

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## "LÖVHƏ ÜZƏRİNDƏ ÇİP" TEXNOLOGİYASI ƏSASINDA YARADILMIŞ AĞ İŞIQ DİODLARININ OPTİK PARAMETRLƏRİNİN TƏDQIQI

İxtisas: 2203.01 - Elektronika

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Orucov Teymur Yaşar oğlu**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

### AVTOREFERATI

**Bakı – 2021**

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının (AMEA) Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

Fizika-riyaziyyat elmlər doktoru,  
professor  
**Sevda Həsən qızı Abdullayeva**

Rəsmi opponentlər:

Fizika üzrə elmlər doktoru,  
dosent  
**Elçin Əhməd oğlu Kərimov**

Fizika-riyaziyyat elmlər doktoru,  
professor  
**Eldar Mehralı oğlu Qocayev**

Fizika-riyaziyyat elmlər  
namizədi, dosent  
**Elşən Fayaz oğlu Nəsirov**

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.14 Dissertasiya şurası.

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın həqiqi üzvü,  
fizika-riyaziyyat elmlər doktoru,  
professor  
**Nazim Timur oğlu Məmmədov**

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika üzrə elmlər doktoru, dosent  
**Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva**

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmlər doktoru,  
dosent  
**Ayaz Hidayət oğlu Bayramov**

## İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

**Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.** Bu işin aktuallığı, hazırda ümumi işıqlandırmada, məlumat görüntü cihazlarında istifadə etmək və eyni zamanda siqnal ötürülməsi kimi müxtəlif tətbiq sahələri üçün daha səmərəli işıq enerjisi mənbələrinin inkişaf etdirilməsi üzrə böyük tədqiqat potensialı ilə əlaqədardır. Bu tip cihazların çoxu elektron çuxur keçidlərində lüminessensiya hadisəsinə əsaslanan işləmə prinsipinə malikdir, həmçinin müxtəlif lüminessent materiallara əsaslanır. Elektrik enerjisindən qənaətli şəkildə istifadə məsələsi qlobal xarakter daşıyır. Bu səbəbdən enerji baxımından yüksək səmərəli süni işıq mənbələrinin yaradılmasına maraq artır. Bir sözlə, işıqlandırmaya tələbat sürətlə artdığından, işıq diodu ilə işıqlandırmaya keçid ildə ~130 milyon manat qənaət edə bilər. Buna görə də bu günkü aktual məsələ bu cür cihazların istehsalı üçün istifadə olunan texnologiya və materialları təkmilləşdirməklə bərk cisim qurğuları ilə elektrik enerjisinin optik enerjiyə çevrilməsinin səmərəliliyini artırmaqdır. Kristalın aktiv zonasında rekombinasiya səmərəliliyinin artırılması və kontakta yaxın oblastlarda itkilərin və sızmaların azaldılması üçün kompleks aşkarlanma sxemləri və ya material birləşmələri də daxil olmaqla səmərəli işıq diodlarının yaradılması üçün böyük səylər göstərilmişdir. Bununla birlikdə, fosforların və hətta işıq diodlarının səmərəliliyi sahəsində (məsələn, yaşıl işıq diodlarının aşağı səmərəliliyi) hələ də həll olunmamış problemlər var ki, bu da onların iqtisadi cəhətdən sərfəli olan işıqlandırma bazarlarına daxil olmasına mane olur. Bu günün vəzifəsi işıq diodunun son səmərəliliyinə əhəmiyyətli təsir göstərən, işıq diod paketi içərisində fotonun daxili əks olunması və udulması kimi problemlərin həlli üçün işıq diodlarının optimallaşdırılmasıdır. Bu səbəbdən, yarımkeçirici işıq diod strukturlarının kvant səmərəliliyinin artırılması və bu sahədə aparılan araşdırmalarla yanaşı, fotonların çıxarılmasının artırılması üçün üsulların hazırlanması xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Dissertasiyanın mövzusu geniş olmaqla yanaşı, bir çox əsərlərin müəllifləri tərəfindən araşdırılmış, kifayət qədər ədəbi nəşrlər çap olunmuşdur. Ancaq bu sahədə araşdırma aparmaq üçün hələ də böyük potensial var.

## **Tədqiqatın məqsədi və vəzifələri.**

Tədqiqatın məqsədi, işıq diodunun parametrlərini və iş rejimini optimallaşdırmaqla fotonların çıxarılmasını artırmaq və işıq diodları qablaşdırmasının içərisində udma və əks olunma kimi təsirləri minimuma endirməklə ağ işıq diodlarının şüalanma səmərəliliyini artırmaqdır.

Göstərilən məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- İşıq diod paketinin bütün komponentlərinin çevirmə əmsali nəzərə alınmaqla elektrik enerjisinin çıxış optik gücə çevrilməsinin maksimum səmərəliliyinin nəzəri hesablanması.
- Fosforlardan istifadə edərək “lövhə üzərində çip” texnologiyasına əsasən mavi işıq yayan InGaN çipləri əsasında diodların yaradılması.
- İşıq diodlarının rəng temperaturu, rəng ötürmə indeksi, effektivlik və işıq verimi kimi parametrlərinin öyrənilməsi.
- Müxtəlif parametrlərdən və iş rejimindən asılı olaraq işıq diodlarının optik xüsusiyyətlərindəki dəyişikliklərin təcrübi qanunauyğunluqlarının araşdırılması.
- Müxtəlif fosforlardan istifadə edərək işıq diodlarının rəng parametrlərinin keyfiyyətinin artırılması.
- Şüalanmanın əks olunan, udulmuş və ötürülən enerji axınıni ölçməklə işıq diodlarının istehsalında istifadə olunan fosforların kvant səmərəliliyinin hesablanması.
- İşıq diodlarının səmərəliliyini artıran istehsal və qablaşdırma üsullarının hazırlanması.
- İşıq diodlarının üçölçülü kompüter modellərinin hazırlanması ilə optik dizayn proqramlarından istifadə edərək, daha sonra bu modellər əsasında optik parametrlərin simulyasiyası.

**Tədqiqat metodlarına** aşağıdakılar daxildir: fotometrik xüsusiyyətlərin ölçülməsi, ağ və mavi işıq diodlarının emissiya spektrlərinin təhlili; lüminessensiya spektrlərinin ölçülməsi, fosforlarda fotonların əks olunmasının, udulmasının və ötürülməsinin ölçülməsi; işıq diodlarının elektrik parametrlərinin

öyrənilməsi; şüa izləmə üsulundan istifadə edərək işıq diodlarının simulyasiya tədqiqatı.

### **Tədqiqat obyektləri.**

Dissertasiyada tədqiqat obyekti InGaN çiplərindən, onlar üçün əsas olan altlıqlardan və fosforlardan ibarət işıq yayan diodlardır. Komponentlər arasında əks olunan, udulan və enerjini ötürən fotonların qarşılıqlı təsirləri olduğundan altlıq, çip, fosfor, reflektə, linza kompleks sistemlərində baş verən proseslər araşdırılır.

### **Tədqiqatın elmi yeniliyi.**

İşin elmi yeniliyi işıq diodlarının xüsusiyyətlərini, optik parametrlərini hərtərəfli araşdırmaqdan və onların səmərəliliyini artırmaq üçün üsulların hazırlanmasından ibarətdir. Bu məqsədlə məhz aşağıdakı işlər ilk dəfə həyata keçirilmişdir:

- Təkmilləşdirilmiş piramida şəklində olan işıq diodu üçün fosfor təbəqəsi hazırlanmış, burada fotonların reabsorbsiyası səbəbindən ekstraksiya səmərəliliyində artım müşahidə edilmişdir.
- İstehsal olunan fiziki işıq diodlarına uyğun olaraq üçölçülü bir kompüter modeli hazırlanmış, bunun əsasında şüa izləmə metodundan istifadə edilərək simulyasiya prosesi həyata keçirilmiş, proqram üsulu ilə diodun işıq selinin dəyəri, şüaların yayılması və intensivliyi hesablanmış, həmçinin onlar təcrübədən alınan məlumatlar ilə müqayisə edilmişdir.
- Fotonların çıxarılmasının artmasına və buna uyğun olaraq işıq diodundan yüksək foton çıxışına gətirib çıxaran işıq diodlarının kapsul qablaşdırma üsulu kəşf edilmişdir. Bu üsul fosforun üstündə yerləşən sferik şəffaf polimer içərisində çoxsaylı daxili əks olunmalara səbəb olur.
- Çipin emitter hissəsinə 30 mikron qalınlığında bir fosfor təbəqəsinin mərkəzdənqaçma yolu ilə çəkildiyi, işıq diodunun səmərəliliyinin artmasını təmin edən və işığın bucaq xüsusiyyətlərini yaxşılaşdıran "çip üzərində fosfor" üsulu hazırlanmışdır.
- İşıq diodun optik gücünün çevrilmə səmərəliliyinin çipin emitter sahəsindən asılılığı, həmçinin çip sahəsinin "çip üzərində

fosfor" üsulu ilə çəkilən fosforun enerji axınının çevrilməsinə təsiri araşdırılmışdır.

- Şəffaf polimer inkapsulyasiyanın sferik formasının işıq diodunun ekstraksiya səmərəliliyini artırdığı sübut edilmişdir.
- Çeviricinin çıxışında sabit gücü saxlamaq üçün dövrədəki geri əlaqəli analoq gərginlik çarpanını istifadə edərək işıq diodunun elektrik qidalanması üçün sxem hazırlanmış və tətbiq edilmişdir.

#### **Müdafiə üçün əsas müddəalar:**

1. Səmərəlilik baxımından işıq diodları üçün fosfor hissəciklərinin ideal konsentrasiyası  $2 \times 10^7 \text{ sm}^3$ , qalınlığı 50 mkm-dir.
2. YAG:Ce -ə əsaslanan ağ işıq diodlarının cərəyanını dəyişdirməsi fosforun geniş rəngli xromatik koordinatlarına təsir etmir.
3. Sferik bir inkapsulyasiya forması istifadə edildikdə, işıq diodunun ekstraksiya səmərəliliyi düz formaya nisbətən 94.5%-dən 98%-ə qədər artır, burada daha böyük bir inkapsulyasiya radiusu, həmçinin materialın sındırma indeksi daha yüksək ekstraksiya səmərəliliyinə səbəb olur.
4. Dalğa uzunluğu 440 nm olan bir InGaN çipi ən çox YAG:Ce fosforunun həyəcanlanma spektrinə uyğundur.
5. “Çip üzərində fosfor” işıq diod qablaşdırma texnologiyası daha intensiv şüalanma udulmasını təşviq edir ki, bu da səmərəliliyi 6% artırır və eyni zamanda rəng temperaturunun bucaq paylanmasını yaxşılaşdırır.
6. Işıq diodunun optik gücünün çevrilməsinin səmərəliliyi həm fosfor olmadan, həm də fosfor olan çipin emitter sahəsinin azalması ilə artır.
7.  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  və  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  fosforlarının 80:20% nisbətində çevirici olaraq istifadəsi yayılan işıq selini 8,3%-dək artırır, işıq diodunun əlaqəli rəng temperaturunu və rəng ötürmə indeksini yaxşılaşdırır.
8. YAG:Ce fosforunun optik xüsusiyyətlərinin inteqrasiya olunmuş ölçüsü göstərir ki, ilkin şüalanmanın 55%-i ötürülür,

34%-i fosfor hissəcikləri ilə əks olunur, 11%-i isə udulma zamanı itir.

9. Işıq diodlarının fosfor tərkibli şəffaf örtücü sferik təbəqə altında yerləşdiyi qablaşdırılma üsulu çıxan şüalanma fotonlarının emissiya bucağının artması səbəbindən işıq diodunun enerji axınının 13% artmasını təmin edir.
10. Piramida şəkilli fosfor çeviricisi və fosfordan əks olunan fotonların yenidən udulmasını təmin edərək işıq çıxışını 14% artırır.
11. Analoq çarpana əsaslanan elektrik çeviriciləri işıq diodunun temperaturu 1°C dəyişdikdə, yalnız 0.008 mW güc dəyişikliyi ilə çıxış gücünü sabitləşdirə bilir.

**Tədqiqatın praktiki əhəmiyyəti.** Cari işin praktiki əhəmiyyəti ağ işıq diodlarının optik parametrlərinin öyrənilməsi prosesində əldə edilən nəticələr və çıxış xüsusiyyətlərini yaxşılaşdırmaq məqsədi ilə işıq diodlarının konstruktiv parametrlərinin effektivliyinin bəzi vacib xüsusiyyətlərinin optimallaşdırılması üçün tətbiq edilməsidir. InGaN əsaslı işıq yayan çiplər və YAG:Ce fosforuna əsaslanan ağ işıq diodlarının istehsalı prosesində aparılan araşdırmalar geniş şüalanma spektrinə və yüksək rəng göstərmə indeksinə malik ağ işıq əldə etməyə imkan verir. Sferik bir kapsul fosforlu işıq diodu və piramidaşəkilli lüminesent çevirici kimi qablaşdırma üsulları işıq diodlarının səmərəliliyini 10-20% artırmağa imkan verir. Işıqlandırma və sınaq prosesində aparılan tədqiqatlar üçün istehsal olunan ağ işıq diodlarının istifadəsindən əldə edilən təcrübələr, məsələn, korpusdakı temperaturun tənzimlənməsi və modulların uzunmüddətli işləməsi işıq diodlarının konstruksiyasını ölkədə istehlak bazarına çıxarmaq üçün optimallaşdırmağa imkan verir. Həmçinin, işıq diodlarının qidalanması üçün elektrik gərginliyi çeviriciləri təkmilləşdirilmiş, onların işləmə rejimini qorumaq və işləmə müddətini uzatmaq üçün əlavə elektrik elementləri ilə təchiz edilmişdir.

### **İşin aprobasiyası.**

Dissertasiyada təqdim olunmuş tədqiqatların nəticələri "Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94 -cü ildönümünə həsr olunmuş 1-ci Beynəlxalq Gənc Tədqiqatçılar

Konfransı" (Bakı Mühəndislik Universiteti, 2017); "Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin 100 illiyinə həsr olunmuş Tətbiqi Fizika və Enerjinin Aktual Məsələləri Beynəlxalq Elmi Konfransı " (Sumqayıt Dövlət Universiteti, 2018); "Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının 75 illiyinə həsr edilmiş Fundamental və tətbiqi elmlərin müasir problemlərinin həllində multidissiplinar yanaşma, Gənc Alim və Mütəxəssislərin 2-ci Beynəlxalq Elmi Konfransı" (Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, 2020); " Tətbiqi Fizika və Enerjinin Aktual Məsələləri, II Beynəlxalq Elmi Konfrans" (Sumqayıt Dövlət Universiteti, Kazan Dövlət Energetika Universiteti, 2020); «2nd International Conference on Light and Light-Based Technologies» (Qazi Universiteti, 2021) kimi beynəlxalq elmi konfranslarda məruzə edilmişdir.

Dissertasiya mövzusunda 11 elmi məqalə nəşr olunmuşdur (5 beynəlxalq konfransda məruzə tezisləri; 0,5 impakt faktorlu xarici jurnallarda 2 məqalə; 4 respublika jurnalında məqalə).

**Dissertasiyanın aparıldığı təşkilatın adı:** Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutu, Bakı, Azərbaycan.

**Dissertasiyanın quruluşu və əhatə dairəsi.** Dissertasiya giriş, 4 fəsil, əsas nəticələr və istifadə olunan 101 ədəbiyyat mənbələrinin siyahısından ibarətdir. İşin ümumi həcmi 45 şəkil və 8 cədvəl daxil olmaqla 150 səhifədən ibarətdir.

## İŞİN MƏZMUNU

**Girişdə** mövzunun aktuallığı, işin məqsədi və qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün görülən işlər, tədqiqat obyektləri, elmi yeniliyi, müdafiə üçün təqdim olunan müddəaları, praktiki əhəmiyyəti, aprobasiyası, dissertasiyanın quruluşu əsaslandırılır. Işıq diodları haqqında işlərin vəziyyətini və onların yaranma tarixini təqdim edən ümumi məlumatlar verilir.

**“Işıq diodlarında fiziki proseslər və istehsal texnologiyasının icmalı” adlı birinci fəsil**də yarımkeçirici diodlarda baş verən fiziki proseslər, işıq diodlarının istehsal texnologiyası qısaca təsvir edilmişdir. Işıq seli, şüalanma intensivliyi, rəng temperaturu, şüalanma paylanması, şüalanma spektri, rəng ötürmə indeksi, elektrik xüsusiyyətləri (cərəyan şiddəti, gərginlik) kimi işıq



diodlarının parametrləri, həmçinin işıq diodlarından istifadə edilərək ağ işığın əldə olunma üsulları təsvir edilmişdir. Bunlardan ən çox yayılanı mavi işıq diodu və  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  kimi genişzolaqlı emissiya spektrli fosforun istifadəsidir .

İşıq diod çipinin daxili kvant səmərəliliyi, fosforun kvant səmərəliliyi, ekstraksiya səmərəliliyi, həmçinin işıq diodlarının səmərəliliyini məhdudlaşdıran komponentlərində yaranan itkilər də daxil olmaqla işıq diodlarının effektivliyi nəzərə alınır.

Alınan təcrübi nəticələrlə müqayisə etmək və işıq səmərəliliyinin nisbi dəyərinə malik olmaq üçün fotometrik nəzəriyyəyə əsasən fosfor tərəfindən çevrilən ağ işıq diodları maksimum işıq səmərəliliyinə malik hesab olunur. Tənliyə əsasən, maksimum nəzəri işıq səmərəliliyinin  $\alpha$ -nın 0,6-dan 0,9-a qədər artması ilə xətti olaraq 215-dən 300 lm/Vt-a qədər artdığı göstərilmişdir:

$$\eta_{lm} = 683 \left[ \frac{lm}{Vt} \right] \times \eta_d \frac{(1-\alpha) \int V(\lambda) [P_m(\lambda) + P_s(\lambda)] d\lambda}{\int P_m(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Burada  $\alpha$ -fosforun udduğu gücün çipin yaydığı gücə nisbətidir;  $V(\lambda)$  - göz həssaslığının funksiyası;  $V(\lambda) - 555$  nm-də 1-ə normallaşdırılmış ölçüsüz bir kəmiyyət;  $P_m(\lambda)$  və  $P_s(\lambda)$  – ağ işıq diodunun spektrini ölçməklə əldə edilə bilən mavi və sarı işığın spektral güc sıxlığıdır.

Buradan belə çıxır ki, fosforun yaydığı sarı işıq mavi işığa nisbətən göz həssaslığı funksiyası ilə daha yaxşı üst-üstə düşdüyündən, mavi işıqla müqayisədə sarı işığın spektral intensivliyinin artması ağ işıq diodun işıq səmərəliyini artıran bir amildir. Buna görə çipin mavi şüalanmasının fosfor tərəfindən udulmasının artması ilə işıq səmərəliliyində artım gözləmək mümkündür.

**“Ağ işıq diodlarının optik xüsusiyyətlərinin istehsalı və tədqiqi” adlı ikinci fəsil**də, təcrübələrdə istifadə olunan işıq diodlarının yığılma texnologiyası nəzərdən keçirilir. Dissertasiyadakı təcrübələri aparmaq üçün çiplərin altlıq üzərində quraşdırılması prosesi FK Delvotec firmasının A1 qurğusunda həyata keçirilmişdir. Çiplərə elektrik kontaktlarını quraşdırmaq üçün FK Delvotec firmasının G5 modelli ultrasəs qaynaq avadanlığı istifadə edilmişdir.

İşıq diodlarını fosfor təbəqəsi ilə örtmək üçün çipləri olan altlığın üzərinə dozalı fosfor tökən dispenserlərdən istifadə edilmişdir. Eksperimental nümunələrin istehsalı üçün Fisnar model F4200 N-dən proqramlaşdırıla bilən dispenserlərdən istifadə edilmişdir.

İşıq diodlarının parametrlərini ölçmək üçün üsullar təqdim olunmuş, həmçinin onların həyəcanlanma və emissiya spektrləri öyrənilmişdir. Horiba Yvon Joben 1250M monoxromatoru və Andor Newton<sup>TM</sup> detektoru olan spektrometrdən istifadə edilərək ölçmələr aparılmışdır. Monoxromator quraşdırılmış difraksiya qəfəsi, iş diapazonu 200 ilə 1000 nm arasında olan 1800 difraksiya yarıqlarından ibarətdir. Detektor olaraq 1024×255 piksel qabliyyətində, ölçüsü 26×26 mikron CCD detektoru olan Andor Newton cihazından istifadə edilmişdir. İşıq diodlarının optik və elektrik parametrlərini ölçmək üçün Everfine firmasının diametri 150 sm və 30 sm olan integral kürələrindən istifadə edilmişdir.

İşıq diodlarının inkapsulyasiyasının onların effektivliyinə təsir dərəcəsini müəyyən etmək üçün iki növ inkapsulyasiya araşdırılmışdır: düz və sferik. Mavi işıq yayan dioddan çıxan işıq axını forma və ölçüsündən asılı olaraq hesablanmışdır. Ekstraksiya səmərəliliyi ilkin işıq axını və kapsulyasiyadan sonra çıxışdakı işıq axını ölçülməklə hesablanmışdır. Bu araşdırma radiusun təsirini və ekstraksiyanın inkapsulyasiya səmərəliliyinin sındırma indeksini öyrənməyə imkan verən şüa izləmə simulyasiya metodundan istifadə edilərək tamamlanmışdır. Nəticələr göstərir ki, sferik inkapsulyasiyanın səmərəliliyi eksperimental məlumatlarda 94.5%-dən 98%-ə və simulyasiya məlumatlarında 96%-dən 98%-ə qədər artaraq, düz inkapsulyasiya ilə müqayisədə müəyyən bir üstünlüyə malik olmuşdur. İnkapsulyasiya radiusunun artması və örtmə materialının sındırma indeksinin çıxarılması da səmərəliliyinin artmasına səbəb olur. İnkapsulyasiya linzasının radiusu çipin ölçülərinə mütənasib olanda ekstraksiya səmərəliliyinin əhəmiyyətli dərəcədə azaldığı görünür.

Daha sonra fosforun xüsusiyyətləri 30 sm diametrlı integral kürədən istifadə edilərək araşdırılmışdır. Bu məqsədlə nümunə kürənin divarına, tərəflərindən biri isə kənarda yerləşdirilir. Əks olunan və geri buraxılan fosfor fotonlarını qeyd etmək üçün nümunə

içerisində spektrofotokalorimetr olan kürə mənbə tərəfindən həyəcanlandırılır. Ötürülən və çevrilən fotonları qeyd etmək üçün isə nümunə kürənin xaricindən həyəcanlandırılır, buna görə mənbə inteqral kürənin xaricində yerləşdirilir.

YAG:Ce əsaslı fosforlarda əks olunan və ötürülən şüalanma miqdarının mütləq dəyərlərini müəyyən etmək üçün əvvəlcə mavi şüalanmanın gücü kürədə ölçülmüşdür. Spektrofotokalorimetr ölçülmüş gücün müəyyən bir dalğa uzunluğuna nə qədər uyğun olduğunu göstərən spektral axın paylamasını ( $W/nm$ ) ölçür və bu, həm çipin, həm də fosforun emissiyalarına uyğun olan fərdi dalğa uzunluqlarının optik güclərini birbaşa hesablamağa imkan verir. Fosfor nümunəsi kimi dalğa uzunluğu 550 nm olan  $0,5 \text{ g/sm}^3$  konsentrasiyasında bir polimer ilə qarışdırılmış YAG:Ce-dən istifadə edilmişdir. Eyni zamanda həmin fosfordan polimersiz də istifadə edilmişdir. Silikondakı fosfor konsentrasiyası 10% bərabərdir, çünki 10% nümunədəki fosfor hissəciklərinin sıxlığı ( $\sim 9 \times 10^4$  hissəcik/mm<sup>3</sup>) işıq diodlarında çox istifadə olunan fosfor təbəqələrinin sıxlığı ilə eyni ölçüdədir. Polimerli və polimersiz fosforlarda nümunə boyu həcmdə konsentrasiyanı sabit saxlamaq üçün fosforun çəkisini hesablamaq vacibdir.

Bütün lazımi dəyərləri təcrübə yolu ilə əldə etdikdən sonra fosforun kvant səmərəliliyi aşağıdakı düstura əsasən hesablanır:

$$\eta_l = \frac{N_{\text{şüa}}}{N_c} = \frac{N_{\text{şüa}}}{N_c^{\text{ümumi}} - (N_c^{\text{əks}} + N_c^{\text{tr}})}, \quad (2)$$

Burada  $N_{\text{şüa}}$ - fosfor tərəfindən yayılan fotonların sayı,  $N_c$ - çipin yaydığı fotonların sayı,  $N_c^{\text{əks}} + N_c^{\text{tr}}$ - əksinə mavi fotonların əks olunduğu və ötürüldüyü sayı.

Ölçmə nəticələri sərbəst fosfor halında hissəciklər tərəfindən əks olunduqda ilkin işıq enerjisinin 34%-nin itirildiyini göstərir. Mavi fotonların fosfor tərəfindən şüalanmadan udulması zamanı optik gücün digər 11%-i itir. Bu itkilər Stokesin dəyişməsi və fosforun kvant səmərəliliyindən ötrüdür. Çip və fosfor tərəfindən yayılan mavi və sarı fotonlar, çıxışdakı ilkin şüalanma gücünün yalnız 55% -ni təşkil edir. Nəticədə, ölçülmüş səmərəlilik sərbəst fosfor üçün 89% və inkapsullaşdırılmış fosfor üçün 87% olmuşdur.

Ənənəvi işıq diodları qablaşdırma üsullarının fosfor qatından fotonun səmərəli çıxarılması üçün ideal olmaması qənaətinə gəlinmişdir. Fosforun kvant səmərəliliyi 100% olsa belə, fosforun həyəcanlanma zamanı yaydığı fotonların hamısı işıq diodunun optik sistemindən çıxarılmır.

İkinci fəsildə həmçinin fosforun konsentrasiya və qalınlığının işıq diod spektrinin çevrilməsinə təsiri öyrənilir. Fosfor hissəciklərinin konsentrasiyası  $1 \text{ sm}^3$  üçün  $1,0 \times 10^7$  ilə  $8,0 \times 10^7$  hissəcik arasında dəyişir ki, bu da fosforun orta hissəcik ölçüsü və sıxlığının dəyərlərinə əsasən hesablanır. Fosfor təbəqəsinin qalınlığı da 50 ilə 500 mikron arasında dəyişir. Işıq diodlarının qablaşdırmasının şüalanmanın bütövlükdə fosforun konsentrasiyasından, yerləşməsindən və paylanmasından asılı olduğu araşdırılmışdır. Aparılan təcrübələrdən 0,5 mm qalınlığa malik təbəqə tərəfindən çevrilmiş sarı işıq ilə orijinal mavi işıq arasındakı optimal tarazlığın (rəng temperaturu 6500K nöqtəsinə ən yaxın)  $\sim 2,0 \text{ E7 sm}^{-3}$  konsentrasiyalı nümunələrə malik olduğu qənaətinə gəlinmişdir. Daha çox konsentrasiyalı nümunələr mavi işıq ötürülməsinə maneə törədir, daha az konsentrasiyalı nümunələr isə daha az çevrilmiş şüalanma verir. Fosfor konsentrasiyasının müəyyən bir səviyyəyə yüksəlməsi ilə çevrilən işığın sarı komponentinin miqdarı artır ki, bu da CIE 1931 xromatiklik koordinatlarının ağ işıq nöqtəsinə doğru (0,33, 0,33) yerdəyişməsinə gətirib çıxarır. Xüsusilə fosfor konsentrasiyasının hər  $\text{sm}^{-3}$  üçün  $1,0 \text{ E7}$ -dən  $2,5 \text{ E7}$ -ə dəyişməsi X-Y xromatiklik koordinatlarını (0,28; 0,34)-dən (0,32; 0,38)-ə dəyişir. Optimallaşdırılmış fosfor konsentrasiyası və qalınlığının hər  $\text{sm}^{-3}$  üçün  $2,5 \text{ E7}$  və  $50 \mu\text{m}$  olduğu qənaətinə gəlinmişdir.

Şüalanma intensivliyinin həyəcanlanma cərəyanının 10 - 70 A/ $\text{sm}^2$  aralığında dəyişdiyini inteqrasiya sahəsində işıq diodundan axan cərəyan sıxlığından asılılığı da araşdırılmışdır. Həyacandırılan cərəyanın artması ilə şüalanma intensivliyinin artdığı görünür. Lakin, axan cərəyan dəyişdikdə ağ işığın xromatiklik koordinatları dəyişmir və yayılan ağ işığın işıq seli  $2,5 \text{ E7 sm}^{-3}$  fosfor konsentrasiyasında  $50 \mu\text{m}$  qalınlıqda və  $30 \text{ A/sm}^2$  cərəyan sıxlığında həyəcanlandırılan mavi işıq selindən üç dəfə çox olur.

Qırmızı oblastda əhəmiyyətli bir intensivliyə malik olan  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  fosforu əlavə etməklə, əlaqəli rəng temperaturu, rəng göstərmə indeksi və işıq diodunun işıq seli kimi şüalanma göstəricilərinin yaxşılaşdırılması potensialı öyrənilmişdir. Bu təcrübə üçün  $1 \times 1$  mm ölçüdə, 450 nm dominant dalğa uzunluğuna və 1 Vt gücə malik Fullsun tərəfindən hazırlanan mavi GaN çiplərindən istifadə edilmişdir. Fosfor olaraq dalğa uzunluqları  $\sim 550$  nm və  $\sim 580$  nm, tam eni yarı amplitud səviyyəsində 91 nm və 100 nm olan  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  və  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  istifadə edilmişdir. Işıq diodları aşağıdakı qaydada hazırlanmışdır: 1) keçirici yapışqan ilə altlıq üzərinə çiplər qoyulmuşdur; 2) sobada  $150^\circ C$ -ə qədər qızdırılmışdır; 3) 1 qram fosforla 10 qram silikon nisbətində şəffaf silikon və fosfor qarışığı istehsal edilmişdir; 4)  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  və  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  fosforları iki konsentrasiyada - 10% və 20% qarışdırılmış (toz və kapsulun ümumi miqdarı dəyişməz olaraq qalmışdır) və nümunələrdən biri müqayisə üçün  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  əlavə edilmədən saxlanılmışdır; 5) fosfor kompozitləri paylanmış və tamamilə bərkidilmişdir.

Nəticədə işıq seli qırmızı-narıncı  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  konsentrasiyasının 20%-ə qədər artması ilə ən yüksək dəyəri göstərmişdir. Emissiya spektrinə qırmızı komponent əlavə edildiyinə görə rəng temperaturu  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  konsentrasiyası artdıqca azalır. Rəng ötürmə indeksi  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  konsentrasiyası 10%-ə bərabər olanda maksimal qiymət alır və bu nisbət ağ işıq əldə etmək üçün optimal hesab olunur, çünki  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  faizinin daha da artması ilə şüalanmanın nəticəsində yaranan koordinatlar güclü şəkildə qırmızı oblasta sürüşəcək. Saf  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  fosfor üçün dalğa uzunluğunun pik dəyəri 530 nm, yarım amplitudanın tam eni 91 nm-dir. 10%  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  əlavə edildikdə isə pik dəyəri 562 nm-ə sürüşür və yarım amplitudanın tam eni 100 nm olur; 20%  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  əlavə edildikdə isə bu dəyərlər müvafiq olaraq 570 nm və 83 nm olur .

Təcrübəmizdə qırmızı rəngli fosforun əlavə edilməsi fosfor çevrici işıq diodunun rəng xüsusiyyətlərini yaxşılaşdıraraq koordinatları saf ağ işığa yaxınlaşdırır. Fərqli kimyəvi tərkibli bir neçə fosforun istifadəsinin ağ işığın əldə edilməsinə imkan verən

müxtəlif dalğa uzunluğunda iki və üç çipli işıq diodlarına yaxşı bir alternativ olduğu qənaətinə gəlinir.

Həyəcanlandırılan çipin dalğa uzunluğunun fosforun çevrilmə səmərəliliyinə təsiri də öyrənilmişdir. Həyəcanverici çipin dalğa uzunluğunun ümumi intensivliyə necə təsir etdiyini yoxlamaq üçün fərqli dalğa uzunluqlarına (440, 450 və 456 nm) malik üç fərqli çipdən istifadə edərək bir təcrübə həyata keçirilmişdir. Bütün çiplər  $1 \text{ mm}^2$  şüalanan emitter sahəsi ilə eyni ölçüdə olmuşdur. Hər üç çip  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  fosfor tərkibi ilə eyni diod paketinin həyəcanlandırılması üçün istifadə edilmiş, yayılan axına təsirini istisna etmək üçün çöküntü qatındakı fosforun miqdarı eyni saxlanılmışdır. Yalnız çipin dalğa uzunluğunun təsirini təyin etmək üçün çiplərdən keçən cərəyan mavi çiplərin enerji axını  $\Phi_e$  üç işıq diodu üçün bərabər olacaq şəkildə qurulmuşdur.

Təcrübənin nəticələri üç əsas göstərici əsasında qiymətləndirilmişdir: işıq diodunun çevirmə səmərəliliyi  $\eta_c$ , fosforun kvant səmərəliliyi və işıq seli  $\Phi_v$ . Həyəcanverici çipin dalğa uzunluğunun 456 nm -dən 440 nm-ə düşməsi ilə fosforun çevrilmə səmərəliliyinin daha da artdığı məlum olmuşdur. Fosfor səmərəliliyi dalğa uzunluğu 440 nm-lik çiplə olan işıq diodu üçün  $\eta_f - 88.1\%$ , 450 nm olan işıq diodu üçün  $- 71.3\%$  və 456 nm olan işıq diodu üçün  $65.4\%$  alınmışdır. Işıq selinin çipin dalğa uzunluğunun azalması ilə artmağa meyilli olduğu göstərilmişdir. Hər üç halda başlanğıc işıq diodunda mavi çip tərəfindən yayılan işıq seli 5,4 lm olub, lakin fosfor çevrilməsindən sonra 50 lm -ə yüksəlmişdir, 440 və 456 nm çipli işıq diodları arasındakı işıq selinin fərqi 14,4 lm alınmışdır.

Təcrübə zamanı həyəcanlandıran çipin dalğa uzunluğunun 10 nm qısa və ya uzun dalğalı oblasta keçməsinin çevrilmə səmərəliliyinə təsir etdiyi müəyyən edilmiş və geniş istifadə olunan  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  fosforunun həyəcanlanma spektrinin ən çox 440 nm dalğa uzunluğuna uyğunluğu təsdiq edilmişdir.

**“Işıq diodlarının səmərəliliyini artırmaq üçün üsulların hazırlanması” adlı üçüncü fəsildə 1:1 çəki nisbətində və  $5 \text{ q/sm}^3$  konsentrasiyada çipin emitter sahəsinə konsentrə olaraq tətbiq olunduğu və yalnız çipin səthində yerləşən fosforun çəkilməsi metodunun hazırlandığı bildirilir. Fosforu tətbiq etmək üçün**

təbəqəni çox nazik və hamar formaya gətirən mərkəzdənqaçma üsulu istifadə edilmişdir. Fosfor tozu 1:1 çəki nisbətində yaxşı dispersiyaya çatana qədər polimer kapsullayıcı ilə qarışdırılır və konsentrasiyası  $5\text{q}/\text{sm}^3$  təşkil edir. Polimerin özlülüyü və xüsusi çəkisi müvafiq olaraq  $3,8\text{ Pa}\cdot\text{s}$  və  $1,23\text{ q}/\text{sm}^3$  olmuşdur. Bu konsentrasiya yüksək hesab olunur, bu da fosfor təbəqəsinin konsentrasiyasını qalınlıq vahidinə sabit saxlayarkən 8-10 qat daha nazik təbəqələr əldə etməyə imkan verir. Işıq diodunun effektivliyini təhlil etmək üçün rəng temperaturu, rəng ötürmə indeksi və çipdəki fosforla olan işıq diodunun enerji axını,  $350\text{ mA}$  cərəyanda inteqral sferada ölçülmüşdür. Rəng temperaturunun və işıq selinin paylanması ölçmək üçün lüksmetrdən istifadə edilmişdir. Lüksmetr ilə işıq diodu arasındakı məsafə  $2\text{ m}$  olmuşdur. Işıq diodu və detektor arasındakı bucağı  $-90^\circ$ -dən  $+90^\circ$ -ə qədər dəyişdirildikdə işıq diodunun rəng temperaturu hər  $5^\circ$ -də qeyd edilmişdir.

Detektora nisbətən işıq diodunun sabit bir istiqamət bucağı ilə fosfor tətbiq olunmuş işıq diodundan olan işıqlandırma nümunəsi işıqlanan sahədəki rəng temperaturuna daha uyğundur. "Çip üzərində fosfor" üsulu çipin emitter səthində daha yüksək fosfor hissəciklərinin konsentrasiyasını təmin edir ki, bu da mavi fotonların çipdən uzaq oblasta səpilməsinin qarşısını alır və "sarı halqa" effektini aradan qaldırır. Işıq selinin mərkəz şüalanmasının yarısı olan yarı parlaqlıq bucağı, adi işıq diodu ilə fosfor tətbiq olunmuş işıq diodu üçün  $60^\circ$  ilə müqayisədə  $50^\circ$ -dir. Bu fosfor örtmə üsulunun enerji axını təxminən  $0,206\text{ W}$ , adi fosfor örtüyü isə  $0,191\text{ W}$  təşkil edir. Rəng temperaturunun bucağın  $90^\circ$  dəyişməsi ilə azalması, fosfor tətbiq olunmuş halda  $1700\text{K}$  rəng temperaturunun azalması ilə müqayisədə  $450\text{ K}$ -dir.

Fosforlu çipin sahəsinin bütün işıq diod paketinin səmərəliliyinə təsiri də araşdırılmışdır. Çipin şüalanma səmərəliliyini artırmaq üçün onun ölçüsünü azaltmağın praktiki əhəmiyyətini araşdırmaqdan ötrü fərqli ölçülərə malik iki çipdən istifadə edilib:  $1\times 1\text{ mm}$  və  $1\times 0,45\text{ mm}$ . Hər iki çip şüalanma dalğa uzunluğu  $\lambda=450\text{ nm}$  olan InGaN heterostrukturuna əsaslanır. Bu çiplər sarı YAG:Ce fosforu ilə örtülmüşdür. Beləliklə, emitter sahəsinin ölçüsünün yarımkeçiricidən mavi fotonların çıxarılmasının

səmərəliliyinə deyil, eyni zamanda çipdən və fosfordan tək bir şüalanma sistemi olaraq fotonların çıxarılmasına da təsir etdiyi təsbit edilmişdir. Işıq diod çiplərinin sahəsi azaldıqca eyni istehlak olunan cərəyanla daha yüksək şüalanma gücü istehsal etdiyi məlum olmuşdur. Göstərilmişdir ki, fosfor olmayan hər iki ölçülü mavi çip, fosfor çəkilmiş ilə müqayisədə daha yüksək enerji axını verəcəkdir. Nəticədə, 100 mA-də kiçik çip böyük çipdən 2% daha yüksək çevrilmə səmərəliliyi göstərmiş oldu. Fosfor təbiiq olunmuş çiplər də güc çevrilişində 2% artım göstərmişdir.

İnkişaf etmiş digər işıq diodu istehsal üsulu - fosforun silikon örtücü materialın xarici təbəqəsi altında yerləşdiyi bir kapsul qablaşdırma üsulu da nəzərdən keçirilmişdir. Kapsul çipdə yerləşir və qabarıq-toplayıcı linza funksiyasını yerinə yetirən yarımkürə formasına malikdir. Kapsulun qalınlığı ~ 200 mikron, xarici diametri 3 mm-dir. İstehsal prosesində fosfor, silikonun yapışqan xüsusiyyətlərindən istifadə edərək, silikon təbəqənin daxili hissəsinə püskürdülür. Nəticədə fosfor təbəqəsi bir neçə fosfor hissəciklərinin diametri qalınlığında əldə edilir. Ənənəvi üsulla müqayisədə bu üsulda işıq çıxışında artım müşahidə olunur. Bu üsul fotonların fosfor hissəcikləri ilə toqquşmaması halında şəffaf bir polimerin əhatə təbəqəsində fotonun daxili əks olunmasını təşviq edir, bu da onların işıq diod paketinin üzərindən daha yaxşı çıxarılmasına kömək edir. Ənənəvi üsulla müqayisədə bu metodda işıq diodundan keçən cərəyan artdıqca optik güc fərqi də artaraq 13%-ə çatdığı qeydə alınır ki, nəticədə optik gücdə artım müşahidə edilir.

Işıq diodunda fotonların optik yayılmasının həndəsi quruluşunu verən içi boş piramida strukturu və işıq şüalarının optik sistemdən maksimum çıxarılması yolunu təyin edən inkişaf etmiş piramidaşəkilli fosforlar haqqında məlumat verilir. Piramidaşəkilli fosfor təbəqəsinin istehsalı üçün YAG:Ce-dan istifadə edilmişdir. Piramidalar yaratmaq üçün şablon olaraq piramidaya bənzər quruluşlara iki silikon lövhə quraşdırılmış və sonra yaranmış kompoziti sərt hala gətirmək üçün epoksi əlavə olunmuşdur. YAG: Ce 1:10 nisbətində (fosfor konsentrasiyası optimal hesab olunur - 0.5 g/sm<sup>3</sup>) inkapsullaşdırıcı polimer silikon ilə qarışdırılmış, bu qəlibləri dolduraraq nazik bir fosfor təbəqəsi yaratmaq üçün sıxılmışdır.

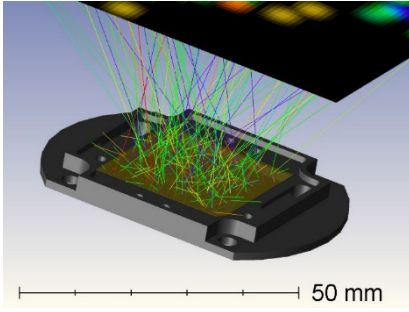


Hündürlüyü və eni 4 mm olan çevirici təbəqəsi 25 piramidadan (5 sütundan və 5 sıradan) ibarət olmuşdur. İstehsal olunan fosfor örtüklərinin fotoluminessensiyasını ölçmək üçün 100 ardıcıl və 100 paralel çipdən ibarət işıq diodları yığılmışdır.

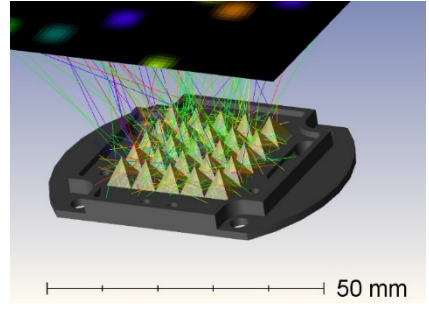
İşıq selinin və işıq səmərəliliyinin cərəyandan asılılığı, işıq diodundan axan düz cərəyanın 100-3000 mA aralığında olan piramidaşəkilli fosfor üçün 93-dən 107 lm/W-a, yastı tipli çevirici üçün isə 65-dən 68 lm/W-a qədər artım olduğunu göstərir. Düz tipli fosfor çeviriciyə nisbətən 100 mA-də 8%, 3000 mA-də isə 14% artım müşahidə edilmişdir. İşıq selindəki artım aşağı cərəyanlarda 8%-ə yaxınlaşır, cərəyanının yüksək həddinə çatdırılmış hallarda 10%-ə yaxın dəyərlərinə çatır. Rəng temperaturu piramidaşəkilli fosfor olan işıq diodu üçün 4324 K, adi işıq diodu üçün isə 4644 K olmuşdur.

Zemax-dan OpticStudio proqramından istifadə edilərək işıq diod qablaşdırmasının piramida quruluşundakı şüaların paylanmasını öyrənmək üçün bir şüa izləmə metodu tətbiq edilmişdir. Bunun üçün istifadə olunan “lövhə üzərində çip” fiziki altlıqla eyni həndəsi formaya malik bir altlıq modelləşdirilmişdir. Araşdırma nəticələri düz tip fosfordan əks olunan mavi fotonların əks istiqamətdə yayıldığını və piramidaşəkilli fosforda bu şüaların piramidanın içərisində fərqli istiqamətlərə, eyni zamanda çıxış istiqamətinə yönəldiyini təsdiqləmiş oldu. Həmçinin çevrilmiş şüaların düz şəkildə yuxarıya doğru yönəldilmədiyini, əksinə 0°-dan 90°-ə qədər bucaqlarda yayıldığını göstərmişdir (şəkil 1). ZEMAX OpticStudio proqramı virtual detektorun optik parametrlərini iki vahiddə təqdim edir: detektorun işıqlandırması və ümumi işıq seli. Piramidaşəkilli fosfor halında simulyasiya nəticələrində  $9.525E+2$  Lm/cm<sup>2</sup>, düz fosfor halında isə  $7.909E+2$  Lm/sm<sup>2</sup>, detektordakı ümumi işıq seli piramidaşəkilli fosforlu nümunə üçün  $1.01E+5$  lm, düz tip fosfor üçün  $8.123E+4$  lm olmuşdur. Beləliklə, piramida fosforlu işıq diodu ilə adi düz fosforlu qurma üsulunu müqayisə etdikdə pik işıqlandırmada 15%, ümumi işıq selində 19% artım müşahidə olunur, eksperimental məlumatlar isə işıq selinin 10% artdığını göstərir.

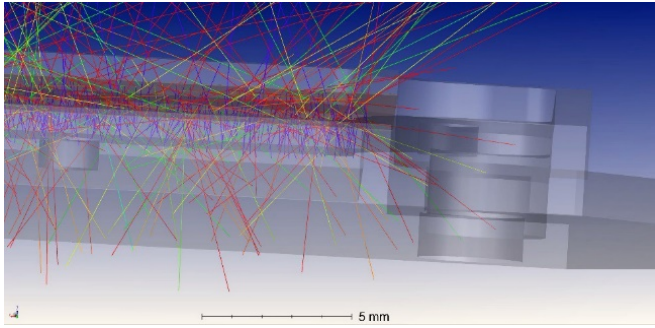
Piramida və kapsul işıq diodlarının rəng temperaturu baxış bucağının funksiyası olaraq qəbul edilən adi bir işıq diodunun rəng temperaturu ilə müqayisə edilmişdir. Rəng temperaturunun 0°-dən



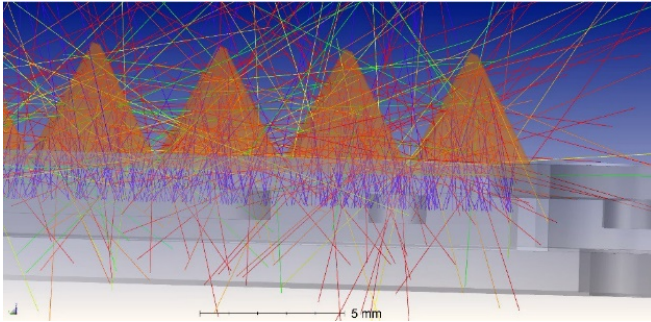
(a)



(b)



(c)



(ç)

Şəkil 1. Işıq diodların a) düz növü b) piramida növü c) düz növü yan görünüş ç) piramida növü yan görünüş üçün şüa izləmə simulyasiyasının təsviri.

90°-ə qədər bucaq asılılığının dəyişməsinə nəzərə alsaq, fosforun düz növü üçün 90° əyilməsi 680K, piramida tipi üçün - 525K və kapsul növü üçün - 86K-dır. Ağ işıq diodlarının işıqlandırılmasının iki ölçülü fəza paylanması məsələsi araşdırılır. 60 ° altlığın həndəsəsindən hesablanan nəzəri yayılmış bucaqdır ki, bu bucaqdan kənara işıq diodundan şüalanma altlığın kənarlarından əks olunmadan yayılır. Piramida üsulu çıxıntı quruluşuna baxmayaraq, mərkəzdən şüa bucağının əhəmiyyətli dərəcədə genişlənməsini göstərmir. Kapsul qablaşdırma üsulu sferik formasına görə fərqli bir paylanmaya malikdir və bu üsul ölçülmüş işıq diod nümunələrinin qalan hissəsindən daha geniş bucaq altında şüalanmasını təmin edir.

**“Alınan işıq diodlarının parametrlərinə təsir edən amillər və onların optimallaşdırılması” adlı dördüncü fəsil**də Işıq mənbəyindən istənilən istiqamətdə nisbi işığın intensivliyini təsvir edən bir işıq diod çipinin yönəlmə diaqramı araşdırılır. Goniometrdən istifadə edərək mavi InGaN çiplərinin emissiya istiqamətini və modelini müəyyən etmək üçün onların şüalanma intensivliyinin paylanması diaqramı ölçülmüşdür. Çipin yetişdirildiyi substratın arxa tərəfinə metal təbəqə çəkilmişdir ki, əks olunan şüalanma çipə doğru yönləndirilsin. Işıq diod çipinin şüalanma modelini ölçmək üçün goniometr fotometr ilə təchiz edilmişdir. Işıq diodunun istinad çərçivəsinin fırlanma mərkəzinə uyğunlaşdırılması, onun lazerdən istifadə edərək iki ortoqonal rakurs arasında alternativ olaraq düz xəttə və ya düzgün nisbi mövqelərdə yerləşməsi mərhələli bir proseslə həyata keçirilmişdir. Azimutal bucaq dəyişdirildikdə işıq diodunda heç bir dəyişiklik müşahidə olunmadıqda bu proses başa çatmış olur. İntensivliyin paylanmasının nəticələrindən məlum olur ki, çip səthinin əsas şüalanması çipin ön səthindən irəli yönəldilmişdir və çipin yan hissələrindən əhəmiyyətli dərəcədə şüalanma vardır.

Bundan əlavə, təbəqədəki fosfor hissəciklərinin qeyri-bərabərliyinin işıq diod şüalanmasının optik xüsusiyyətlərinə təsiri nəzərə alınır. Bunun üçün kvadrat geometrikşəkilli ~400 μm qalınlığa malik, həcmcə 10%-lı konsentrasiyaya malik həmçinin fosfor və silikon bir təbəqə düzəlmişdir. Qeyri-bərabər paylanmanı simulyasiya etmək üçün istinad qatının  $V_0$  həcmi eyni genişliyə malikdir, lakin istinad fosfor təbəqəsinin qalınlığının yarısı olan  $V_1$  və  $V_2$  həcmələrinə

bölünmüşdür. Bu təbəqələr şüalanma istiqamətində perpendikulyar olaraq işıq diodunun üstünə növbə ilə qoyulur. Aşağı təbəqədəki fosfor konsentrasiyası referans təbəqədəki fosfor konsentrasiyasının altına və ya üstünə quraşdırılır.  $V_1$  və  $V_2$  həcmindəki  $k_1$  və  $k_2$  fosfor konsentrasiyaları bir -birindən asılıdır və ifadəyə tabedir:

$$V_{0K0} = V_{1K1} + V_{2K2} = \text{const} \quad (3)$$

$k_1$  və  $k_2$  arasındakı araşdırılan nisbətlər  $k_1 : k_2 = 1:24$  qədər dəyişir, bu da 1-ci qatdakı konsentrasiyanın 2-ci qatdan 24 qat yüksək olduğu və həmçinin aşağıdakı nisbətlərdə olduğu anlamına gəlir: 1:12, 1:6, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, 6:1, 12:1, 24:1. Təcrübə nəticələri göstərir ki, 1-ci qatdakı fosfor konsentrasiyası fosforun vahid paylanması ilə həmin qatdakı konsentrasiyasından aşağı olduqda işıq emissiyası daha sıx olur. Nəticələrdən belə çıxır ki, işıq diod çipinin yaxınlığında daha az fosfor konsentrasiyası olan təbəqələr eyni ümumi xromatiklik koordinatlı X ilə eyni işıq diodlarından daha yüksək enerji axını olan ağ işıq diodları istehsal etməyə imkan verir.

Eyni zamanda, fosfor təbəqəsindəki qüsurların, məsələn, fosfor hissəciklərinin ətrafındakı hava köpüklərinin mənfi təsiri və onun qeyri-bərabərliyinin işıq diodunun optik xüsusiyyətlərinə təsiri araşdırılmışdır. Bu problemi aradan qaldırmaq üçün vakuüm çəkmədən istifadə edərək fosfor təbəqəsi istehsal üsulunun tətbiq olunduğu bir araşdırma aparılmışdır. Diodların işıq selinin işıq dioduna olan məsafədən asılılığını müəyyən etmək və köpüyü olmayan işıq diodu üçün eyni məsafələrlə müqayisə etmək məqsədi ilə müxtəlif məsafələrdə lüksometr ilə ölçülmüşdür. İntegrasiya edilmiş intensivliyi ölçülən köpüksüz işıq diodu, vakuümdə əldə edilən işıq diodu üçün  $97 \text{ lm/Vt}$  ilə müqayisədə  $102 \text{ lm/W}$  daha yüksək işıq səmərəliliyinə malikdir. Məsafə ilə köpüklü işıq diodu köpük olmayan işıq diodundan daha intensiv bir düşməyə malikdir.

İşıq diodunun enerji təchizatının elektrik dövrəsi sınaqdan keçirilmişdir. Belə ki, yük dəyişdikdə cərəyan sabit qalır. Şəbəkə gərginliyini 220V-a çevirmək üçün girişdəki çeviricinin bir diod körpüsü və bir tutum C üzərində hamarlaşdırıcı bir filtr ilə hazırlanmış bir elektrik dövrəsi yığılmışdır. Yüksək tezlikli impulsları yaratmaq üçün LD7552BPS PWM kontrollerdən istifadə olunur. İşıq diodunun daimi elektrik və optik gücünü saxlamaq üçün

AD633JNZ seriyalı analoq çarpan yanaşması tətbiq olunur. Sabit gərginlik mənbəyinin çıxış gücünü sabitləşdirmək üçün analoq çarpan əksəlaqə dövrəsində aktiv gücləndirici kimi istifadə olunur. Onun X girişi cərəyanında bir gərginlik düşməsi ilə fərqlənən işıq diodunun cərəyanına mütənasib potensialla təchiz edilmişdir. Nəticədə analoq çarpan işıq diodunun cərəyanı və gərginlik dəyərlərinin məhsuluna bərabər olan bir siqnal dəyəri çıxarılmışdır. Çarpanın çıxış gərginliyi daha sonra əməliyyat gücləndiricisinin çevirici girişinə verilir, bu isə tərs çevrilməyən girişdəki istinad gərginliyindən çıxılır. Beləliklə, tranzistordan keçən cərəyan sabit saxlanılır və mənbənin çıxış müqaviməti yüksəlir.

Yığılmış çeviriciləri sınamaq üçün onların elektrik xüsusiyyətləri müəyyən müddət ərzində ölçülmüşdür. Çıxış optik gücü və digər optik parametrlər inteqral sfera vasitəsi ilə təyin olunmuşdur. 10 dəqiqə ərzində altlığın temperaturu termocüt ilə ölçülmüş və  $20^{\circ}\text{C}$  ilə  $80^{\circ}\text{C}$  arasında dəyişmişdir. Işıq diodunun çıxış gücündəki dəyişiklik  $0.008 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$  olmuşdur. Müqayisə üçün qeyd edim ki, adi bir işıq diodu üçün cərəyan mənbəyinin orta güc dəyişikliyi 1-  $80^{\circ}\text{C}$  aralığında  $0,04 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$  -dir.

Dissertasiyada əldə edilən nəticələrin sınağı küçə işıqlandırılması üçün istehsal olunan ağ işıq diodlarının tətbiqi ilə həyata keçirilmişdir. İnteqrasiya edilmiş işıq diod modulları olan üç müxtəlif növ küçə armatur dizaynının xüsusiyyətləri sınaqdan keçirilib. İstehsal olunan armaturlarla işıqlandırılarkən yolların işıqlanma nümunəsi araşdırılmış və diaqram şəklində tipik bir paylanma ilə müqayisə edilmişdir. Küçə LED modullarının deqradasiyaya həssaslığı da araşdırılmış, 3.0 A cərəyanda davamlı işlədilərək işıq seli hər 48 saatda lüksometr ilə ölçülmüşdür. 500 saatdan sonra işıq diodlarının parlaqlığı eksponensial olaraq azaldığı və 10 min saatdan sonra işıq selinin 13% azaldığı qeydə alınmışdır. Ətraf mühitin istiliyinin artması ilə çıxış şüalanmasının optik gücünün azaldığı da müəyyən edilmişdir.

## NƏTİCƏLƏR

1. Işıq diodlarında istifadə olunan  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  fosforunun həyəcanlanması nəticəsində əks olunan fotonların sayı 34%, fosfordan keçən fotonların sayı 55% olmuşdur ki, bu da kvant səmərəliliyinin 89%-ə çatmasının səbəbidir.
2. Işıq diodlarında tək  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  əvəzinə 80:20% nisbətində  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  və  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  fosforlarının istifadəsi işıq selinin 8.3% artmasına səbəb olur, həmçinin rəng ötürmə indeksinin 70-dən 75-ə və rəng temperaturunun 7134 K-dən 6433 K-ə düşməsi ilə CIE 1931 diaqramındakı koordinatları ideal ağ işığa yaxınlaşdırır.
3. Sferik işıq diod inkapsulasiyasının şüaları sındırması səbəbindən düz inkapsulasiya ilə müqayisədə ekstraksiya səmərəliliyini 94.5%-dən 98.0% -ə qədər artırır; şüa izləmə üsulu da radiusun və inkapsulasiyanın sındırma indeksinin artması ilə səmərəliliyin artdığını göstərir.
4. “Çip üzərində fosfor” texnologiyası ilə yaradılmış işıq diodunun enerji axını standart bir işıq diodundan 7,8% yüksəkdir və o, daha kiçik foton səpilmə bucağı sayəsində rəng temperaturunun bucaq paylanması ortalama 13 Kelvin/dərəcə qədər yaxşılaşır.
5. Fosfor təbəqəsinin sahəsindəki azalma 55% daha kiçik bir emitter sahəsi olan işıq diod çipinə tətbiq edildikdə, fotoluminesensiya kvant səmərəliliyinin 19%-dən 21%-ə qədər artdığını göstərir ki, bu da fotonların daha səmərəli absorpsiyasına və işıq diod çipindəki təkmilləşdirilmiş cərəyan injeksiyasına bağlıdır.
6. icad olunmuş sferik inkapsula edici şəklində təbəqənin içərisində yerləşdiyi fosforlu işıq diodunun kapsul qablaşdırma üsulu fotonların çıxış bucağının artması və onların ekstraksiyasının yüksək olması nəticəsinə enerji axınının 13% artmasına səbəb olur.
7. Fosfor örtüyünün inkişaf etdirilmiş piramidaşəkilli quruluşunun istifadəsi fotonun əks olunma bucağının artması səbəbindən işıq diodunun işıq səmərəliliyinin 14% artmasına gətirib çıxarır, bunun

nəticəsində fotonların yenidən udulması və fosforun həyəcanlanması baş verir.

8. ZEMAX OpticStudio proqramından istifadə edərək həyata keçirilən Monte Karlo şüa izləmə üsulu istehsal olunan piramidaşəkilli işıq diodlarının simulyasiyasında işıq selinin 19% və ümumi işıqlandırmanın 15% artdığını göstərir.

## **DISSERTASIYA MÖVZUSU ÜZRƏ DƏRC EDİLMİŞ İŞLƏRİN SİYAHISI**

- [1] Orujov, T.Y. Investigation of YAG:Ce luminescence properties and manipulation of phosphor converted white LED's color characteristics / T.Y. Orujov, S.A. Mammadova, S.H. Abdullayeva [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics, –2015. – vol. 21. № 2. –p. 36-42.
- [2] Abdullayeva, S.H. Internal quantum efficiency of (11-22) InGaN/(In)GaN multiple quantum wells / S.H. Abdullayeva, G.K. Gahramanova, R.B. Jabbarov [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics, –2016. –vol. XXII. –№ 1. –p. 49-51
- [3] Abdullayeva, S.H. Remote Pyramid-Shaped Phosphor Coating for Phosphor-Converted White LEDs / S.H. Abdullayeva, T.Y. Orujov, N.N. Musayeva [et al.] // World Journal of Nano Science and Engineering, –2017. –vol. 7. –№ 2. –p. 17-24
- [4] Оруджев, Т.Я. Увеличение экстракционной эффективности светодиода применением пирамидообразного люминофорного слоя / Т.Я. Оруджев, С.Г. Абдуллаева, Р.Б. Джаббаров // Оптический Журнал, –2019. –том 86. –№ 10. – с. 83-89
- [5] Orujov, T.Y. Obtaining white light by the combination of  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  and  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  phosphors in light emitting diodes // Azerbaijan Journal of Physics., 2019, Vol. XXV, № 4, pp. 26-28 .
- [6] Orujov, T.Y. Characterization of optical parameters and evaluation of the quantum yield of the led phosphor layer //





Dissertasiyanın müdafiəsi "12" dekabr 2021-ci il tarixində saat 11<sup>00</sup> Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1143, Azərbaycan, Bakı şəhəri, H. Cavid prospekti 131.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat "12" noyabr 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 19.11.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 38540

Tiraj: 30