сәулеленуін немесе CCT < 5000 K бар сынақ көздері үшін күндізгі фазаны білдіреді [48].

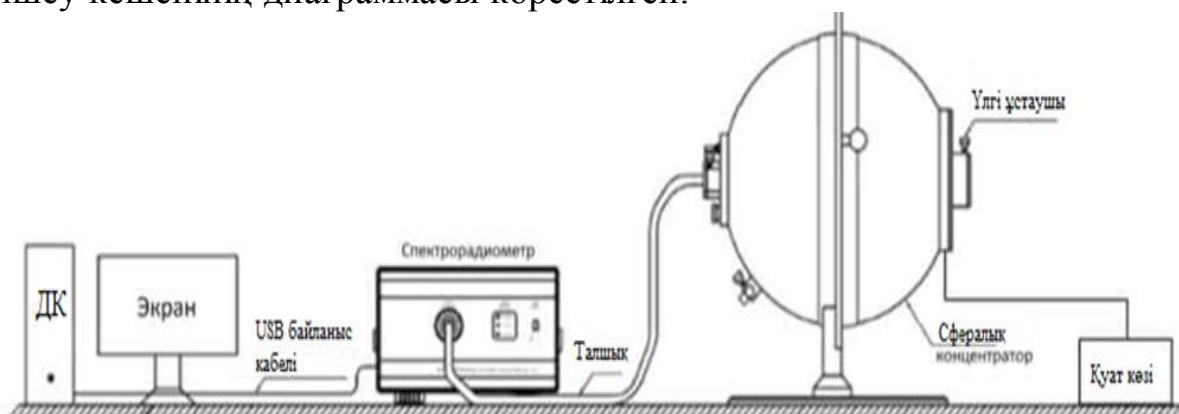
$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i; i = 1-14 \quad (2.13)$$

CRI түсті көрсету индексі алғашқы сегіз түсті үлгілердің орташа мөлшері ретінде алынады.

CRI көптеген ақ жарық диодты жарық көздері үшін дұрыс жұмыс істемейтіндігі белгілі. Пайдаланылған түстер кеңістігі өте гетерогенді. CRI есептеу үшін пайдаланылатын стандартты сегіз түс үлгілері орташа қанықтылыққа ие, тіпті CRI мәндері жоғары болса да, қанық түстер өте нашар көрінуі мүмкін. Бұл проблема әсіресе RGB жарық диоды үшін байқалады. Егжей-тегжейлі есептеулер негізінде осы мәселелерді шешу үшін Ұлттық стандарттар және технологиялар институты (NIST) түстердің көбеюіне арналған жаңа метрика - түс сапасының шкаласын (CQS) жасайды [49].

Борттық негіздегі жарықдиодты модульдер үлгілерінің энергиясын, фотометрлік және колориметриялық параметрлерін өлшеуге арналған тәжірибелік қондырғы ORB Optronix SP-75 спектрадиометрі, 50 см гамма ғылыми интеграторы, 2601A Keithley қуат көзі және Spectral Suite 3.0 бағдарламалық жасақтамасынан тұрады.

Суретте жарық диодты жиынтықтар мен жарықдиодты шамдарды фотометриялық және энергетикалық өлшеу үшін қолданылатын әмбебап өлшеу кешенінің диаграммасы көрсетілген.



Сурет 2.4 - Фотометриялық, энергетикалық және колориметрлік өлшеу үшін қолданылатын әмбебап өлшеу кешенінің диаграммасы

Ұсынылған жұмыста жарық диодты көздерде ақ жарық шығару үшін фосфор технологиялары қолданылды, оған сары диапазонда жұмыс жасайтын фосфор жабындысымен бірге қысқа толқындық (көк) сәуле шығаратын жарық диоды қолданылады. Осы технологиямен жасалынған ақ жарықдиодты шамдар кейбір ерекшеліктері бар радиациялық спектрге ие - олардың спектрі толқын ұзындығы 430-480 нм (көгілдір жарық) аймағында тар шыңға ие және толқын ұзындығы 530-630 нм (сары жарық) аймағында кең таралған. Корреляцияланған түс температурасында минималды айырмашылық бар ақ жарықдиодты модульдерді шығару үшін оларды жинамас бұрын жеке жарықдиодты чиптер қоқыс бойынша сұрыпталады [50].

Сұрыптау үшін XYZ түстер кеңістігіне негізделген жеті сатыдағы MacAdam эллипсі бар Energy Star ұсынған стандартты колориметрлік қоқыс жүйесі қолданылады. Эксперименттік үлгілердің қалталары мен үлгілердің эксперименттік топтамасы жарық диодты сорғы қондырғысының көмегімен сұрыпталды: біріншіден, эмиссия спектрі жазылды, содан кейін түс координаттары ISE (Жарықтандыру жөніндегі халықаралық комиссия) 1931 жылы қабылдаған 2 дәрежелі қосу функцияларын қолдана отырып есептелді [51].

Светодиодтардың гониометриялық сипаттамалары. Негізгі жарықтандыру құрылғыларының гониометриялық сипаттамасы диаграмма болып табылады радиациялық бағыт - жарық қарқындылығының кеңістіктік таралуы гониометрмен өлшенетін жарықтандыру құрылғысы. Өлшеу радиациялық үлгі күш мәнін кадамдық бекіту арқылы жасалады белгілі бұрышқа бұрылған кезде сәулелену көзінің жарығы. Ол жүзеге асырылуда датчикті сәулелену көзі айналасында қозғау немесе көзді еңкейту қозғалмайтын сенсорға қатысты сәулелену. Өлшеу нәтижесінде ол ұшақтың бірінде жарықтың таралуына айналады. Ереже бойынша дөңгелек жарықдиодты жарықдиодты шамның үлгісі бар осьтік симметрия және диаграмманы жазықтықтардың бірінде өлшеу үшін жеткілікті, дегенмен, жарықдиодты шамдар үшін бастапқы және қайталама оптика, күрделі әртүрлі ұшақтарда өлшеу жүргізудің мәні бар. Өлшемдер бұл жұмыста радиациялық заңдылықтар жүргізілді гониофотометрлік жүйе GO-2000 Everfine гониофотометрлер жүйесі [52].

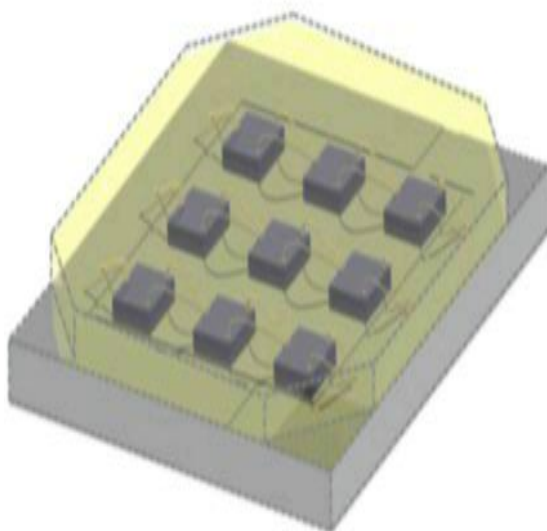
### **3 Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру**

#### **3.1 Құрамында люминофор жоқ, жарықдиодты модульдердің тәжірибелік үлгілерін шығару**

Жарықдиодты модульдің алғашқы оңтайландырылмаған дизайны ретінде біз Optogan ЖАҚ (Санкт-Петербург) шығарған COB X10 жарықдиодты чип модулін алдық (3.1-сурет). Жарықдиодты модульде керамикалық субстратта орналасқан және сым контактілері арқылы қосылған тоғыз жарықдиодты чиптер бар. Борттық модульдің түпнұсқа дизайнында құрамында люминофор болуы мүмкін микросхемалар мен түйіспелерге оптикалық жабынның біркелкі қабаты (әдетте мөлдір силикон эластомері) қолданылады [53].

COB X10 борттық чип модулі элементтерінің геометриялық параметрлері:

- чип: ұзындығы-1.2 мм, ені-1.2 мм, қалыңдығы-0.14 мм;
- астары: ұзындығы-10мм, ені-10мм, қалыңдығы-0,5 мм;
- чиптер арасындағы қашықтық-1.4 мм;
- чиптен төсеніш шетіне дейінгі қашықтық-1.8 мм;
- сым байланыстары мен беті арасындағы ең үлкен қашықтық астары-0,3 мм.



Сурет 3.1 - COB X10 чиптік борт модулінің алғашқы дизайны

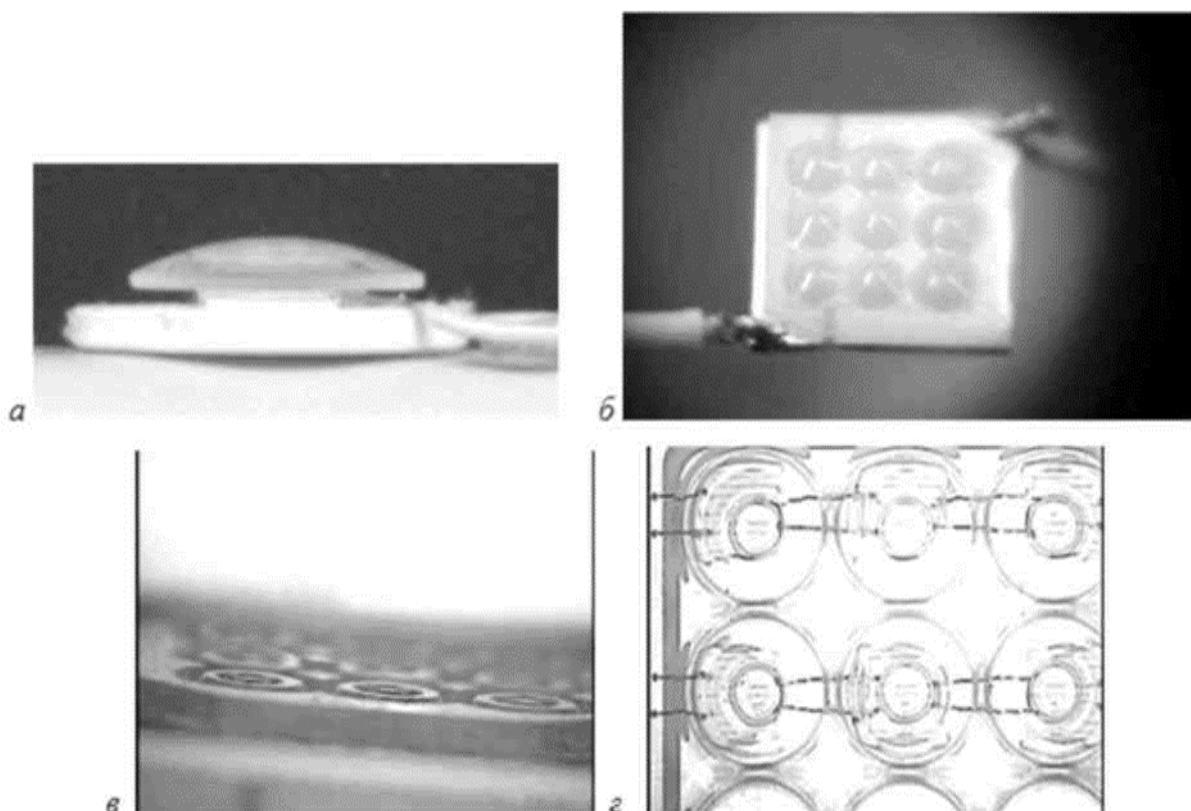
Алдағы есептеулерді верификациялау үшін келесі үлгілердің сипаттамаларын эксперименттік өлшеу жүргізілді:

1) «1-үлгі» - оптикалық жабынның жалпақ беті бар жарықдиодты модульдің бастапқы дизайны, жабын материалының сыну көрсеткіші  $n = 1,4$ , жабындысының қалыңдығы - 0,6 мм.

2) «2-үлгі» (3.2 а-сурет) - оптикалық жабынның жалпақ бетіне қисығы радиусы 14,8 мм, қалыңдығы 4,17 мм және диаметрі 16,92 мм болатын К8 әйнегінен жасалған жалпақ дөңес-линза ( $n_{K8} = 1.5$ ) орнатылды, линзаның бүйір беті күңгірт [54].

3) "3-үлгі" (3.2 б-сурет) - оптикалық жабынның тегіс бетіне тоғыз кішкентай линзалар орнатылған ( $N = 1.4$ ). Линзалардың биіктігі 0.4 мм, қисық радиусы 2 мм.

4) "4 үлгісі" (28 в, г сурет) - оптикалық жабынның бетіндегі әрбір чиптің үстінде ( $N = 1.4$ ) лазермен екі сақина кесілген. Сақиналардың тереңдігі  $h = 0.2$  мм, ішкі сақинасының радиусы  $r_{inner} = 0.17$  мм,  $r_{outer} = 0.45$  мм, сыртқы сақинасының радиусы  $R_{inner} = 0.6$  мм,  $R_{outer} = 1.1$  мм.



Сурет 3.2 - Борттық чип модульдердің эксперименттік үлгілері: а) «2 үлгі» бір линза, б) «3 үлгі» тоғыз линза, в) және г) «4 үлгі» лазермен кесілген сақиналар

Бұл зерттеуде барлық үлгілерде люминофор жоқ және 450 нм толқын ұзындығы бар көк жарық шығады.



### 3.2 Люминофор жоқ чип-платада жарықдиодты модульдің есептік моделін орнату және верификациялау

Чип модулінен жарық шығаруға әсер ететін және оңтайландыруды талап ететін конструкцияның негізгі параметрлерін бөлеміз:

1) Чиптердің бір-біріне қатысты орналасуы және олардың арасындағы қашықтық, чиптердің мөлшері мен саны.

2) Субстраттың оптикалық қасиеттері: шағылысу, сіңіру және жарықтың шашырауы.

3) Оптикалық жабын бетінің пішіні және жабын материалының оптикалық қасиеттері: көлемді шашырау және жарықты сіңіру, сыну көрсеткіші.

Жұмыста барлық осы факторлардың чип-платадан Жарық шығаруға әсерін зерттеу жүргізілді. 3-тарауда оптикалық жабынның материалында люминофор бөлшектері жоқ және көлемді шашырауы жоқ чип-платформадағы жарықдиодты модульдер қарастырылған. Люминофор жабыны бар чип-платформамодулін жеке зерттеу 4-тарауда қарастырылады.

Есептеулерді жүргізу сәулелерді трассалау үшін Монте-Карло әдісін пайдаланатын ZEMAX® коммерциялық бағдарламасында жүзеге асырылды (2-бөлімді қараңыз). Есептік модельді қою және верификациялау қосалқы эксперименттердің нәтижелері негізінде жүзеге асырылды.

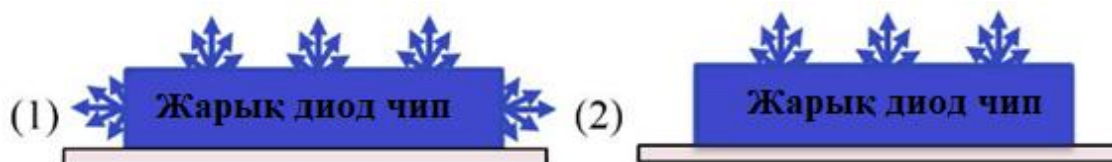
Сандық модельде жарықдиодты чипті модуль виртуалды сфералық детекторға орналастырылған, ол чип-тақта модулінен кеткен сәулелердің қуатын анықтайды.

Сәуле көзі - жарықдиодты чип, келесідей модельденді: сапфир параллелепипед, сыну көрсеткіші  $n_{\text{chip}} = 1.76$  және  $0.1 \text{ см}^{-1}$  сіңіру коэффициенті; чипінің төменгі жағы оған түсетін сәуленің 97% - ын көрсетеді, оған түсетін сәуленің 3% - ын жұтады.

Жарықдиодты чиптің беті бойынша сәуле шығару қарқындылығын нақты бөлу чиптің құрылымына байланысты және оны өлшеу өте қиын, сондықтан есептеу үшін сәуле шығару қуатын бөлудің екі нұсқасы үлгіленді: (1) бүйір қырындағы сәулелердің қуаты жалпы қуаттың 30% - ын құрады, ал жоғарғы жағында-жалпы қуаттың 70% - ын құрады, (2) сәуле чиптің жоғарғы жағында ғана беріледі (3.3-сурет).

Сәулелену қарқындылығын бөлу /  $\nu$  бұрышына байланысты Ламберт заңы түрінде берілген:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (3.1)$$



Сурет 3.3 - Жарық көзін модельдеудің әртүрлі тәсілдері

Модельденген сәулелену көзінің құрылымы нақты жарықдиодты чипке қарағанда әлдеқайда қарапайым, бұл есептеу уақытын едәуір қысқарта алады. Жарықдиодты көзді анықтаудың мұндай оңайлатылған әдісі [55] ұсынылған және жарықтандыру құрылғыларында бастапқы және қайталама оптика қолдану тиімділігін зерттеу үшін қолданылады.

Есептеулерде біз субстрат шағылысының үш нұсқасының бірін қолдандық (3.4-сурет):

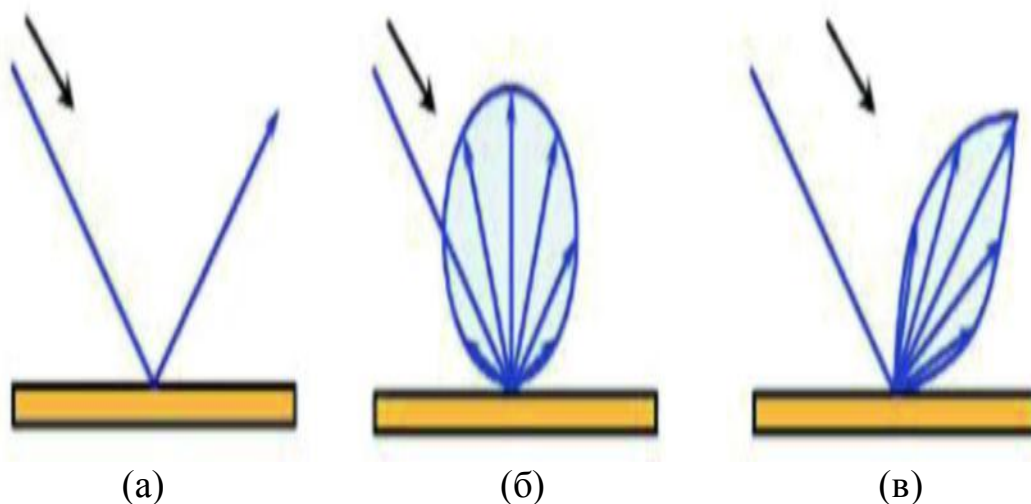
1) Айнаның шағылысуы, шашырамай.

2) Ламберт шашырауымен шағылысу.

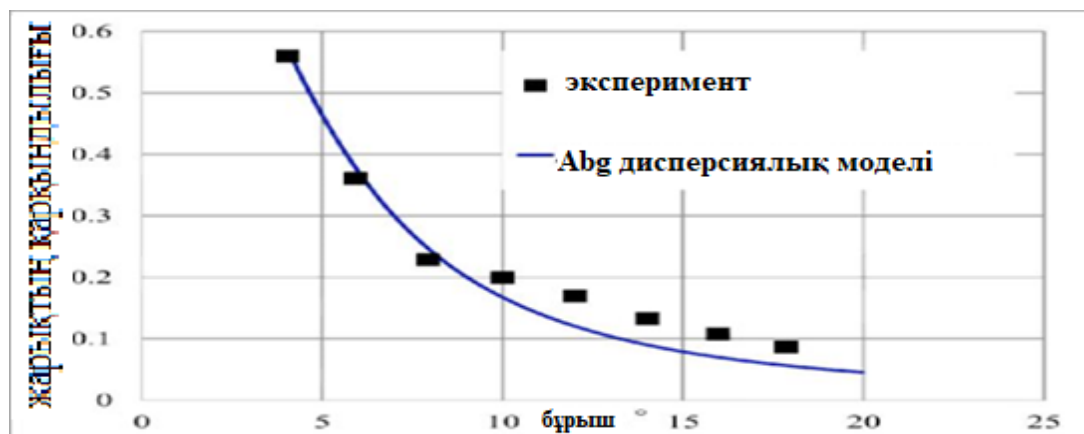
3) Эксперименттік үлгілердің керамикалық төсенішінің шағылысуына сәйкес келетін аралас шашыраумен көрініс. Аралас шашырауды модельдеу беткі шашыраудың  $ABg$  моделінің ( $A=0.057$ ,  $B=0.005$ ,  $g=2$ ) көмегімен жүзеге асырылды.

Тәжірибелік зерттелген субстраттың шағылысу диаграммасының жарты ені шамамен  $20^\circ$  болды. (3.4-сурет).

Субстрат материалы құлайтын сәуленің 5% қуатын сіңіреді.



Сурет 3.4 - Субстраттың шағылысуының үш нұсқасы: (а) айна, (б) Ламберттік, (в) аралас



Сурет 3.5 - COB X10 бортындағы керамикалық субстраттың чиптің шағылысу диаграммасы



Сандық модельдеу келесі оңайлатулармен жүзеге асырылды: (1) жарықтың сым түйіспелері арқылы шашырауы мен жұтылуы есепке алынбады, (2) оптикалық жабын материалы бойынша жарықтың сіңірілуі анықталмады, сәуленің әсеріне ұшырайтын беттермен соқтығысудың максималды саны 4000 құрайды.

Нәтижелерді өңдеу келесі параметрлерді айқындауды қамтыды: 1) оптикалық жабынның тегіс беті ( $\Delta U, \%$ ) бар модульмен салыстырғанда оптикалық жабынның құрылымдық беті бар борттық модуль үшін оптикалық қуаттың ұлғаюы және 2) борттық модульдердің дизайнында ( $\Delta U_{loss}, \%$ ) оптикалық қуаттың жоғалуы. Бұл параметрлер келесідей анықталды:

$$\Delta U = \frac{U_{COB} - U_{COB\ flat}}{U_{COB\ flat}} * 100\%, \quad (3.2)$$

$$\Delta U_{loss} = \frac{U_{chip} - U_{COB}}{U_{chip}} * 100\%, \quad (3.3)$$

мұндағы  $U_{chip}$  – Чип шығаратын сәулелердің жалпы оптикалық қуаты (есеп басында берілетін);

$U_{COB}$ -чип модульін тастап кеткен сәулелердің жалпы оптикалық қуаты (сфералық детектормен бекітілген);

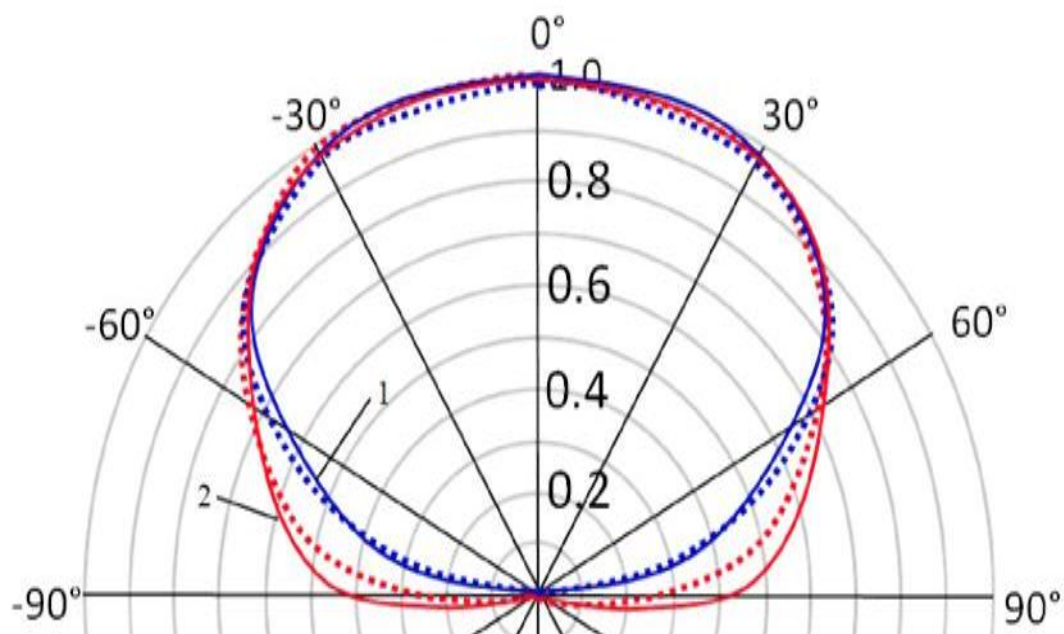
$U_{COB\ flat}$  -чип модульін тастап кеткен сәулелердің жалпы оптикалық қуаты, оптикалық жабынның тегіс беті бар чип – платасы.

Борттық модуль компоненттерінің геометриясы мен оптикалық сипаттамалары эксперименттік үлгілерге сәйкес келді. 2-кестеде эксперимент нәтижелері және сәйкес есептеулер көрсетілген.

3.6-суретте «1-үлгі» (оптикалық жабынның жалпақ беті бар чип-модуль) және «2-үлгі» (оптикалық жабынның бетіндегі бір линза) үшін есептік және эксперименттік үлгілері көрсетілген.

Кесте 3.1 - Алдын-ала жүргізілген тәжірибелер мен есептеулер нәтижелері

	$\Delta U, \%$	
	Есептеу (бірінші және екінші көздер түрі)	Тәжірибе
«2-үлгі» (бір линза)	15 - 16.6	18
«3-үлгі» (тоғыз линза)	6.3 - 12.1	8
«4-үлгі» (лазермен кесілген)	2.6 - 2.8	6.7



Сурет 3.6 - Екі үлгі үшін жарық бағыттылығының есептік (тұтас сызық) және эксперименттік (пунктирлі сызық) диаграммалары: көк – "1 үлгі" чип модулі (тегіс жабын беті), қызыл – "2 үлгісі" чип модуль (жабын бетінде 1 линза)

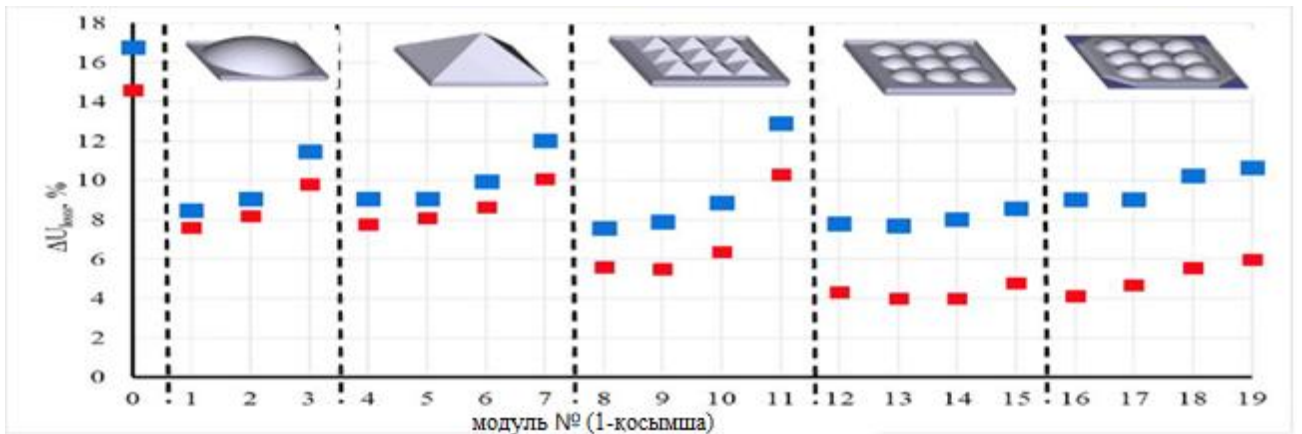
Есептеулер мен тәжірибелер оптикалық жабынның беткі пішінін өзгерту арқылы чипті борттық модульдерден жарық шығару тиімділігін арттыруға болатындығын көрсетеді. Есептеу нәтижелері эксперименттік мәліметтерге сәйкес келеді, айырмашылықтарды сандық модельдеуге енгізілген жеңілдіктермен түсіндіруге болады. Қосымша оптикалық элементтің жарық шығару тиімділігіне әсерін бағалау үшін біз борт модулін бірден қалдыратын және оптикалық жабын / ауа интерфейсінде ауадан қорғаныс сезінбейтін сәулелердің қуатын бағаладық. Тегіс беті бар оптикалық жабындысы бар чип-модуль үшін ауадан қорғанысқа ұшырамайтын сәулелердің қуаты барлық ұшырылған сәулелердің жалпы қуатының  $\approx 40\%$  құрайды, үлкен линзалар үшін  $\approx 78\%$  және тоғыз кішкентай линзалар үшін  $\approx 60\%$ .

### 3.3 Люминофор жоқ чип-платадағы жарықдиодты модульдердің оңтайландырылған есептеулерін жүргізу

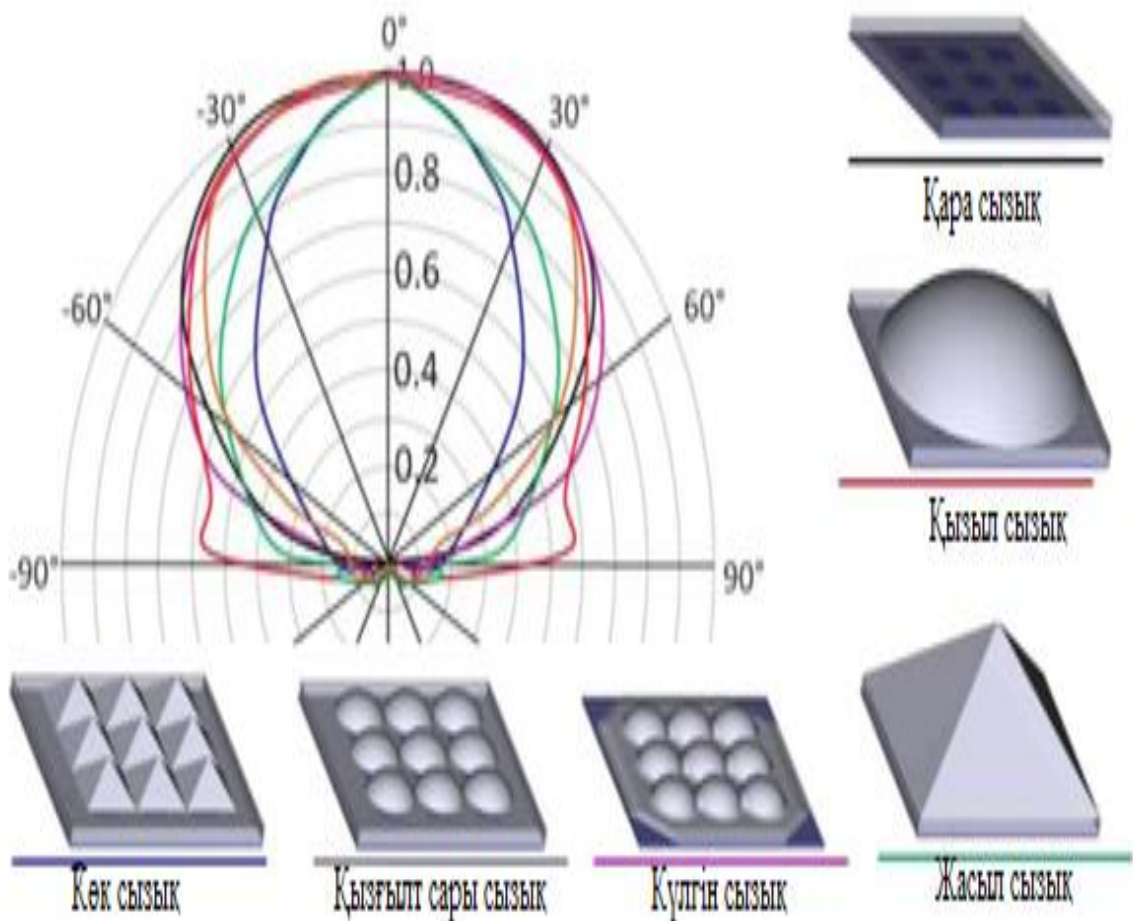
#### 3.3.1 Оптикалық жабын бетінің пішінін оңтайландыру

Оңтайландыру есептеулері тоғыз чипті борттық модульге арналған оптикалық жабынның беткі пішінімен жүргізілді. Зерттелетін жабын формаларының геометриялық параметрлері көрсетілген,  $H$  - жабудың максималды биіктігі,  $R_c$  және  $r_c$  - линзалардың қисықтық радиусы,  $H_{lens}$  және  $h_{lens}$  линзалардың биіктігі. 3.7 және 3.8-суреттерде оңтайландыру

есептеулерінің нәтижелері көрсетілген, есептеулерде субстраттың шағылысуы араласқан.



Сурет 3.7 - Оптикалық қуат шығынының люминофорсыз жабу формасына тәуелділігі. Көк - көздің бірінші түрі; қызыл - көздің екінші түрі



Сурет 3.8 - Люминофорсыз оптикалық жабынның әртүрлі формасымен чип-платаға арналған бағыттылық диаграммалары

Есептеулер көрсеткендей, оптикалық беттің пішінін текстуралау борттық модульді жабу тегіс беті бар модульге қарағанда радиациялық қуатты 10-15% арттыруға мүмкіндік береді.

Оптикалық элементтің оңтайлы пішініне қойылатын негізгі талаптар: қисықтықтың минималды мүмкін радиусы бар сфералық (немесе сфералыққа жақын) пішінді дөңес линзалар (микросхемалар мен олардың өлшемдері арасындағы қашықтықта анықталады) әр чиптің үстінде орналасқан, чиптік модульдің қалған бөліктерінде оптикалық жабын бар. барлық сымдар қосылыстарын қамтиды және ең аз жұқа қабатпен жағылады. Бұл технологиялық шешім патентпен қорғалған [7a].

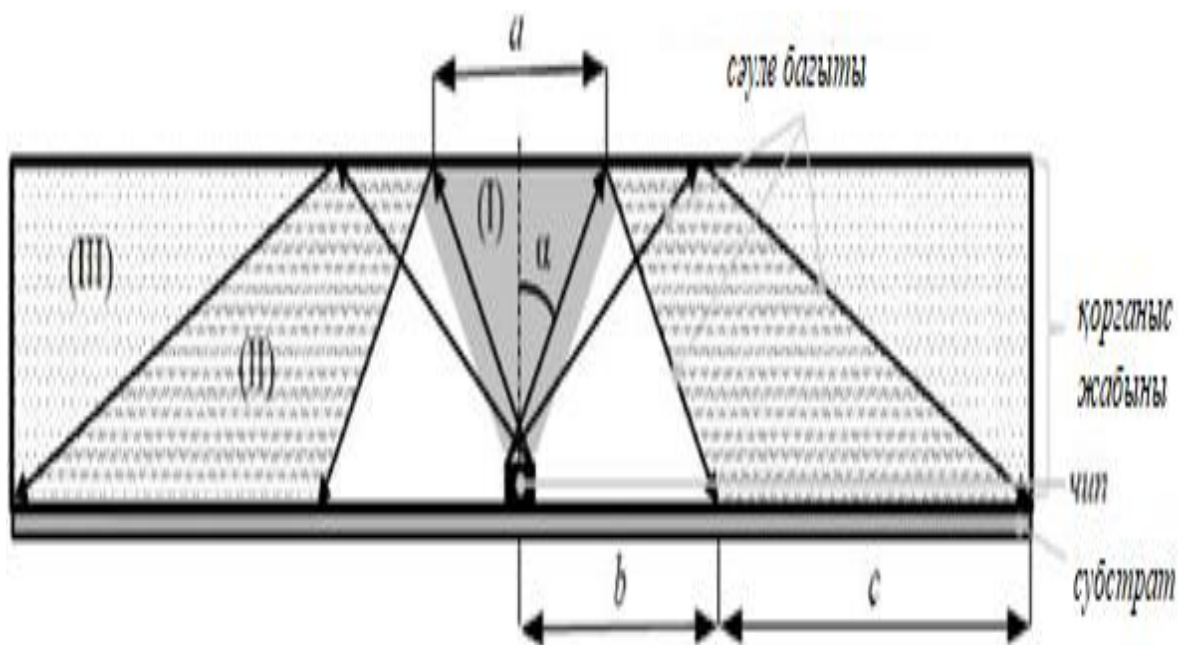
Бетіндегі сфералық линзалармен, қисықтық радиусымен модульдің енінің жартысына тең оптикалық жабынды қолдану арқылы радиациялық қуаттың шамамен 15% артуына қол жеткізуге болады. Мұндай оптикалық элементтің өндірісі қарапайым, бірақ ол әлдеқайда массивті, бұл кейбір өнімдер үшін қажет емес, сонымен қатар көбірек материалды қажет етеді.

Тоғыз чипті жарықдиодты чипті борттық модульдің оптикалық жабынының беткі пішінін оңтайландыру нәтижелері көрсетілген, бірақ әр чиптің үстіндегі жеке линзалар чиптердің санына қарамастан чиптік модульдің тиімділігін арттырады деп болжауға болады. 3.3.3-тарауда сонымен қатар жалпақ жабындысы бар жиырма төрт чипті, әр чиптің үстіндегі жеке линзалар мен модульдің бүкіл бетінен бір линза бар борттық модуль үшін есептеулер нәтижелері келтірілген.

### **3.3.2 Чиптердің өзара орналасуын, мөлшерін және санын оңтайландыру**

Сыну индексі 1,4 болатын жабындық материал үшін толық ішкі шағылыстың (ТІШ)  $\alpha$  бұрышы  $45^\circ$  құрайды (3.9-сурет). Жарықдиодты модульде сәуленің таралу схемасында бірнеше негізгі бағыттарды атап өтуге болады: I аймақ -  $\alpha$  ерітінді бұрышы бар конустың қоршауында және ауадан қорғанысқа ұшырамайтын және модульден шықпайтын барлық сәулелерді қамтиды, II аймақ әуе қорғанысынан және құлаудан өткен сәулелерді қамтиды. субстратқа немесе басқа чиптерге III аймаққа ауадан қорғайтын сәулелер кіреді, бірақ құрылғыны қаптаманың бүйір бетімен қалдырады.

A, b және c арақашықтықтарының мәні жарықдиодты модульдің геометриялық сипаттамаларына байланысты: оптикалық жабынның қалыңдығы, чиптің өлшемі. Сондай-ақ, бұл диаграммада чиптер бір-бірінен максималды қашықтықта болса модульден тиімді түрде шығарылатын чиптің бүйір беттерінен сәулелену көрінбейтінін ескеру қажет.

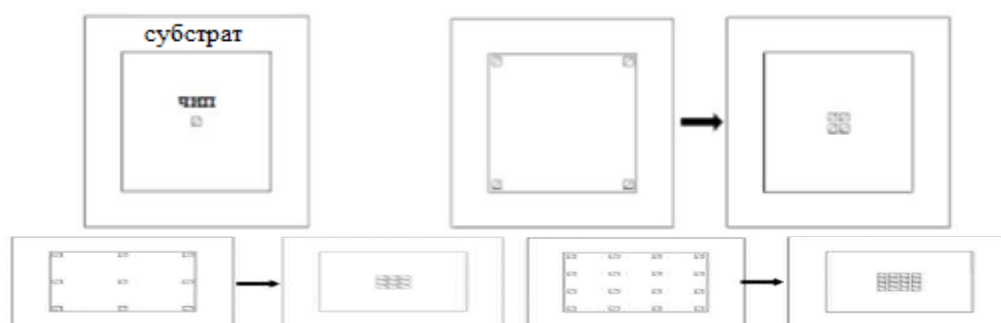


Сурет 3.9 - Құрамында бір чип бар жарықдиодты модульде сәуленің таралу сызбасы (бүйірлік көрініс)

Жарықтың сіңуін көршілес чиптермен зерттеу үшін бірқатар параметрлік есептеулер жүргізілді, онда келесі параметрлер өзгерді (3.10-сурет):

- 1) Чиптер саны: 1, 4, 9 және 16;
- 2) Оптикалық жабынның қалыңдығы: 0,4 мм-ден 2 мм-ге дейін;
- 3) Чиптің өлшемдері: чиптің ені 0,4 мм-ден 1,2 мм-ге дейін;
- 4) Чиптердің орталықтары арасындағы қашықтық: төрт, тоғыз және он алты чиптардан тұратын модульдер үшін қашықтық мүмкін болатын максимумдан 0,5 мм-ге дейін өзгерді.

Чип Ламберттің заңы бойынша бүкіл бетінен жарық шығаратын және оған түсетін сәулеленуді толығымен сіңіретін параллелепипед ретінде модельдеді. Мұндай модельдеу жарықтың көрші чиптермен сіңірілуін сапалы бағалауға мүмкіндік береді. Қосалқы бөлшектің көрінісі аралас, есептік модельдің қалған параметрлері 3.2-бөлімде келтірілген.



Сурет 3.10 - Чиптер арасындағы «ең кіші» және «ең үлкен» қашықтықтағы борттық модульдің дизайны (жоғарғы көрініс): (а) бір чип, (б) төрт чип, (в) тоғыз чип, (г) он алты чип

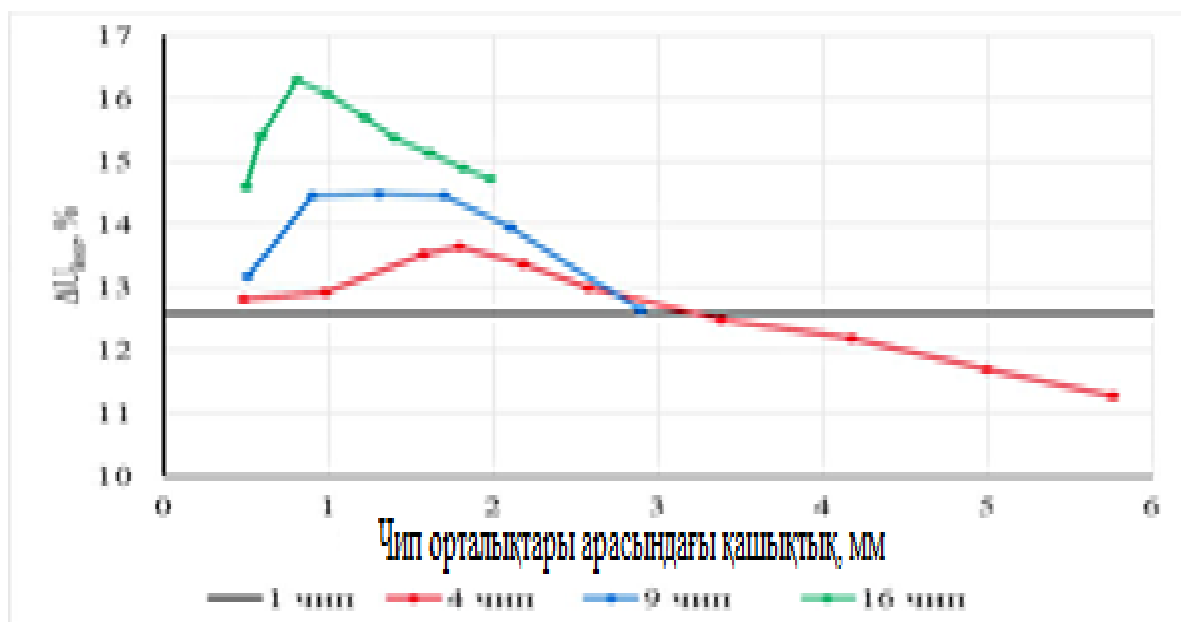


3.11-суретте борттық модульдегі оптикалық қуаттың жоғалуының чиптер арасындағы қашықтыққа тәуелділігі көрсетілген, осы есептеулерге арналған оптикалық жабынның қалыңдығы 0,9 мм құрайды. Суреттен әр дизайн үшін чиптер арасындағы екі оңтайлы қашықтық бар екенін көруге болады, сол кезде көрші чиптермен жарықтың сіңуіне байланысты оптикалық қуат жоғалуы ең аз болады:

- чиптер арасындағы ең аз мүмкін қашықтық, ол чиптердің көпшілігінің I және II аймақтар арасындағы аймақта орналасуын қамтамасыз етеді;

- чиптер арасындағы ең ықтимал қашықтық, олардың өзара әсерін төмендетеді және чиптер төсеніштің шетіне жақын орналасқан, бұл жабынның бүйірлік беті арқылы жарық шығаруды қамтамасыз етеді.

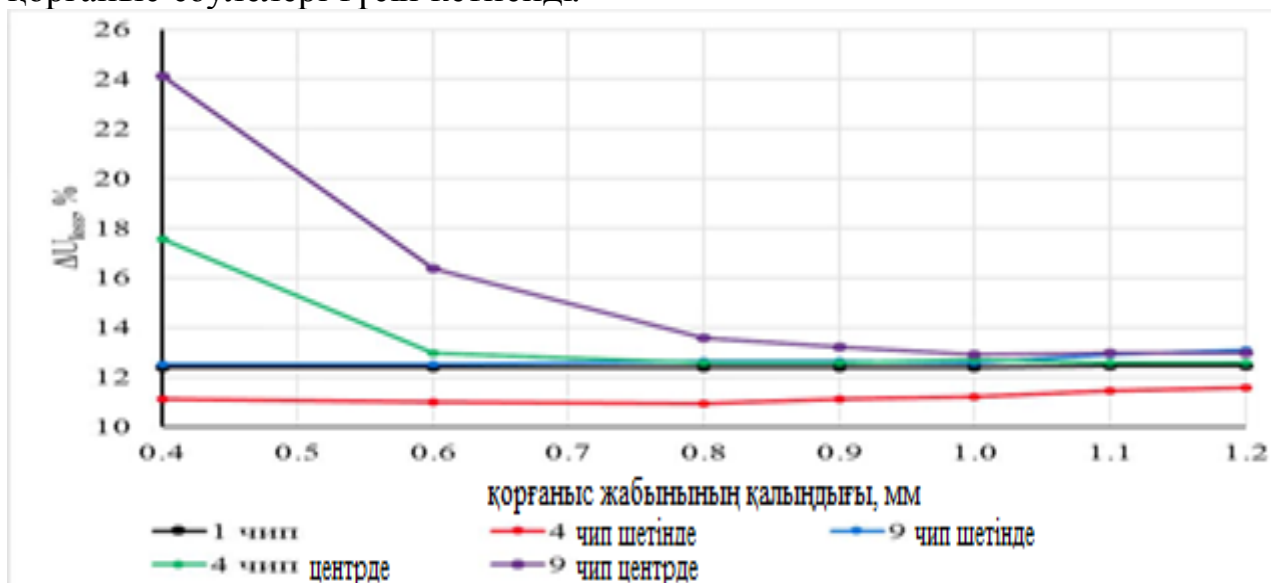
Зерттелген үлгілердің ішінде сәулеленудің ең үлкен қуаты субстраттың бұрыштары бойынша орналасқан төрт чипі бар борттық чип модуліне ие, бұл осы құрылым үшін жарық оптикалық жабынның бүйірлік беттері арқылы чип модулін неғұрлым тиімді тастайтынымен түсіндіріледі. Алайда, бұл дизайнның практикалық мағынасы жоқ, өйткені субстрат бетінің көп бөлігі пайдаланылмайды және мұндай көзден сәуленің бұрыштық таралуы өте біркелкі болмайды. Чиптер арасындағы оңтайлы қашықтық олардың саны мен субстрат мөлшеріне байланысты анықталады.



Сурет 3.11 - Чиптер арасындағы қашықтыққа байланысты әр түрлі чиптер бар борттық модульдегі оптикалық қуаттың жоғалуы

Оптикалық жабынның қалыңдығынан минималды (чиптер төсеніштің ортасында орналасқан) және максималды (чиптер төсеніштің шеттерінде орналасқан) қашықтықта орналасқан бір, төрт және тоғыз чипті борттық модульдегі оптикалық қуаттың есептік тәуелділігі көрсетілген. Төсеніштің шетінде орналасқан чиптері бар құрылғылар үшін жабынның қалыңдығы

чиптердің жарықтың өзара сіңуіне іс жүзінде әсер етпейді, бұл чиптер төсеніштің ортасында бір-бірінен аз қашықтықта орналасқаны үшін маңызды, бұл жағдайда ең аз шығындар жабынның қалыңдығына сәйкес келеді. 3.12-суретте көрсетілген тізбекті талдаудан дәл осындай қорытынды жасауға болады, өйткені жабынның қалыңдығы неғұрлым көп болса, b бөлігінің мөлшері соғұрлым көп болады, мұнда оптикалық жабын / ауа бетінде ауадан қорғаныс сәулелері түсіп кетпейді.



Сурет 3.12 - Ооптикалық жабынның қалыңдығына байланысты чиптердің әртүрлі саны бар чип модулінде оптикалық қуаттың жоғалуы

Суретте бір, төрт, тоғыз және он алты чиптерден тұратын чиптік модульдегі оптикалық қуаттың жоғалуының чиптердің көлеміне қарай өзгертін чиптердің жалпы ауданына бір-бірінен максималды мүмкін қашықтықта орналасқан тәуелділігі көрсетілген. Чип оған түсетін сәулеленуді толығымен сіңіру ретінде модельдеді, сондықтан оптикалық қуаттың үлкен шығыны чиптердің үлкен ауданына сәйкес келетіндігін есептеу нәтижелерімен расталған болжам жасалды. Оптикалық қуат жоғалтуының чип аймағына тәуелділігі сызықты болып табылады. Төрт чиптен тұратын модульдің конструкциясы жақсы нәтиже береді, өйткені бұл жағдайда жинақтың бүйір беттерінен көбірек жарық шығарылады.



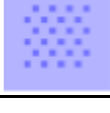
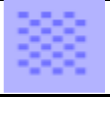




Сурет 3.13 - Чип модуліндегі оптикалық қуат шығынының чиптің жалпы ауданынан тәуелділігі. Нәтижелер ұзындығы жағынан 0.4 мм-ден 1.2 мм-ге дейін чиптер үшін ұсынылған

Жоғарыда келтірілген параметрлік есептеулер сәулеленуді чиптермен өзара сіңіру үшін орналасу, саны, мөлшері және құю қалыңдығының әсері туралы сапалы тұжырымдар жасауға мүмкіндік береді, өйткені чип жеңілдетілген тәсілмен модельденді - параллелепипед сияқты, оның үстіне жарық оқиғасын толық сіңіретін және оның бетінен біркелкі сәуле шығаратын Ламберт заңына сәйкес.

Чиптердің мөлшері, саны және орналасуының әсерін дәлірек анықтау үшін бірқатар есептеулер жүргізілді, онда сәуле көзі 3.2-бөлімде сипатталғандай модельденді, жарықдиодты модульдің субстратының шағылысуы араласып, оптикалық жабынның қалыңдығы 0,6 мм болды. Есептеулер параметрлері мен нәтижелері 3-кестеде келтірілген. Бұл есептеулердің нәтижелері оптикалық қуаттың жоғалуына чиптердің жоғарғы бетінің ауданы мен чиптердің арасындағы қашықтық әсер ететінін растайды.

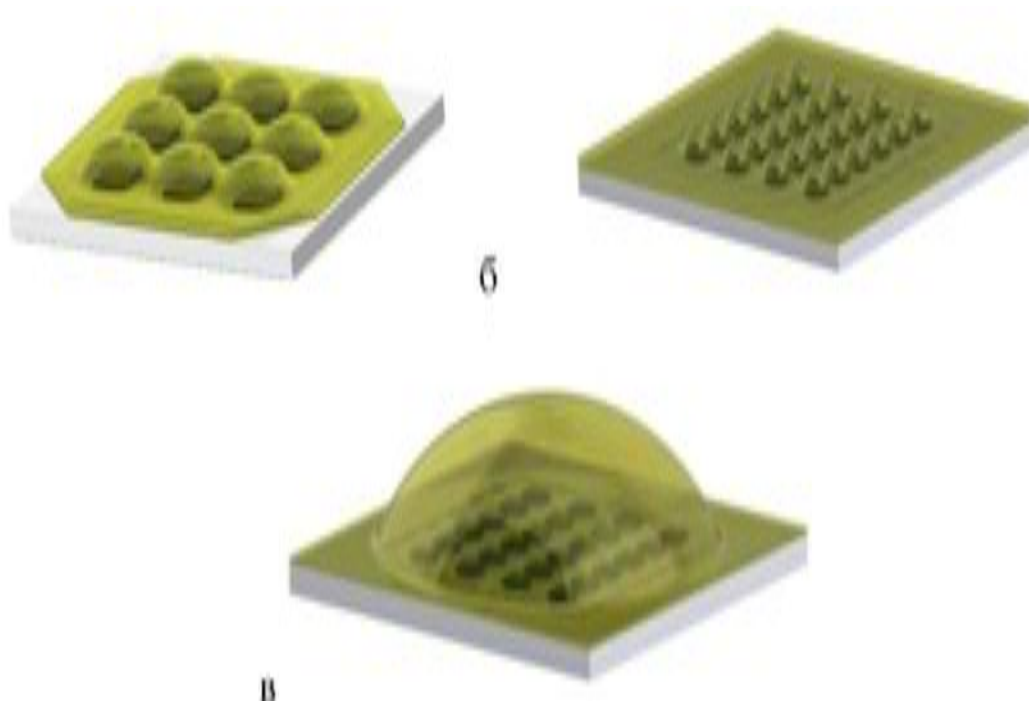
Кесте 3.2 Чип модульдері үшін әртүрлі орналасқан, мөлшері мен чиптердің саны бар оңтайландыру есептеулерінің нәтижелері

Конфигурация аты	Чип жалпы жоғару ауданы, мм <sup>2</sup>	Үлгі	Қорек көзі	$\Delta U_{\text{loss}}$ , %
COB1	12,96		1 тип	18
			2 тип	15
COB2	7,47		1 тип	18
			2 тип	15
COB3	7,47		1 тип	18
			2 тип	15
COB4	12,23		1 тип	19
			2 тип	16
COB5	14,73		1 тип	20
			2 тип	16
COB6	21,16		1 тип	21



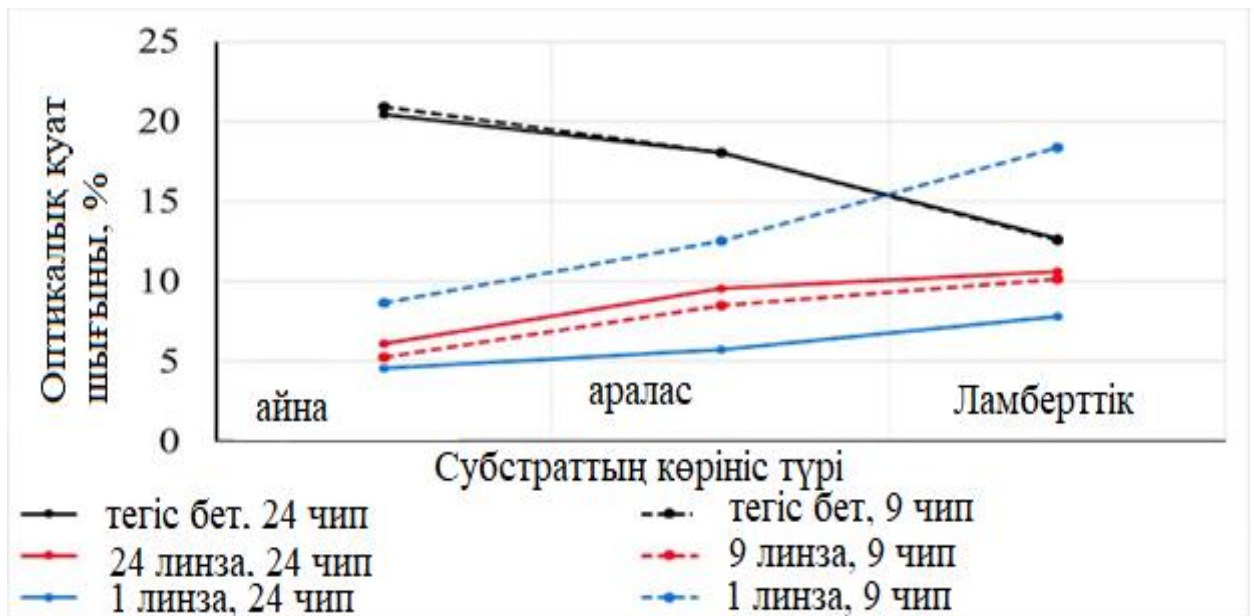
### 3.3.3 Субстраттың шағылыстыратын және шашырататын қасиеттерін оңтайландыру

Субстраттың шағылысу қасиеттері оптикалық жабын бетінің пішінінің үш нұсқасына оңтайландырылды: тегіс бет, әр чиптің үстіндегі линзалар (3.13-а, б-сурет), қисығы радиусы 6 мм бүкіл модуль үстіндегі линза (3.13-сурет с) және екі модульді конфигурациялау үшін (тоғыз чипі бар COB1 және жиырма төрт фишкасы бар COB2).



Сурет 3.14 - Әр түрлі оптикалық жабындысы бар тоғыз және жиырма төрт чиптері бар борттық модульдер

Есептеулер көздің бірінші түрі бойынша жүргізілді, яғни чиптің бүйірлік беттері жалпы сәулелену қуаттың 30%, ал жоғарғы жағы - 70% шығарды. Есептеу нәтижелері 41-суретте көрсетілген. Дизайнды оңтайландыру кезінде субстраттың шағылыстырғыш қасиеттері мен оптикалық жабынның беткі қабатының оптикалық қуаттың жоғалуына өзара әсерін атап өткен жөн, конструкцияны оңтайландыру кезінде осы екі факторды да ескеру қажет. Жазықтық оптикалық жабын жағдайында оптикалық қуаттың аз жоғалуы жақсы шашырау қасиеттері бар субстрат бар модульге, ал линзалармен жабылған жағдайда, айна шағылыстыратын субстратқа сәйкес келеді. Сондай-ақ, тоғыз чипі бар борттық модульдер үшін ең аз шығындар әрбір чиптің үстіндегі жеке линзалары бар оптикалық жабынға, ал жиырма төрт чипі бар борттағы модульдерге бір линза жабыны сәйкес келетіндігін атап өтуге болады.



Сурет 3.15 - Борттық модульдегі оптикалық қуаттың шығынының субстраттың шағылысу түріне тәуелділігі

## 4 Люминофоры бар жарықдиодты модульдерді зерттеу және оңтайландыру

Бұл тарауда люминофор бар оптикалық жабынды материалының сыну көрсеткішінің және платадағы чип модуліндегі оптикалық қуаттың жоғалуына люминофор бөлшектерінің өлшемдерінің әсерін, люминофор бар платадағы чип LED модуліндегі оптикалық қуаттың жоғалуына оптикалық жабынның үстіңгі бетінің формасының әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген.

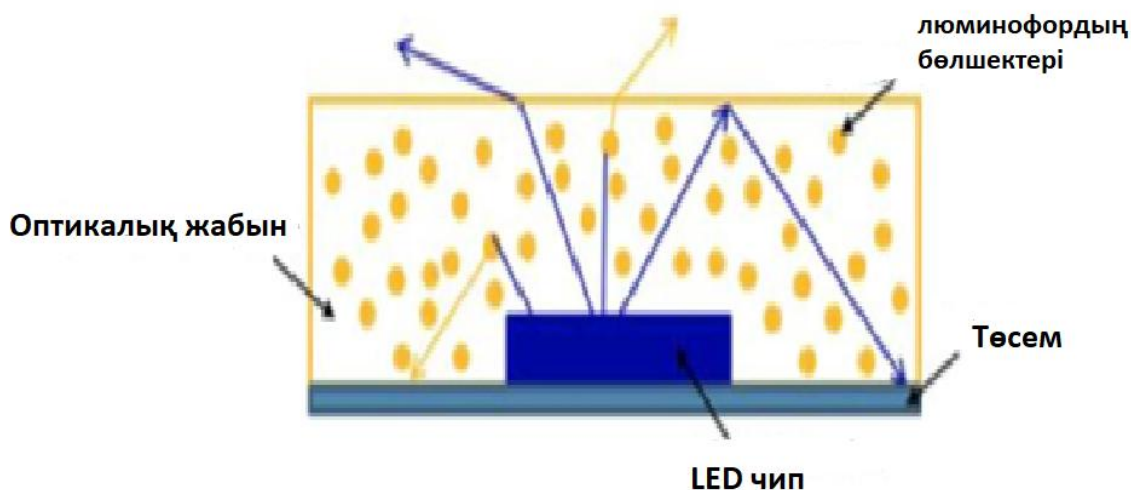
### 4.1 Люминофоры бар оптикалық жабын материалының үлгілері үшін есептеулер жүргізу

Материалдың оптикалық қасиеттері мен оптикалық жабынның нысаны жарық диодты жарық көзінен Жарық шығаруға айтарлықтай әсер етеді. Атап айтқанда, оптикалық жабында жарық таратуға әсер ететін екі негізгі тетік бар:

1) «Люминофордың бөлшектері/оптикалық жабын» шекарасындағы шашырауы.

2) «Оптикалық жабын/ауа» шекарасындағы толық ішкі көрініс.

Бұл механизмдердің екеуі де белгілі бір дәрежеде жарықтың құрылғыны тастап кетпеуіне, ал жартылай жұтылатын чиптердің немесе төсеніштің бетіне түспеуіне әсер етеді (4.1-сурет).

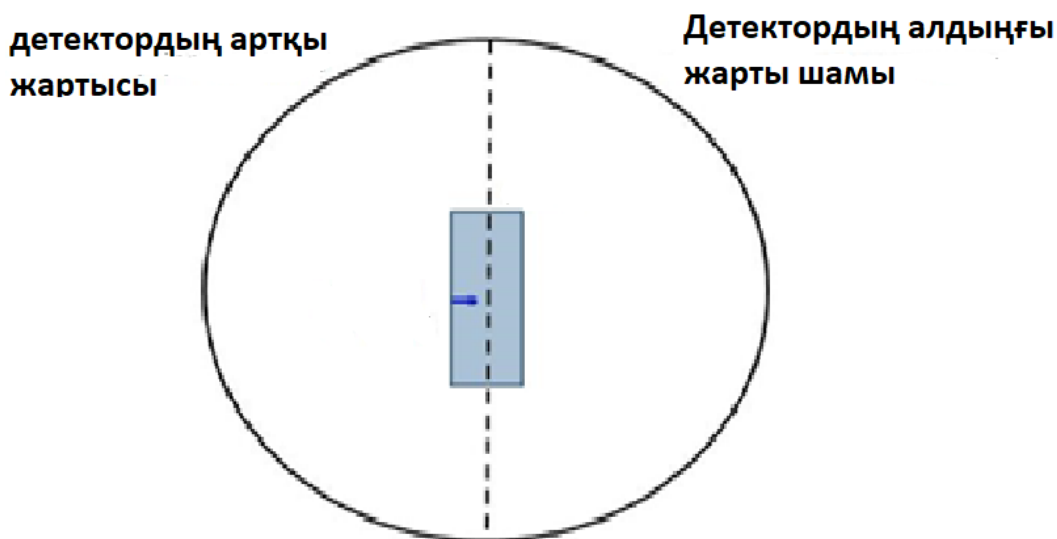


Сурет 4.1 - Оптикалық жабында люминофоры бар жарықдиодты жарық көзіндегі сәулелер жүрісінің схемалық бейнесі

Жағдайды талдау үшін жарықдиодты жарық көзінің Жарық қайтаруы барынша жоғары болатын оптикалық жабынды материал сыну көрсеткішінің оңтайлы мәнін табу міндетін шешуге мүмкіндік беретін модель құру қажет. Қойылған тапсырманы шешу үшін ZEMAX ® бағдарламалық пакетінде сандық моделдеу жүргізілді. Негізгі мақсаты-жүргізілген есеп айырысу болып

табылады әсерін бағалау мөлшерін бөлшектер люминофора және сыну көрсеткішінің материалдың оптикалық желінің толқындық процестер, алдыңғы және артқы жарты саласына. Осыған байланысты, төменде сипатталған есептер кешені жүргізледі.

Есептеу аймағы 4.2-суретте көрсетілген. Ол үш негізгі элементті қамтиды: материал үлгісі, сәулелену көзі және детектор. Детектор екі жартылай сфераны білдіреді – алдыңғы (көзі жарық шығаратын бағытта) және артқы.



Сурет 4.2 - Есептік аймақ

Нүктелі көз үлгінің сол жақ қырының ортасында орналасқан және екі тәсілдің бірімен жарық түсіреді:

- үлгіге перпендикуляр (бір бағытта);
- Ламберт Заңы бойынша.

Үлгіге перпендикуляр сәуле шығаратын көзді моделдеу кезінде "үлгі/ауа" шекарасындағы толық ішкі шағылысудың әсері төмендейді және осылайша "люминофор бөлшектері/үлгі материалы" шекарасындағы шашыраудың қаншалықты артқы және алдыңғы жартылай сфераға түсетін жарық мөлшеріне әсер ететінін шамамен бағалауға болады. Ламберт Заңы бойынша сәулеленетін көзді моделдеу кезінде "люминофор бөлшектері/үлгі материалы" шекарасындағы толық ішкі шағылысу мен шашыраудың бірлескен әсері бағаланады. Ақ жарықдиодты модульдердің тәжірибелік партиясын өндіру үшін ИАГ люминофоры пайдаланылды, сондықтан есептеулерде оның параметрлері қолданылды.

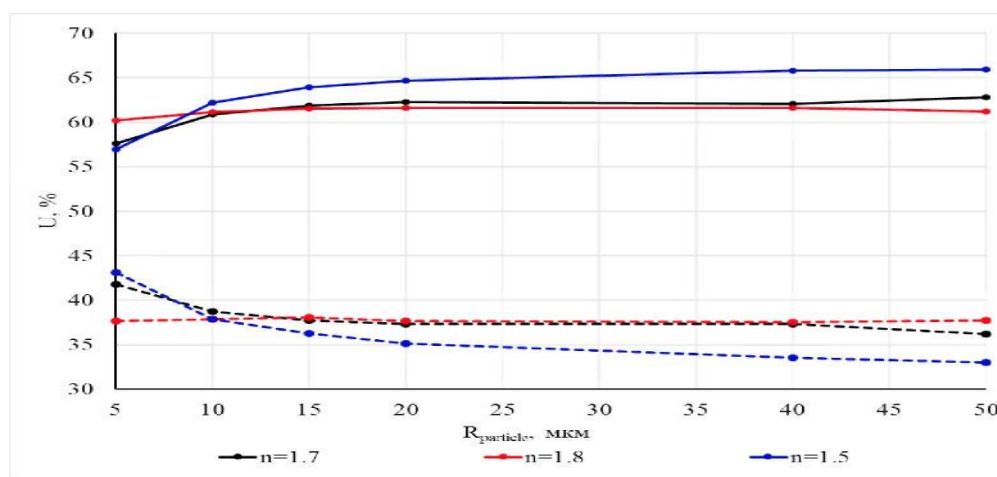
Люминофор бөлшектеріндегі жарықтың шашырауы көлемдік шашырау үлгісі шеңберінде ескерілді. Люминофор бөлшектерінің сыну көрсеткіші  $n_{phosphor}=1.83$ , оптикалық элементтегі люминофор бөлшектерінің массалық үлесі өзгеріссіз қалды және силиконды эластомерлер үшін 13%, ал әйнектер үшін 6% құрады, бұл бөлшектердің бір көлемдік үлесіне сәйкес келеді.

Модельдеуде ескерілмеген: 1) дисперсия (есептеу моделінде чипінің сәулелену толқынының ұзындығы 450 нм, толқын ұзындығының люминоформен түрлендірілуі үлгіленбеген), 2) сым қосылыстарымен жарықтың шашырауы және жұтылуы, 3) люминофор бөлшектерінің өлшемдеріндегі және олардың пішініндегі айырмашылық.

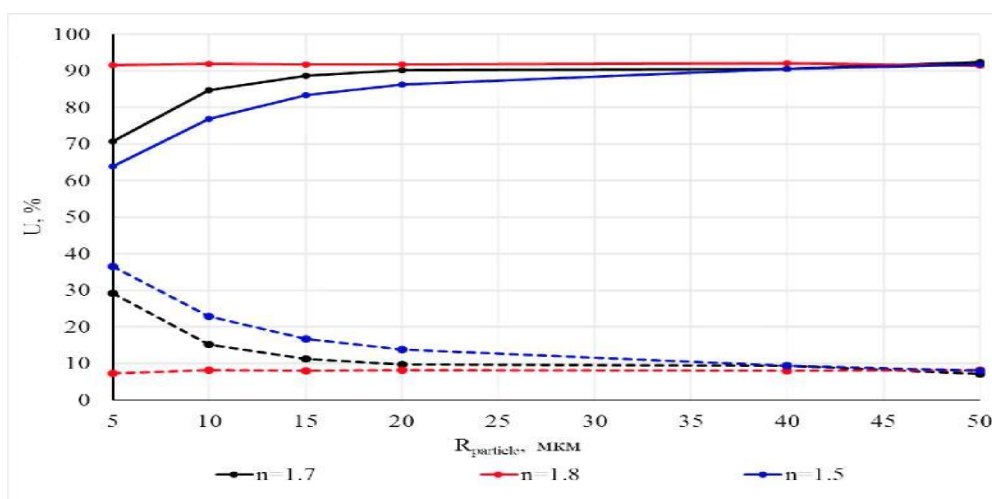
Жүргізілген есептеулердің негізгі мақсаты люминофор бөлшектері мөлшерінің және алдыңғы және артқы жартылай сфераға жарықтың шашырауына қорғаныс жабынының сыну көрсеткішінің әсерін бағалау болды. Негізгі түрленетін параметрлер үлгі материалының сыну көрсеткіштері болды.

$n_{\text{sample}}$ : 1.7, 1.8 (жабынды шынылар, тығыздығы шамамен  $2200 \text{ кг/м}^3$ ) және 1.5 (тығыздықтағы силикондар  $1000 \text{ кг/м}^3$ ), люминофор бөлшектерінің орташа радиусы: 5, 10, 15, 20, 40, 50 мкм.

Есептеу нәтижелері 4.3 және 4.4-суретте келтірілген.



Сурет 4.3 - Алдыңғы (тұтас сызыққа) және артқы (нүктелі сызыққа) жартылай сфераға түскен сәулелер қуатының Ламберт Заңы бойынша сәуле шығаратын көзіне арналған люминофор бөлшектерінің мөлшеріне тәуелділігі



Сурет 4.4 - Алдыңғы (тұтас сызыққа) және артқы (нүктелі сызыққа) жартылай сфераға түскен сәулелердің қуаты үлгіге перпендикуляр сәуле шығаратын көзге арналған люминофор бөлшектерінің мөлшеріне тәуелділігі

4.3 және 4.4-суреттерде ұсынылған есептеулердің нәтижелері бірқатар қорытындылар жасауға мүмкіндік береді.

Алдыңғы және артқы жартылай сфераға түсетін сәулелердің оптикалық қуаты келесі факторлардың жиынтығына байланысты болады: үлгі материалының сыну көрсеткіші, люминофор бөлшектерінің өлшемі, көздің сәуле шығару түрі. 5 мкм люминофор бөлшектерінің радиусында Жарық шашырауына "люминофор бөлшектері/үлгі материалы" шекарасындағы шашырау әсер етеді, сондықтан артқы жарты сфераға түсетін сәулелердің ең аз жалпы қуаты 1.8 сыну көрсеткіші бар үлгі үшін байқалады.

Люминофор бөлшектерінің радиусында 10 мкм астам жағдай өзгереді және үлкен әсер "үлгі/ауа" шекарасында толық ішкі көрініс көрсете бастайды, сондықтан артқы жарты сфераға түсетін сәулелердің ең аз жалпы қуаты сыну көрсеткіші бар Үлгі үшін байқалады.

1.7 және 1.5 сыну көрсеткіштері бар үлгілер үшін бөлшектердің көлемі ұлғайған кезде артқы жарты сфераға түсетін сәулелердің жалпы қуаты азаяды. Үшін үлгідегі көрсеткіші сыну 1.8 шашырау артқы және алдыңғы саласына іс жүзінде тәуелді емес мөлшерін бөлшектер люминофора. Радиусы 50 мкм бөлшектер үшін артқы жартылай сфераға түсетін сәулелердің қуаты "люминофор бөлшектері/үлгі материалы" шекарасындағы шашырауға байланысты емес.

#### **4.2 Люминофоры бар платадағы чип жарықдиодты модульдерінің эксперименттік үлгілерін дайындау және зерттеу**

Есептік модельді қою және верификациялау үшін COB X10 платасында чип Модулінің тәжірибелік үлгілеріне эксперименттік өлшемдер жүргізілді.

$n_{cover}=1.4$  және тағы бір образец с  $n_{cover}=1.5$  люминофор бөлшектерінің орташа радиусы бар  $R_{particle}=7$  мкм және люминофор бөлшектерінің салмақтық үлесі 16%, екі мысалы  $n_{cover}=1.5$  люминофор бөлшектерінің орташа радиусы бар  $R_{particle}=7$  мкм және люминофор бөлшектерінің салмақтық үлесі 25%.

Эксперимент нәтижелері бойынша сәуле шығарудың оптикалық қуатының мәндері және тәжірибелік үлгілерге арналған сәулеленудің түстілік координаттары алынды. Үлгілердің түстілік координаттары  $n_{cover}=1.4$  16% люминофор бөлшектері мен үлгілерінің салмақтық үлесі  $n_{cover}=1.5$  люминофор бөлшектерінің салмақтық үлесі 25% бір колориметриялық бөренеде жатыр [15],  $n_{cover} = 1.5$  16% люминофор бөлшектерінің массалық үлесімен көрші төбеде жатыр.

### 4.3 Люминофорлар бар платада жарықдиодты чип модулінің есептеу моделін қою және верификациялау

Бұдан әрі люминофор бар платада жарықдиодты чип Модулінің есептері жүргізілді. Параметрлері модельдеу осындай ретінде алдыңғы есептеу үшін модуль чип арналған тоғыз платада чиптермен, көрсету төсеніштерге аралас.

Люминофор бөлшектеріндегі Жарық шашырауы Ми көлемдік шашырауы моделінің шеңберінде ескерілді, люминофор ИАГ моделдеуі үшін люминофор бөлшектерінің сыну көрсеткіші  $n_{phosphor}=1.83$ , люминофор бөлшектерінің массалық үлесі және оның бөлшектерінің орташа радиусы қойылды. (1) дисперсия ескерілмеген (есептеу моделінде жарық көзінің сәулелену толқынының ұзындығы 450 нм құрады, люминофор толқын ұзындығын түрлендіру үлгіленбеген), (2) сым қосылыстарымен жарықтың шашырауы және жұтылуы ескерілмеген, (3) люминофор бөлшектерінің пішіні мен өлшеміндегі айырмашылық ескерілмеген, (4) оптикалық жабынды материалмен жарықтың жұтылуы берілмеген, есептеу кезінде сәуле сынауға болатын шағылыстардың максималды саны көрсетілген (4000).

Эксперименттер мен тиісті есептеулердің нәтижелері 4-кестеде келтірілген. Есептеу мен экспериментте алынған оптикалық қуат мәндеріндегі айырмашылық есептік модельде қолданылған оңайлатулармен түсіндіріледі. Шығыс қуатының қамту көрсеткішінен есептік тәуелділігі эксперименттік сәйкес келеді: люминофордың бірдей салмақтық үлесі бар үлгілер үшін (16%)  $n_{cover}=1.4$  көбірек, қарағанда  $n_{cover}=1.5$  тең 6% (есеп айырысулар бойынша 7%), бір колориметриялық бөренеді жатқан, бірақ люминофордың әртүрлі массалық үлесімен (16% және 25%) жатқан үлгілер үшін  $n_{cover}=1.4$  көп жағдайда  $n_{cover}=1.5$  9-12% дейін (16%-ға есеп айырысу бойынша).

Кесте 4.1 - Люминофоры бар платадағы чип жарықдиодты модульдерінің үлгілеріне арналған есептеулер мен эксперименттердің нәтижелері

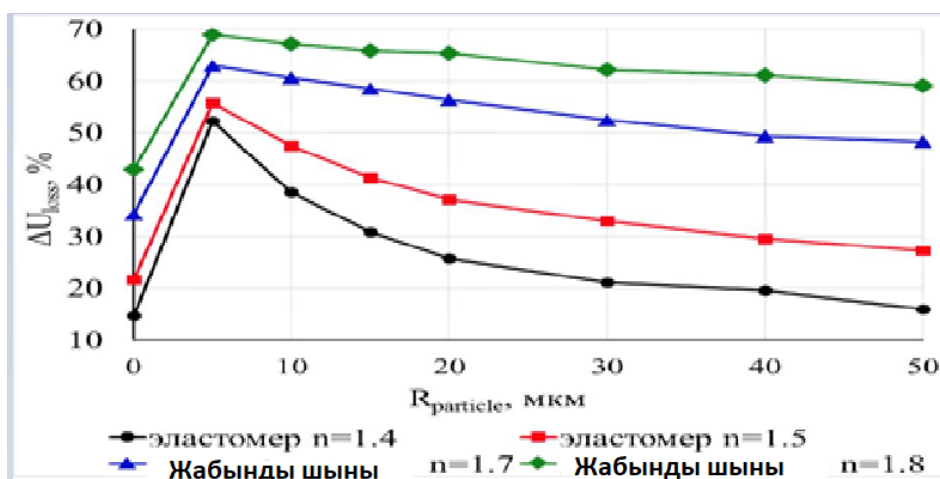
Үлгі сипаттамасы			нормаланған оптикалық қуат	
n	бөлшектер радиусы, мкм	люминофордың салмақтық үлесі,	Эксперимент	Есептеу
1.4	7	16	1.00	1.00
1.5	7	16	0.94	0.93
1.5	7	25	0.88	0.84
1.5	7	25	0.91	



#### 4.4 Люминофор бөлшектерінің орташа радиусының әсерін зерттеу

Одан әрі есептеулер оптикалық жабынның материалын сынудың әртүрлі көрсеткіштері бар платадағы чип модульдері үшін жүргізілді  $n_{cover}$ : 1.8, 1.7 (тығыздығы 2200 кг/м<sup>3</sup> жуық жабынды шынылар) және 1.5, 1.4 (тығыздығы 1000 кг/м<sup>3</sup> жуық эластомерлер) және люминофор бөлшектерінің әртүрлі радиустарымен  $R_{particle}$ : 5, 10, 15, 20, 30, 40 и 50 мкм. Оптикалық элементтегі люминофор бөлшектерінің массалық үлесі өзгеріссіз қалды және силиконды эластомерлер үшін – 13%, ал әйнектер үшін 6% құрады, бұл бөлшектердің бір көлемдік үлесіне сәйкес келеді.

4.5-суретте кесте бейнеленген. оптикалық жабынның әр түрлі материалдарына арналған люминофор бөлшектерінің орташа радиусынан оптикалық қуат шығындарының тәуелділігі 0 мкм радиусы люминофорсыз оптикалық жабдыққа сәйкес келеді. Сондықтан, оптикалық жабынды оптикалық қуаттың жоғалуына үлкен әсер етеді, сондықтан оптикалық жабынды төмен сыну көрсеткішімен материалдарды пайдалану жақсы. Люминофордың ірі бөлшектерін пайдалану люминофордың бөлшектерінің/оптикалық жабынның бөлу шекарасында жарықтың шашырауының әсерін төмендетуге мүмкіндік береді, өйткені люминофор бөлшектерінің саны төмендейді және сәуленің бос жүрісінің шашырауына дейін қашықтығы артады.



Сурет 4.5 - Оптикалық жабынның әр түрлі материалдары үшін люминофор бөлшектерінің орташа радиусынан платадағы чип модуліндегі оптикалық қуат шығындарының тәуелділігі

Қуатты люминофорлы жарықдиодты модульдерде қолданылатын эластомерлер төмен жылу өткізгіштікке ие, бұл энергияны түрлендірген кезде люминофорда бөлінетін жылуды нашар бұрудан жергілікті қызуға алып келеді. Бұл жарықдиодты модульдердің тиімділігін төмендетеді, өйткені люминофордың тозуына әкеледі. Бұл мәселені шешудің бірі-люминофорлы



жабындарды эластомерлер негізінде жақсы жылу өткізгіштігіне ие легирленген шыныға ауыстыру болып табылады [97].

Эластомерлерге қарағанда шынының сыну көрсеткішін кең ауқымда түрленуге болады, оның ішінде оны люминофор бөлшектерінің сыну көрсеткішінің мәніне дейін ұлғайтуға болады, бұл оптикалық жабын материалының шекарасындағы жарықтың шашырауымен байланысты. Оптикалық қуаттың жоғалуын/люминофор бөлшектерін болдырмайды. Алайда, есептеу нәтижелері көрсеткендей, қуат шығындарының жалпы азаюына осылайша қол жеткізу мүмкін емес, себебі шекарадағы оптикалық жабын/ауа толық ішкі шағылысу есебінен қуаттың жоғалуы анықтаушы болып табылады. Бұл жағдайды жарықдиодты құрылғылар үшін жаңа оптикалық жабындарды әзірлеу кезінде ескеру қажет.

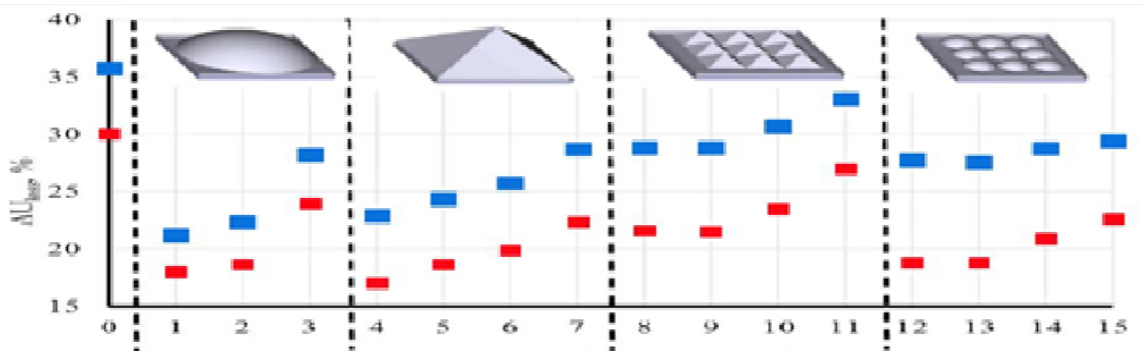
Осылайша, құрамында люминофор бар оптикалық жабындардағы Жарық шашырауының сандық үлгілеу көмегімен жүргізілген платадағы чип жарықдиодты құрылғыларындағы қуаттың жоғалуына әсерін зерттеу мұндай құрылғылардағы қуаттың жоғалуына ең үлкен әсер оптикалық жабын/ауа бөлу шекарасында толық ішкі көрініс беретінін көрсетті. Оптикалық жабынды материалының сыну көрсеткішінің оңтайлы мәні қарастырылған чип модулінде қуаттың жоғалуы тұрғысынан, платада 1.4-ті құрады. Люминофордың бөлшектеріндегі жарықтың шашырауымен байланысты қуат шығынын төмендету үшін ірі бөлшектермен люминофорды пайдалану ұсынылады.

#### **4.5 Люминофор бар платадағы чип LED модуліндегі оптикалық қуатты жоғалтуға оптикалық жабынның беті формасының әсерін зерттеу**

Оптикалық жабынның беткі қабатының оптикалық қуатын жоғалтуына әсерін зерттеу үшін люминофор бар жарықдиодты модульде есептеулер жүргізілді, есептеу параметрлері 3.2 п. сипатталған, жабынның жазық бөлігінде (қалыңдығы 0.6 мм) люминофор бөлшектерінің көлемді шашырауы үлгіленді. Люминофорды модельдеу Ми моделі арқылы жүргізілді.

Люминофорды модельдеу үшін люминофор бөлшектерінің сыну көрсеткіші  $n_{\text{phosphor}}=1.83$ , люминофор бөлшектерінің массалық үлесі 16% және оның бөлшектерінің орташа радиусы 10 мкм. Беттің пішіні және олардың геометриялық сипаттамалары 1-қосымшада келтірілген.

4.6-суретте оптикалық жабынды әртүрлі формадағы чип модульдері үшін есептеулер нәтижелері көрсетілген, жабынның тегіс бөлігі люминофор бар. Есептеу көрсеткендей, чип-платада Модулінің оптикалық жабынының бетіне оптикалық элементті қосу жазық беті бар модульмен салыстырғанда сәулелену қуатын 10-15% - ға арттыруға мүмкіндік береді.



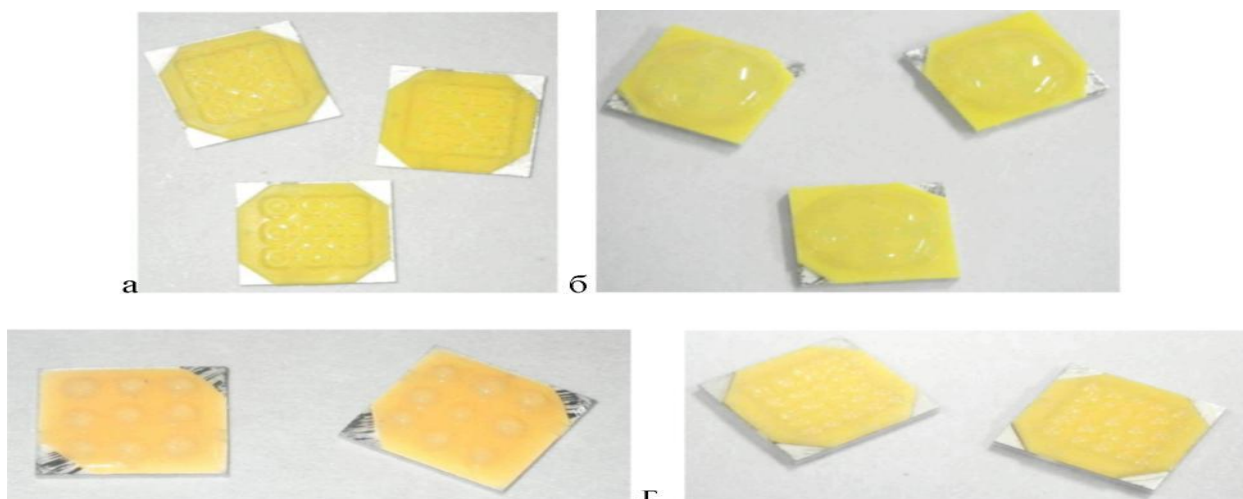
Сурет 4.6 - Оптикалық қуаттың шығынының оптикалық жабынның формасына тәуелділігі, люминоформен жабудың жалпақ бөлігі. Көк-көздің бірінші түрі; қызыл-көздің екінші түрі

#### 4.6 Жарықдиодты Чип модульдері тиімділігі

Жұмыс процесінде платадағы чип Модулінің оңтайлы параметрлері анықталды және Оптиган жақ (Санкт-Петербург) компаниясындағы платадағы чип қуатты жарықдиодты құрастыру өндірісінде платадағы Чип LED модульдерінің үлгілерінің тәжірибелік партиясы дайындалды (4.7-сурет). Жарықдиодты Модульдер үлгілері үшін платадағы чип келесі шамалар өлшенді: сәуле шығару қуаты ( $P_{opt}$ , Вт), жарық ағыны ( $F$ , Лм), сәуле шығару спектрі, коррелирленген түс температурасы ( $CCT$ , К), түстілік координаттары ( $x, y$ ), түс беру индексі (CRI), жарық қайтарымы (Eff, Лм/Вт).

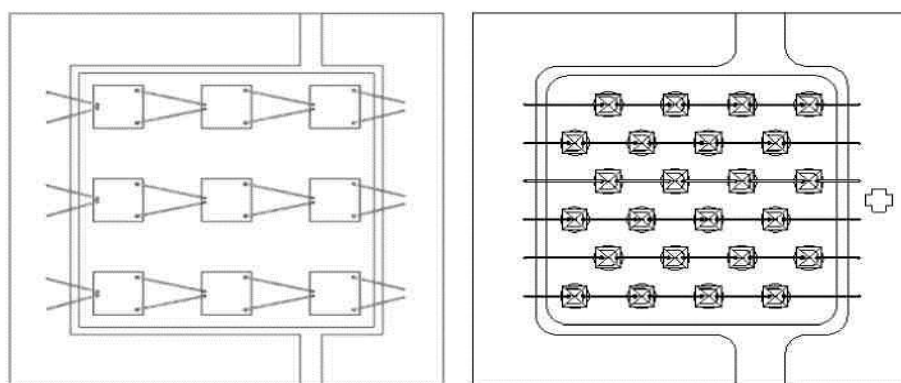
Барлық әзірленген тәжірибелік үлгілер келесі параметрлермен ерекшеленеді:

- 1) Коррелирленген түстік температура (пайдаланылатын люминофорлық қоспамен анықталады): 2700-ден 6500 К-ге дейінгі аралықта.
- 2) Чиптердің саны, өлшемдері және орналасуы: тоғыз чиптермен және жиырма төрт чиптермен Модульдер.
- 3) Оптикалық жабын бетінің нысаны:
  - тегіс беті оптикалық жабынды үлгілер;
  - оптикалық жабынның беті" толқынды " үлгілер: бірнеше линзадан жасалған матрица (4.7- сурет, в, г);
  - барлық жұмыс бетінің үстінде бір линзасы бар үлгілер (4.7-сурет);
  - бетінде лазермен сақина кесілген оптикалық жабыны бар үлгілер (4.7 а сурет).



Сурет 4.7 - Оптикалық жабынның текстураланған беті бар платадағы чип дайындалған жарықдиодты модульдерінің үлгілері: а - лазермен кесілген сақиналар, б - бір линза, в, г - тоғыз және жиырма төрт линзадан тұратын матрица

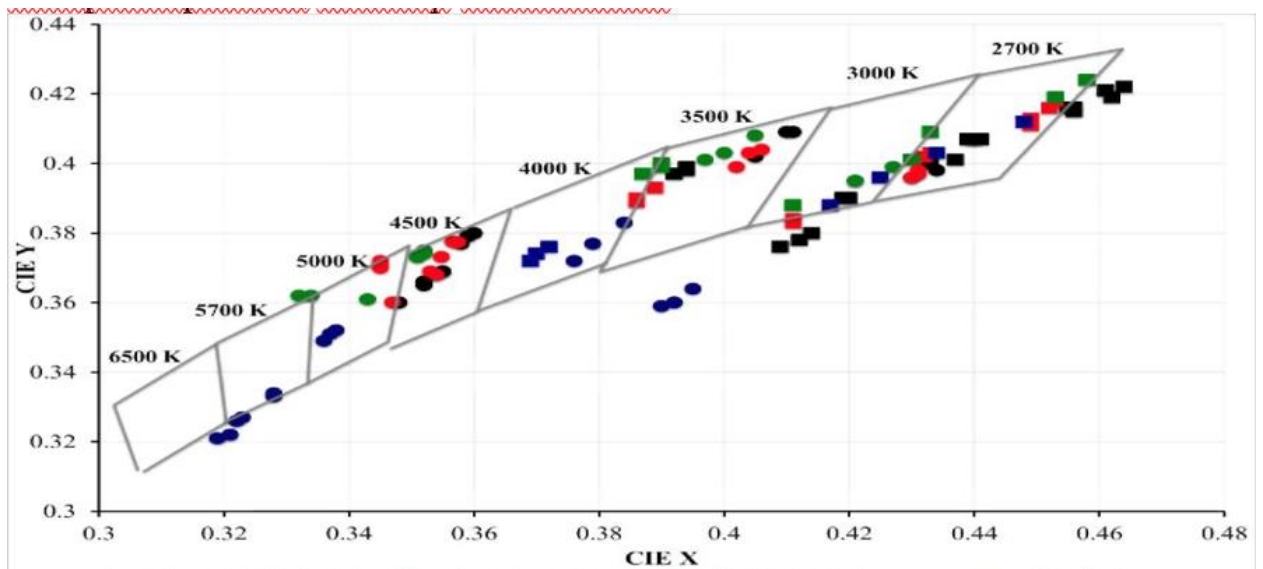
Чип модульдері тиісті өлшемдері бар тоғыз және жиырма төрт чипі бар платада пайдаланылды. Чиптер 1.2 мм 1.2 мм және 0.56 мм 0.56 мм 0.56 мм. олардың электрлік қосылыстары 4.9-суретте бейнеленген. 9 чипі бар платадағы чип модульдері өте қуатты болып табылады және оларға шамамен 10 Вт беріледі, жиырма төрт чипі аз қуатты Модульдер, оларға шамамен 5 Вт беріледі, бұл оларды кең бұрыштағы бағыттылық диаграммасына жету үшін түрлі жазықтықтарда бірнеше модульдер Орнатылатын көлемді платалары бар шамдарда пайдалану үшін неғұрлым перспективалы етеді.



Сурет 4.8 - Чиптердің схемалық орналасуы

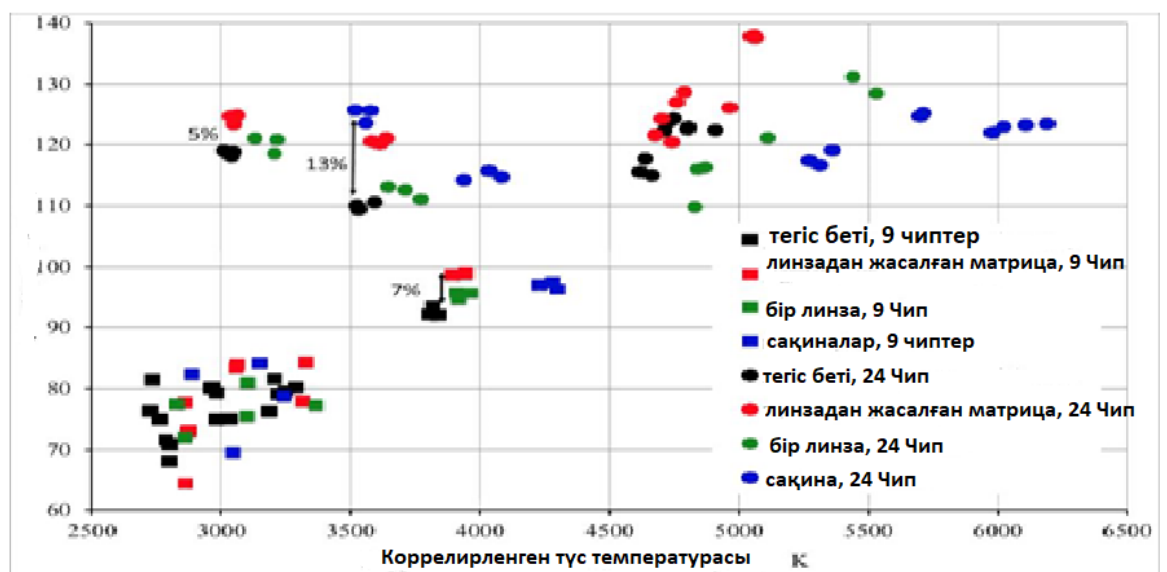
Платадағы чип модульдерінің тәжірибелік үлгілерін өлшеу нәтижелері 2-қосымшада келтірілген.

4.9-суретте Cie XYZ 1931 түсті кеңістігінің диаграммасында зерттелген үлгілердің түстілік координаттары бейнеленген, сондай-ақ диаграммада колориметриялық биналар бейнеленген.



Сурет 4.9 - Зерттелген үлгілердің түстілік координаттары және CIE XYZ түсті кеңістіктегі колориметриялық биналар 1931

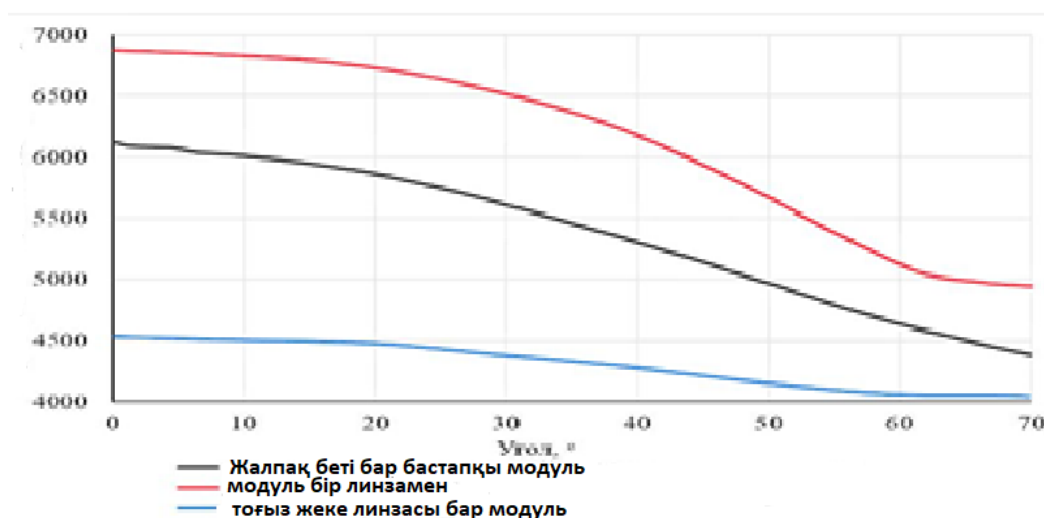
4.10-суретте жарық беруді өлшеу нәтижелері (Eff. Жарықдиодты модульдердің зерттелген үлгілері үшін. Диаграммадан көрініп тұрғандай, чип модульдерінің үлгілері жиырма төрт чипі бар, тоғыз чипі бар үлгілерге карағанда энергия тиімді, бірақ олар аз қуатты. Энергиялық тиімділік жарық энергиясына түрлендірілген электр энергиясының мөлшерін сипаттайды, қалған энергия жылу энергиясына түрлендіріледі, оны радиатордың көмегімен бұру қажет, өйткені Чип элементтеріндегі температураның өсуі жұмыс сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі.



Сурет 4.10 - Жарықдиодты модульдердің зерттелген үлгілерінің Жарық қайтарымы

Люминофорсыз модульге қарағанда люминофор жабыны бар платада чип модулінде жарықтың таралу механизмі күрделі, өйткені люминофор бөлшектерінде оптикалық жабында жарықтың көлемді шашырауы маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, оптикалық жабындыда люминофор бар платадағы чип модульдері үшін жабындыда люминофор болмаған жағдайда, жабындының бетін текстуралау модульдің Жарық берілуіне аз әсер етеді. Ең үлкен жарық беру оптикалық жабынның толқынды нысаны бар модульдерге – жиырма төрт чипі бар модульдер үшін 120-125 Лм/Вт және тоғыз чипі бар қуатты модульдер үшін 80-100 Лм/Вт (кіріс қуаты 10 Вт) сәйкес келеді. Беттердің мұндай түріне сақиналы тесіктерді жабуда немесе оптикалық жабынның бетінде микролинзаларды орналастыруда қол жеткізіледі. Қуатты жарықдиодты модульдерді Үшін (кіріс қуаты 10 Вт) корреляциялық температурасы 2500 - 3500 К, құрылым бетінің оптикалық жабу әсер етпейді, бұл үлкен концентрациясы люминофорлық бөлшектердің оптикалық жабу, жарықдиодты модульдерге арналған аса жоғары корреляциялық температура ұлғаюын атап өтуге болады жарық беру есебінен текстуралық бетінің оптикалық жабу 7% - ға. Аз қуатты жарықдиодты модульдер үшін (кіріс қуаты 5 Вт) оптикалық жабынның бетін 5-13% текстуралау есебінен жарық беруді ұлғайтуды атап өтуге болады.

Чип модульдерінің үш эксперименттік үлгілері үшін тоғыз чипті бар платада коррелденген түс температурасының бұрышында таралуын өлшеу жүргізілді, өлшеу нәтижелері 52, 0° - суретте модульдің перпендикуляр бетінің жазықтығына сәйкес келеді. Кестеден көрінеді. Чип модулі тоғыз жеке линзасы бар бұрыштағы корреляцияланған түс температурасының біркелкі таралуына ие, бұл әртүрлі төсеме орындарында орналасқан чиптерден түсетін сәулелердің жүрісінің ұзындығы әрбір Чип үстінде оптикалық жабынның шамамен бірдей қалыңдығының есебінен теңестірілетіндігімен түсіндіріледі.



Сурет 4. 11 – Коррелляцияланған түс температурасын бұрышқа бөлу

Ұсынылған конструкциялардың жаңалығы платада LED Чип Модулінің оптикалық жабынының бетін текстурациялау болып табылады. Қазіргі

уақытта жасалған, платада чип технологиясын пайдаланатын жарықдиодты Модульдер Оптикалық жабынның тегіс бетіне немесе жабынның бетінде бір линзаға ие, бірақ осы екі шешімнің де үлкен кемшіліктері бар. Оптикалық жабынның тегіс беті жабын/ауа шекарасындағы ішкі толық шағылысудан байланысты конструкциядан жарықты барынша шығаруды қамтамасыз етпейді. Бір үлкен линзамен жабдықталған платадағы чип модулі бірнеше басқа кемшіліктерге ие: біріншіден, бір линза материалдардың көп мөлшерін пайдалануды талап етеді, екіншіден, жабында люминофор болған жағдайда, бірнеше чипте бір линза бұрышы бойынша түс температурасының біркелкі таралуына алып келеді, себебі төсеме шеттері бойынша орналасқан чиптерден көк жарық төсеменің ортасында орналасқан чиптерден түсетін жарыққа қарағанда жабын/ауа шекарасына дейін едәуір аз қашықтық өтеді, бұл "жаңғақ"әсеріне әкеледі.

Оптикалық жабынның бетін текстурациялаудың Жаңа ұсынылған шешімдері барлық осы кемшіліктерді болдырмауға мүмкіндік береді және жарықдиодты технологияда қолданылатын материалдарды өңдеу әдістемелерін пайдалана отырып орындалуы мүмкін: молдинг (ыстық престеу), лазерлік өңдеу.

## 5 Лазерлік жүйені беру үшін оптикалық жүйелерді зерттеу оптикалық талшықтағы сәуле шығару

### 5.1 Лазерлік берілістің есептік моделін қою және верификациялау оптикалық талшықтағы сәуле шығару

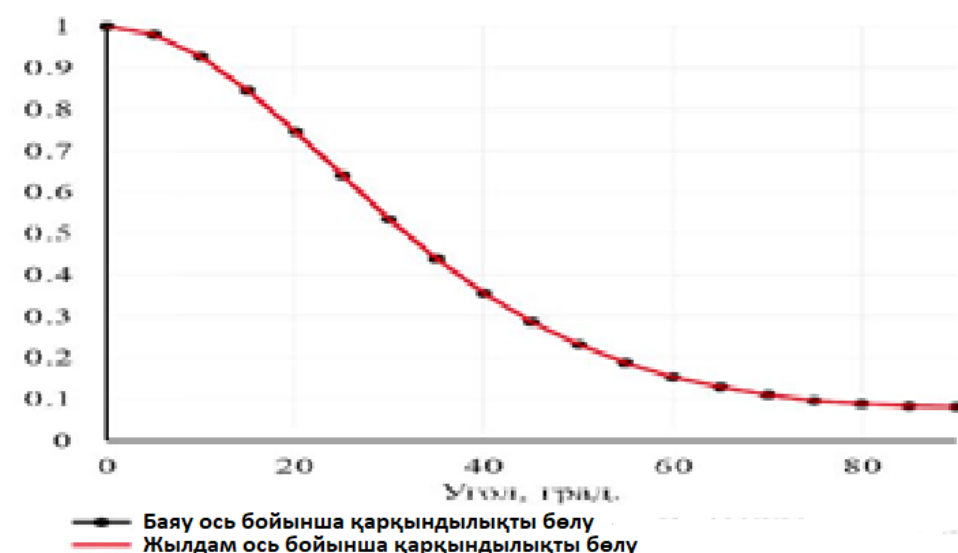
Оптикалық талшықты лазерлік сәулеленуді тарату жүйесін сандық моделдеу сәулелерді трассалау үшін Монте-Карло әдісін пайдаланатын ZEMAX® коммерциялық бағдарламасында жүргізілді (2-тарауды қараңыз). Есептеу моделінің қойылымы мен верификациясы эксперимент нәтижелерінің негізінде жүзеге асырылды.

Бұл дипломдық жұмыста сәуле шығару көзі ретінде *ingaasp* гетероқұрылымындағы жартылай өткізгіш лазер қолданылды. Лазердің сәулеленуі келесі сипаттамаларға ие болды:

- дөңгелек көз өлшемдері 0.779 мкм / 0.779 мкм;
- сәулелену толқынының ұзындығы  $\lambda = 1.3$  мкм;

сәуле шығару қарқындылығы ең жоғары мөлшердің жартысын құрайтын сәуле шығару шығынының бұрыштары  $\theta_{\parallel} = \theta_{\perp} = 32^{\circ}$ .

Сәуле шығару көзінің бағыттылық диаграммасы үлгілегенде (бұрышқа байланысты сәуле шығару қарқындылығын тарату) Гауссты бөлу түрінде (2.1-тармақ қойылды). Экспериментте сипатталған симметриялық таралу үшін (5.1-сурет) [7]  $G_x = G_y = 2.5$ .



Сурет 5.1 - Көз сәулесінің қарқындылығын бөлу

Оптикалық параметрлері бір модальды талшыққа сәйкес келеді Corning SMF-28™:

- жүрек диаметрі  $t_{core} = 8.7$  мкм;
- шағылыстырғыш қабықтың диаметрі  $d_{clad} = 25$  мкм;



- өзек материалы: SiO легирленген GeO, сыну көрсеткіші  $n_{\text{core}}=1.452$ ,  $i=1.3$  мкм үшін;
- шағылыстырғыш қабықтың материалы: SiO<sub>2</sub>, сыну көрсеткіші  $n_{\text{clad}}=1.447$ ,  $i=1.3$  мкм;
- Сандық апертура  $NA = 0.12$ .

Жұмыс барысында жалпақ шеткі және оптикалық талшықтың шетіндегі конустық линзамен оптикалық талшыққа лазерлік  $\lambda = 2.6$  мкм сәулеленуді енгізу тиімділігі өлшенді. Оптикалық талшықтың оптикалық талшығының материалымен сәйкес келеді,  $D = 8.7$  мкм.

Сәулеленуді енгізу тиімділігі (оптикалық қуатты беру коэффициенті  $\eta$ ) оптикалық талшықты-оптикалық сәулеленудің кіріс қуатының (лазердің сәулеленуінің шығу қуатының) оптикалық талшықтан шығудағы сәулелену қуатына қатынасы ретінде анықталады, енгізілетін шығындар децибелдерде (дБ) (18) арақатынасынан өлшенеді.

Өлшеулер мен тиісті есептеулердің нәтижелері 5.1-суретте келтірілген. Есептеу нәтижелері экспериментпен жақсы келісіледі және әзірленген есептік модельді параметрлік есептеулер үшін қолдануға болады.



Сурет 5.2 - Тәуелділік шығынын сәуле арақашықтық сәулелену көзіне дейін талшықты-оптикалық деректер - эксперимент

## 5.2 Лазерлік сәулеленуді оптоталшыққа беру үшін жүйелердің параметрлік есептеулерін жүргізу

Жарық технологиясы және оптоэлектроника кафедрасында ИТМО университетінде жасалған мод пассивті синхронизациясымен жартылай өткізгіш лазердің сәулеленуі модельденді. ПСМ бар конструктивті лазер келесі элементтерден тұрады: корпус, баспа платасы, тұшпара элементі, термистор,

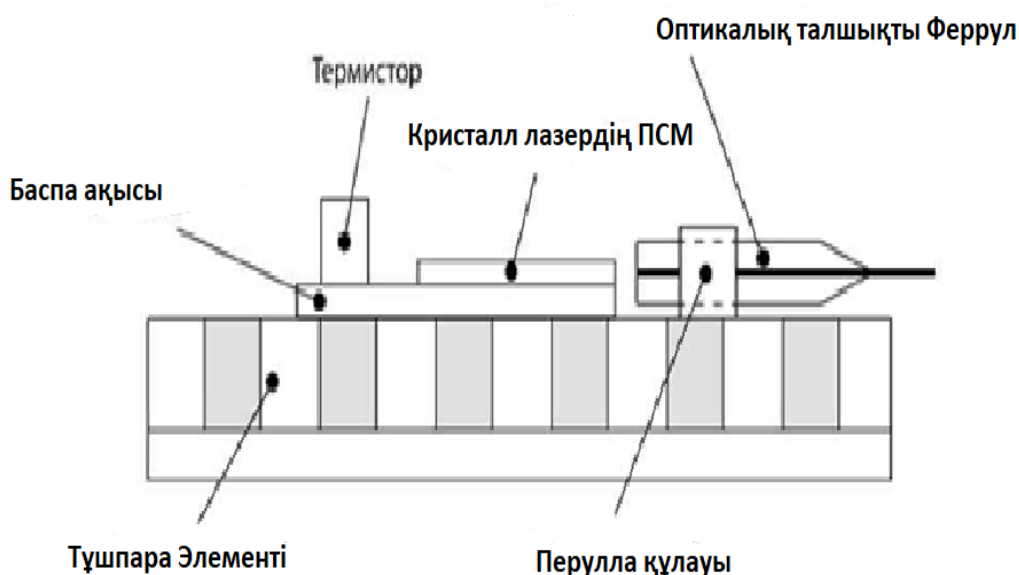


ПСМ лазер кристаллы, бір ұшында FC/PC оптикалық ажыратқышы бар оптикалық талшық, оптикалық талшықты бекітуге арналған феррул. INP төсенішіндегі InGaAs/InAlAs гетероқұрылымының негізіндегі лазер кристалы, онда екі контакттілі қабат және кванттық шұңқырлармен белсенді аймақ бар.

КСМ бар лазердің техникалық сипаттамалары 5-кестеде келтірілген. ПСМ бар лазердің схемалық бейнесі 5.2-суретте бейнеленген.

Кесте 5.1 - Пассивті синхрондау лазердің техникалық сипаттамасы

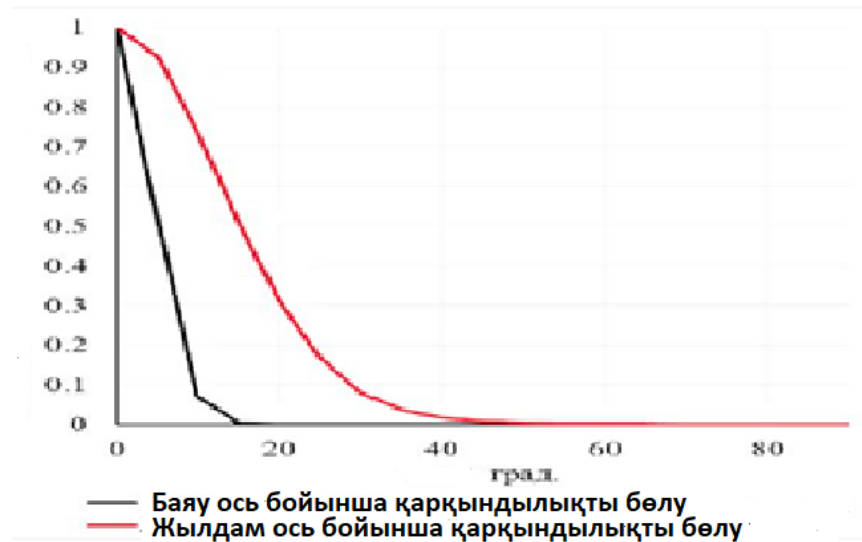
Параметрі	Өлшем бірліктері	Мағынасы
Толқын жұмыс диапазоны	Нм	1300-1550
Импульстердің жүру жиілігі	ГГц	9.5-10.5
Импульстердің жүру жиілігінің салыстырмалы өзгеруі	%	1-ден артық емес
Импульстің ұзақтығы	пс	5-Ю
Оптикалық сәуле шығару қуаты	мВт	9-11
Сигнал қатынасы / орташа квадраттық шу деңгейі	бірліктерге қатысты	9-Ю
Уақытша дірілдің орташа квадраттық мәні (джиттер)	фс	200-210
Жұмыс тогы	мА	200-300



Сурет 5.3 - СМ - мен Лазердің схемалық бейнесі

Лазерлік көз параметрлері: 4 мкм/0.6 мкм тікбұрышты көз өлшемдері; бұрышқа байланысты сәулелену қарқындылығының таралуы Гауссты бөлу түрінде (56-сурет), сәулелену шығынының бұрыштары түрінде берілген.

$\theta_{\parallel} = 10^{\circ}$  және  $\theta_{\perp} = 30^{\circ}$  тиісінше "жылдам" және "баяу" ось бойынша; сәулелену толқынының ұзындығы  $\lambda = 1.55$  мкм.



Сурет 5.4 - Бұрышқа байланысты сәулелену қарқындылығының таралуы

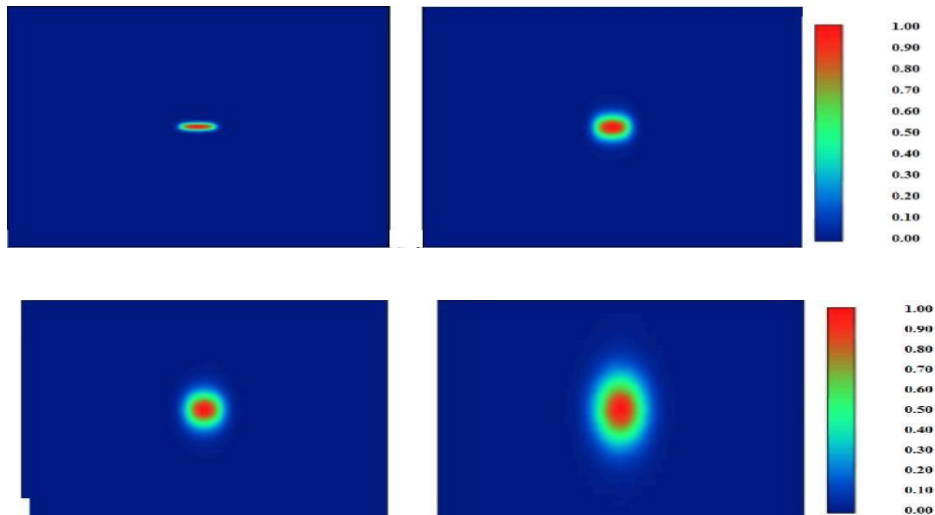
Оптоталшық параметрлері бір модальды Thorlabs SM талшығына сәйкес келеді-980-5.8-125:

- жүрек диаметрі  $d_{core}=8.7$  мкм;
- шағылыстырғыш қабықтың диаметрі  $d_{cl}=125$  мкм;
- өзек материалы: SiCh легирленген GeCh, сыну көрсеткіші  $n_{core}=\sqrt{149}$ ,  $\lambda=1.55$  мкм үшін

- шағылыстырғыш қабықтың материалы: SiO<sub>2</sub>, сыну көрсеткіші  $n_{dad}=\sqrt{444}$ ,  $\lambda=1.55$  мкм

- сандық апертура  $NA = 0.16$

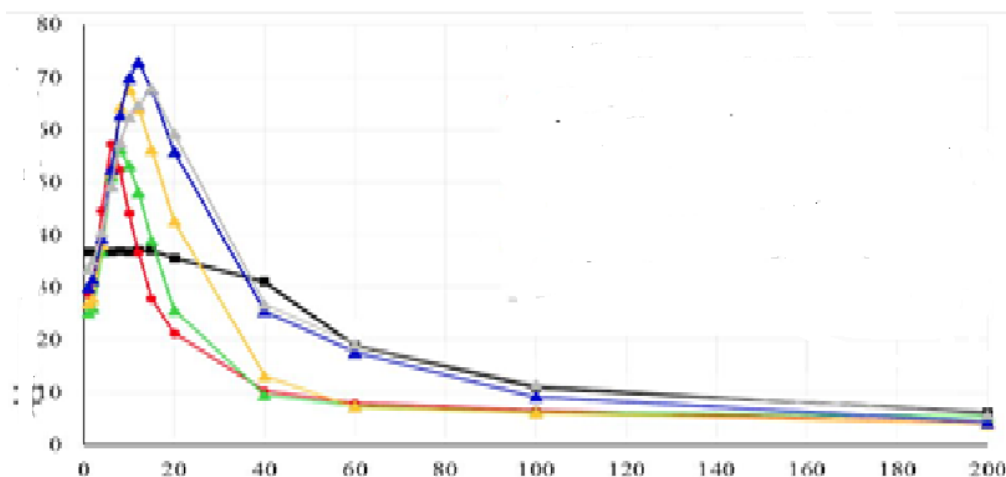
1 мкм, 6 мкм, 10 мкм және 20 мкм қашықтықта 20 мкм квадрат детекторында тіркелген нормаланған энергетикалық жарықтықты бөлу 5.4-суретте бейнеленген.



Сурет 5.5 - Нормаланған энергетикалық жарықтықты арақашықтықта тарату: а) 1 мкм, б) 6 мкм, в) 10 мкм, г) 20 мкм

6 мкм қашықтықта сәуле шығару дақтары диаметрі 4 мкм болатын шеңберге жақын дөңгелек пішінді болады. Қашықтықтағы сәулелену дақтарының өлшемдері, оптикалық талшықтың диаметрімен өлшенеді және тура түйістіру кезінде оптикалық талшыққа сәуле шығаруды енгізу тиімділігінің төмендігі сәулелену шоғырының шығындау бұрыштарының артуымен байланысты. ( $\theta_{\parallel} = 5^{\circ} - 10^{\circ}$ ,  $\theta_{\perp} = 30^{\circ} - 60^{\circ}$  оптикалық талшықтың апертуралық бұрышының үстінде ( $\theta_a = 9^{\circ}$ ).

Оптикалық талшыққа сәуле шығару көзі мен оптоталшықты біріктіруге арналған оптикалық талшықтың арасындағы қашықтықтан сәуле шығаруды енгізу тиімділігінің есептік тәуелділігі: оптикалық талшықтың төреті жалпақ, оптикалық талшықтың бүйірінде қисық радиусымен сфералық линза орнатылған  $r_c = 4.35$  мкм, биіктігі  $h = 4.35$  мкм, негіз радиусы  $R = 4.35$  мкм, оптоталшықтың шетіне биіктігі конус орнатылған  $h = 5; 4; 3; 2$  мкм және негіз радиусы  $R=10$  мкм, линза мен конус материалы оптикалық талшықтың өзегі материалымен сәйкес келеді (5.5-сурет). Берілген параметрлері бар лазер үшін ең оңтайлы оптикалық талшықты биіктігі 3 мкм конус тәрізді микролинзаны қолдану болып табылады. Оптикалық талшықты және сәуле шығару көзі арасындағы оңтайлы қашықтық оптикалық талшықтың шеткі бетінің пішінімен анықталады. Оптикалық талшықтар үшін жалпақ шеткі 37% (4.35 дБ) енгізудің ең үлкен тиімділігі көзі мен 1 мкм-ден 15 мкм-ге дейін оптикалық талшықтар арасындағы қашықтықтарға сәйкес келеді. 3 мкм биіктіктегі конус тәрізді микролинзасы бар оптикалық талшық үшін сәуле шығару көзі мен оптикалық талшық арасындағы оңтайлы қашықтық 12 мкм құрайды, бұл ретте 73% (1.37 дБ) сәуле шығаруды енгізу тиімділігіне қол жеткізіледі. Оптикалық талшықтар үшін биіктігі 4.35 мкм биіктіктегі сфералық линзасы бар оптикалық талшықтар үшін сәуле шығару көзі мен оптикалық талшықтар арасындағы оңтайлы қашықтық 6 мкм құрайды, бұл ретте 57% (2.44 дБ) сәуле шығаруды енгізу тиімділігіне қол жеткізіледі.

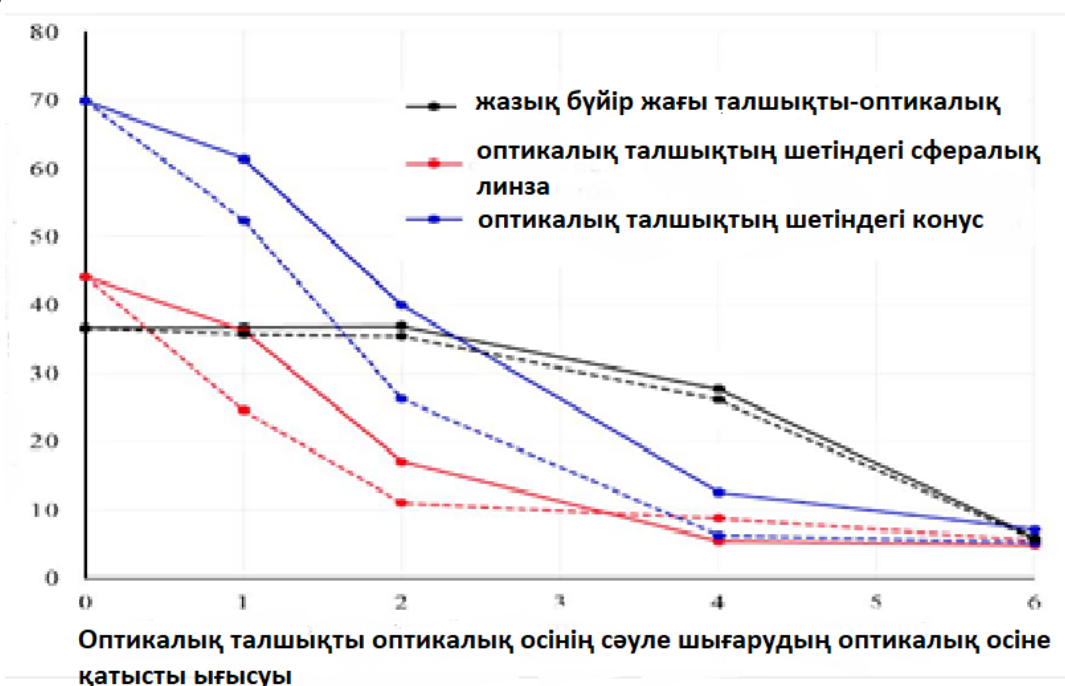


Сурет 5.6 - Оптикалық талшыққа сәуле шығаруды енгізу тиімділігінің сәулелену көзі мен оптикалық талшықтар арасындағы қашықтыққа тәуелділігі



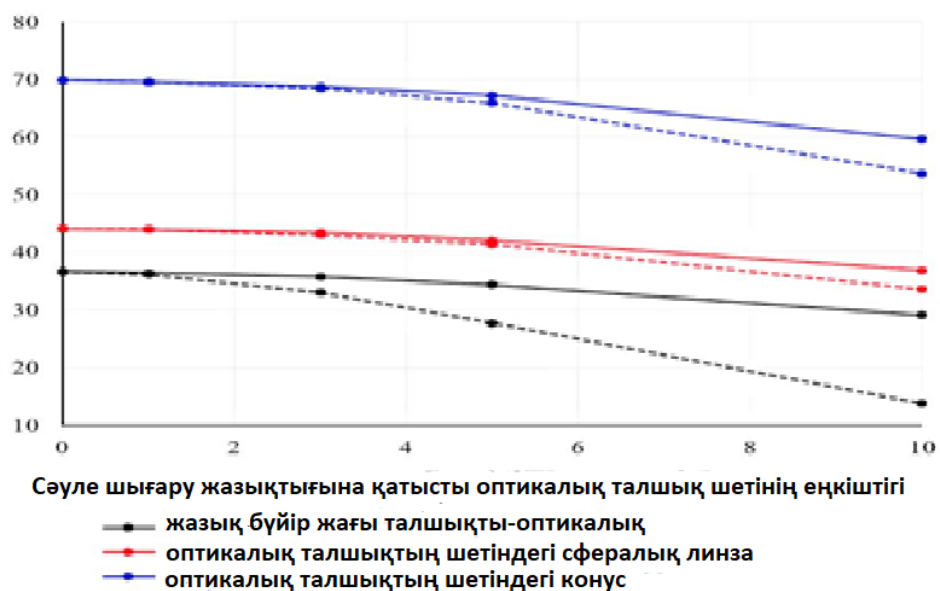
Сурет 5.6 - Линзасы бар оптикалық талшықты және бүйірдегі конус

Сонымен қатар, оптикалық талшық пен лазердің оптикалық осьтерінің сәулеленуді енгізу тиімділігіне әсерін бағалау жүргізілді, яғни оптикалық талшық жағдайы мен көлбеуінің аздаған өзгерістері кезінде сәулеленуді енгізу тиімділігінің өзгеруі анықталды. Оптикалық жүйенің үш нұсқасы үшін түзетудің нәтижелері 5.7 және 5.8-суретте келтірілген. Оптикалық жүйенің құрамында микролинздер бар радиалды ығысуға аса сезімтал, бірақ бұрыштық келісуге аз сезімтал.



Сурет 5.7 - Лазер мен оптикалық талшықтың оптикалық осінің сәулеленуді енгізу тиімділігіне, сәулелену көзінен оптикалық оське дейінгі қашықтық 10 мкм: тұтас желілер-оптикалық осін жылдам ось бойынша ауыстыру, нүктелі-баяу ось бойынша

Оптикалық талшықтың бір осінен 1 мкм-ге радиалды ығысуы кезінде жалпақ шеті бар оптикалық талшықтар үшін сәулелену енгізу тиімділігі іс жүзінде өзгермейді, оптикалық линзасы бар оптикалық талшықтар үшін шетінде шығындар 20-40% - ға өседі, шетінде конус тәрізді линзасы бар оптикалық талшықтар үшін шығындар 27-45% - ға өседі.



Сурет 5.8 - Лазер мен оптоталшықтың оптикалық осінің сәулеленуді енгізу тиімділігіне, сәулелену көзінен оптоталшыққа дейінгі қашықтық 10 мкм: тұтас желілер – тез ось бойынша сәулелену жазықтығына қатысты оптикалық талшықтың шеткі көлбеу, нүктелі-баяу ось бойынша

## ҚОРЫТЫНДЫ

Осы жұмыста мынадай негізгі нәтижелер алынды:

Zemax® бағдарламасындағы сандық модель платадағы диодты чип модулін есептеу үшін әзірленді және верификацияланған..

Сандық модельдеудің көмегімен платадағы чип Модулінің оптикалық жабынының бетін текстурациялау жазық беті бар модульмен салыстырғанда оптикалық қуаттың жоғалуын 10-15% - ға төмендетуге мүмкіндік береді.

Оптикалық қуаттың жоғалуы люминофор бөлшектерінің радиусы ұлғайған кезде кемиді. Люминофор бар платадағы чиптерді жарықдиодты модуліне арналған оптикалық жабын материалының сыну көрсеткішінің оңтайлы мәні,  $n=1.4$ .

Жарық қайтарғыш 125-130 Лм/Вт бар (коррелирленген түстік температураға байланысты) 2700-6500 К коррелирленген түстік температураға ие, жарық қайтарғыш 125 – 130 Лм / Вт бар шығу оптикалық қуаты 1.8 Вт Чип – на-платада жарықдиодты Модульдер үлгілерінің тәжірибелік партиясы дайындалды, бұл жабынның жазық беті бар ұқсас үлгілерден 5-13% жоғары..

Оптикалық талшыққа лазерлік сәулеленуді Таратудың оптикалық жүйесін есептеу үшін ZEMAX® бағдарламасында Сандық модель әзірленді және верификацияланған.

Оптикалық талшықтың шетіндегі микролинзаны келісу элементі ретінде қолдану оптикалық талшыққа лазерлік диодтың сәулеленуін енгізу тиімділігінің мәніне 73% жетуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер келесі негізгі қорытындыларды тұжырымдауға мүмкіндік береді:

Оптикалық жабындының оңтайлы түріне қойылатын негізгі талаптар: әрбір Чип үстінде қисық радиусымен (чиптер мен олардың өлшемдері арасындағы ара қашықтықпен анықталады), платадағы чип Модулінің қалған бөліктерінде оптикалық жабындының барлық сым қосылыстарын жабуы тиіс.

Оптикалық жабынның жазық беті бар модульдер үшін, егер ламберттер төсенішінде шашырату болса, оптикалық қуаттың шығыны ең аз. Оптикалық жабынның текстурацияланған беті бар модульдер үшін ең аз шығындар төсеніштің айналы шағылысуына сәйкес келеді.

Жарықдиодты Чип модульдері үшін, құрамында люминофор бар, "оптикалық жабын/ауа" бөлімінің шекарасында толық ішкі көрініс "люминофор/оптикалық жабын" шекарасындағы жарықтың шашырауына карағанда, оптикалық қуаттың жоғалуына үлкен әсер етеді, сондықтан жабын материалы ретінде силиконды эластомерлерді немесе сыну көрсеткіші төмен шыныларды қолданған жөн. "Люминофордың бөлшектері/оптикалық жабын" бөлімінің шекарасында жарықтың шашырауының әсері люминофордың аса ірі бөлшектерін пайдаланған кезде төмендейді.

## 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., 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., 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 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.

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 [Текст] / А. Снайдер, Дж. Лав; - М.: «Радио и связь», 1987. - 655 с.
- 38 Строшио, М., Дутта, М. Фононы в наноструктурах [Текст] / М. Строшио, М. Дутта; - М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 320 с.
- 39 Строшио, М., Дута, М. Фононы в наноструктурах [Текст] / М. Строшио, М. Дута; - М.: Физматлит 2-е издание, 2008.- 319 с.
- 40 Убайдулаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р.Р. Убайдулаев; - М.: Эко-Трендз, 2-е стереотипное изд. 2002. - 269 с.
- 41 Фостер, Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности [Текст] / Л.Фостер; - М.: Техносфера, 2008 г. - 352 с.
- 42 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] / Р.Фриман; - М.: Техносфера, 2006. - 495 с.
- 43 Чаплыгин, Ю.А. Нанотехнологии в электронике [Текст] / Под ред. Ю.А. Чаплыгина; - М.: Техносфера, 2005. - 446с.
- 44 Шлимак, И.С. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложение [Текст] / 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  $\mu\text{m}$  multimode graded index optical.
- 48 Богданкевич О. В., Дарзбек С. А., Елисеев П. Г. Полупроводниковые лазеры.–Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976.
- 49 Петров М. П. Световолокна для оптических линий связи. Часть 2//Соросовский образовательный журнал. – 1997. – №. 12. – С. 100-105.

50 Наний О. Е., Туркин А. Н. Оптические методы в информатике //М., Университетская книга. – 2010.

51 Смирнова И. П., Марков Л. К., Павлюченко А. С., Кукушкин М. В. AlGaInN-светодиоды с прозрачным р- контактом на основе тонких пленок ИТО //Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №. 3. – С. 384-388.

52 Марков Л. К., Смирнова И. П., Павлюченко А. С., Аракчеева Е. М., Кулагина М. М. Отражающий р-контакт на основе тонких пленок ИТО для флип-чип-светодиодов AlGaInN //Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – №. 11. – С. 1564-1569.

53 Мухина Е., Башта П. Технология Chip-on-Board: основные процессы и оборудование //Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2008. – №. 3. – С.54-59.

54 Никифоров С. Система параметровсветодиодов Электрические, фотометрические, спектральные (колориметрические) и энергетические характеристики //Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 5. – №. 13. –С. 16-27.

55 Джадд Д. Б., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. – 1978.