

**АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА**

*На правах рукописи*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО  
ТЕХНОЛОГИИ «ЧИП НА ПЛАТЕ»**

Специальность: 2203.01 – Электроника

Отрасль науки: Физика

Соискатель: **Оруджев Теймур Яшар оглы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени доктора философии

**Баку – 2021**

Диссертационная работа выполнена в Институте Физики Национальной Академии Наук Азербайджана (НАНА)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Абдуллаева Севда Гасан кызы**

Официальные оппоненты: Доктор физических наук, доцент  
**Керимов Эльчин Ахмед оглы**  
Доктор физико-математических наук, профессор  
**Годжаев Эльдар Мехралы оглы**  
Кандидат физико-математических наук, доцент  
**Насиров Эльшан Файаз оглы**

Диссертационный совет Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана под номером ВЕД.1.14

Председатель диссертационного совета:

Действительный член НАНА, доктор физико-математических наук, профессор  
**Мамедов Назим Тимур оглы**

Ученый секретарь диссертационного совета:

Доктор физических наук, доцент  
**Мехдиева Рафига Забил кызы**

Председатель научного семинара:

Доктор физико-математических наук, доцент  
**Байрамов Аяз Идаят оглы**



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы.** Актуальность данной работы обусловлена большой исследовательской ёмкостью в сфере разработки более эффективных источников световой энергии для различных областей применения в настоящий момент, таких как использование в общем освещении, в устройствах отображения информации, а также для передачи сигналов. Большинство таких приборов имеет принцип действия, основанный на люминесценции в электронно-дырочных переходах, а также различных люминесцентных материалах. Вопрос экономного использования электроэнергии носит глобальный характер, растёт интерес к созданию высокоэффективных искусственных источников света с энергетической точки зрения. Словом, так как потребность в освещении растёт быстро, переход на светодиодное освещение позволяет сэкономить ~130 миллионов манатов в год. Поэтому, насущной задачей на сегодняшний день, является увеличение эффективности преобразования твердотельными приборами электрической энергии в оптическую за счёт совершенствования технологии и применяемых материалов для производства таких приборов. Огромные усилия были привлечены для создания эффективных светодиодов, включая комплексные схемы легирования или комбинации материалов, для поднятия эффективности рекомбинации в активной зоне кристалла и уменьшения потерь и утечек в при-контактных областях. Однако до сих пор остаются нерешённые проблемы в области эффективности преобразования света со стороны люминофоров и даже самих светодиодов (например, низкая эффективность зелёных светодиодов), что является препятствием для их окончательного проникновения на коммерческие рынки освещения. На сегодняшний день также стоит задача оптимизации светодиодов для решения таких проблем, как внутреннее отражение и поглощение фотонов в пределах светодиодного пакета, оказывающих немалое влияние на конечную эффективность. По этой причине наряду с исследованиями в области повышения

квантовой эффективности полупроводниковых светодиодных структур, разработка методов увеличения экстракции фотонов приобретает особую актуальность.

Тема диссертации, являясь обширной, изучалась авторами многих работ, по ней также было опубликовано достаточное количество литературных. Однако, до сих пор имеется большой потенциал для исследования в этой области.

### **Цель и задачи исследования.**

Цель исследования – увеличение эффективности излучения белых светодиодов за счёт повышения экстракции фотонов путём оптимизации параметров и режима работы светодиода и минимизации таких эффектов, как поглощение и отражение внутри светодиодного пакета.

Достижение поставленной цели предусматривало решение следующих задач:

- Проведение теоретического расчёта максимальной эффективности преобразования электрической мощности в конечную оптическую мощность с учётом коэффициента преобразования всех компонентов светодиодного пакета.
- Создание светодиодов на основе синих светоизлучающих InGaN чипов по технологии «чип на плате» с применением люминофоров.
- Исследование таких параметров светодиодов, как коррелированная цветовая температура, индекс цветопередачи, световая отдача и экстракционная эффективность.
- Исследование экспериментальных закономерностей изменения оптических характеристик светодиодов в зависимости от различных параметров и режима работы светодиодов.
- Улучшение качества цветовых параметров светодиодов применением различных люминофоров.
- Расчёт квантовой эффективности люминофоров, применяемых при изготовлении светодиодов, посредством измерения отражённого, поглощённого и трансмиссионного потока излучения.

- Разработка методов производства и упаковки светодиодов, способствующих увеличению их эффективности.
- Разработка трёхмерных компьютерных моделей светодиодов с дальнейшей симуляцией оптических параметров методом трассировки лучей при помощи программ оптического дизайна.

**Методы исследования** включали в себя: измерение фотометрических характеристик и анализ спектров излучения белых и синих светодиодов; измерение спектров люминесценции, измерение величин отражения, поглощения и трансмиссии в люминофорах; исследование электрических параметров светодиодов; симуляционное исследование светодиодов методом трассировки лучей.

#### **Объекты исследования.**

В данной диссертации объектом исследования являются светодиоды, состоящие из InGaN чипов, подложек, служащих основанием для чипов, люминофоров. Исследуются процессы, происходящие в системах подложка-чип-люминофор-отражатель-линза, так как между этими компонентами происходят взаимодействия фотонов, которые отражаются, поглощаются и передают энергию.

#### **Научная новизна исследования.**

Научная новизна работы состоит в проведении комплексных исследований характеристик и оптических параметров светодиодов и разработке методов увеличения эффективности светодиодов. А именно, впервые были проведены следующие работы:

- Изготовлен люминофорный слой для светодиода усовершенствованной пирамидообразной формы, в котором наблюдалось повышение эффективности экстракции за счёт перепоглощения фотонов.
- Разработана трёхмерная компьютерная модель, соответствующая производимым физическим светодиодам, на основе которой была произведена симуляция методом трассировки лучей, и программным

методом вычислены значения светового потока, распределение и интенсивность распространяющихся в светодиоде лучей, которые были сравнены с экспериментальными данными.

- Разработан метод капсульной упаковки светодиода, способствующий увеличению экстракции фотонов и, соответственно, световой отдачи светодиода, где люминофор расположен под слоем сферического прозрачного полимера, в котором происходят многократные внутренние отражения.
- Разработан метод «люминофор на чипе», где люминофорный слой толщиной 30 мкм нанесён на эмиттерную часть чипа методом центрифугирования, и который даёт прирост в эффективности и улучшает угловые характеристики излучения светодиода.
- Исследована зависимость эффективности преобразования оптической мощности светодиода от эмиттерной площади чипа, а также влияние площади чипа на преобразование потока излучения люминофора, нанесённого на него методом «люминофор на чипе».
- Было доказано, что сферическая форма инкапсуляции на основе прозрачного полимера увеличивает экстракционную эффективность светодиода.
- Разработана и реализована на практике электрическая схема питания светодиода с использованием аналогового умножителя напряжения в цепи обратной связи для поддержания постоянной мощности на выходе преобразователя.

#### **Ключевые положения, выносящиеся на защиту:**

1. Идеальной концентрацией частиц люминофорного слоя для светодиода с точки зрения эффективности является  $2 \cdot 10^7$  на  $\text{см}^3$  при толщине 50 мкм.
2. Изменение тока белого светодиода на основе люминофора YAG:Ce не влияет на координаты его цветности в широком диапазоне.

3. Эффективность экстракции светодиода возрастает с 94.5% до 98% при использовании сферической формы инкапсуляции в сравнении с плоской формой, где больший радиус инкапсуляции, равно как и индекс преломления материала инкапсуляции приводят к большей экстракционной эффективности.
4. InGaN чип с длиной волны 440 нм наиболее соответствует спектру возбуждения люминофора YAG:Ce.
5. Технология упаковки светодиода «люминофор на чипе» способствует более интенсивному поглощению излучения, что увеличивает эффективность на 6%, а также улучшает угловое распределение цветовой температуры.
6. Эффективность преобразования оптической мощности светодиода увеличивается с уменьшением эмиттерной площади чипа как без люминофора, так и с люминофором на чипе.
7. Применение люминофоров  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  и  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  в качестве преобразователя в соотношении 80:20% увеличивает излучаемый световой поток на 8.3%, улучшает коррелированную цветовую температуру и индекс цветопередачи светодиода.
8. Интегрированное измерение оптических характеристик люминофора YAG:Ce показывает, что 55% исходного излучения является трансмиссионным, 34% отражается частицами люминофора, и 11% теряется при поглощении.
9. Метод упаковки светодиодов, в котором люминофор расположен под сферическим слоем прозрачного инкапсулирующего материала, даёт прирост потока излучения светодиода на 13% за счёт увеличения угла выхода фотонов исходящего излучения.
10. Пирамидообразная форма люминофорного преобразователя способствует ре-абсорбции

отражённых от люминофора фотонов, увеличивая при этом светоотдачу на 14%.

11. Электрические преобразователи на основе аналогового умножителя способны стабилизировать выходную мощность со сдвигом мощности всего на 0.008 мВт при изменении температуры светодиода на 1°C.

### **Практическая значимость исследования.**

Практическая значимость данной работы заключается в результатах, полученных в процессе исследования оптических характеристик белых светодиодов и применении их для оптимизации некоторых важных параметров исполнения светодиодных конструктивных особенностей с целью улучшения выходных характеристик. Исследования, проведённые в процессе изготовления белых светодиодов на основе InGaN излучающих чипов и люминофора YAG:Ce и упаковки их в целое устройство позволяют получить чистый белый свет с широким спектром излучения и высоким индексом цветопередачи. Разработанные методы упаковки светодиодов, такие как – светодиод со сферическим капсульным люминофором и упаковка светодиода пирамидообразной формы, позволяют повысить эффективность светодиодов на 10-20%. Практика, полученная при применении изготовленных белых светодиодов для освещения и исследования, проведённые в процессе тестирования, такие как регулировка температуры в корпусе и долгосрочность работы модулей позволяет оптимизировать конструкцию светодиодов для выпуска на потребительский рынок в стране. Также, электрические преобразователи напряжения для питания светодиодов были усовершенствованы и оснащены дополнительными электрическими элементами для поддержания рабочего режима работы светодиодов, что продлевает их срок службы.

### **Апробация работы.**

Результаты исследований, изложенные в диссертации, обсуждались на международных конференциях «1-я Международная конференция молодых исследователей,

посвящённая 94-летию общенационального лидера Гейдара Алиева» (Бакинский Инженерный Университет, 2017); «Международная Научная Конференция Актуальные Вопросы Прикладной Физики и Энергетики, посвящённая 100-летию юбилею Азербайджанской Демократической Республики» (Сумгаитский Государственный Университет, 2018); «Multidisciplinary approaches in solving modern problems of fundamental and applied sciences Dedicated to the 75th anniversary of Azerbaijan National Academy of Sciences» (Азербайджанская Национальная Академия Наук, 2020); «Актуальные Вопросы Прикладной Физики И Энергетики, II Международная Научная Конференция» (Сумгаитский Государственный Университет, Казанский Государственный Энергетический Университет, 2020); «2nd International Conference on Light and Light-Based Technologies» (Университет Гази, 2021).

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ (4 тезиса докладов на международных конференциях; 2 статьи в зарубежных журналах с импакт фактором 0,5; 4 статей в Республиканских журналах).

**Название организации, в которой выполнена диссертация:** Институт Физики, Национальная Академия Наук Азербайджана, Баку, Азербайджан.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и списка из 101 использованных литературных источников. Полный объём работы 150 страниц, включая 45 рисунков и 8 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, цель работы и проделанные для достижения поставленной цели работы, объекты исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, практическая значимость, апробация, структура диссертации. Дана общая информация, вводящая в курс положения дел о светодиодах и история их создания.

В первой главе «Обзор физических процессов и технология получения светодиодов» кратко описываются физические процессы, протекающие в полупроводниковых диодах, технология изготовления светодиодов. Описываются характеристики светодиодов, такие как: световой поток, интенсивность излучения, цветовая температура, диаграмма направленности, спектр излучения, индекс цветопередачи, цветовое пространство, электрические характеристики (сила тока, напряжение). Описаны методы получения белого света с помощью светодиодов, наиболее распространённым из которых является использование синего светодиода и люминофора с широкополосным спектром излучения, такого как  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{2+}$ .

Рассматривается эффективность светодиодов, включающая внутреннюю квантовую эффективность светодиодного чипа, квантовую эффективность люминофора, эффективность экстракции, а также потери, возникающие в компонентах светодиодов, ограничивающие эффективность.

Рассмотрена максимальная световая отдача преобразуемых люминофором белых светодиодов, основываясь на фотометрической теории, для того, чтобы иметь её относительное значение для сравнения с получаемыми далее экспериментальными результатами. Показано, что максимальная теоретическая световая отдача линейно возрастает с 215 до 300 лм/Вт при увеличении  $\alpha$  от 0,6 до 0,9 исходя из уравнения:

$$\eta_{\text{лм}} = 683 \left[ \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] \times \eta_{\text{пр}} \frac{(1-\alpha) \int V(\lambda) [P_c(\lambda) + P_{\text{ж}}(\lambda)] d\lambda}{\int P_c(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  – отношение поглощённой люминофором мощности к мощности, излучаемой чипом;  $V(\lambda)$  - функция чувствительности глаза;  $V(\lambda)$  - безразмерная величина, нормированная к 1 при 555 нм;  $P_c(\lambda)$  и  $P_{жс}(\lambda)$  - плотность спектральной мощности синего и жёлтого света соответственно, которые могут быть получены измерением спектра белого светодиода.

Отсюда следует, что, поскольку желтый свет, излучаемый люминофором, намного лучше перекрывается с функцией чувствительности глаза, чем синий свет, увеличение спектральной интенсивности желтого света по сравнению с синим светом, является способствующим фактором для увеличения световой отдачи белого светодиода. Поэтому, при увеличении поглощения люминофором синего излучения чипа, можно ожидать увеличение световой отдачи.

**Во второй главе «Производство и исследование оптических характеристик белых светодиодов»** рассматривается технология сборки светодиодов, используемых в экспериментах. Процесс монтажа чипов на подложку для производства экспериментов для данной диссертации осуществлялся на установке A1 от фирмы FK Delvotec. Для установки электрических контактов на чипы использовалось оборудование для ультразвуковой сварки - модель G5 от фирмы FK Delvotec. Для покрытия светодиодов люминофорным слоем, применялись диспенсеры, которые заливают дозированно люминофор на подложку с чипами. Для производства экспериментальных образцов использовались программируемые диспенсеры от Fisnar, модель - F4200N.

Приводится методика измерения характеристик светодиодов, в ходе которых исследовались спектры возбуждения и излучения светодиодов. Они измерялись с помощью спектрометра, который включает в себя монохроматор Horiba Yvon Jobin 1250M и детектор Andor Newton<sup>TM</sup>. Дифракционная решётка, установленная в монохроматоре, состоит из 1800 дифракционных щелей с рабочим диапазоном от 200 до 1000 нм. В качестве детектора использовался имеющий в качестве сенсора датчик с зарядовой

связью с разрешением  $1024 \times 255$  и размером пикселя  $26 \times 26$  мкм детектор Andor Newton. Для измерения оптических и электрических параметров светодиодов применялись интегрирующие сферы диаметром 150 см и 30 см от фирмы Everfine.

Для того, чтобы определить степень влияния инкапсуляции светодиодов на их производительность, были исследованы два типа инкапсуляции: плоская и сферическая, был вычислен поток, извлеченный из синей светоизлучающей матрицы, в зависимости от формы и размера ее инкапсуляции. Эффективность экстракции  $\eta_{экс}$  вычислялась путём измерения начального светового потока и светового потока на выходе после инкапсуляции. Данное исследование дополнялось при помощи симуляции методом трассировки лучей, которое также позволяет изучить влияние радиуса и индекса преломления инкапсуляции на эффективность экстракции. Результаты показывают, что сферическая инкапсуляция имеет преимущество перед плоской, увеличивая при этом эффективность с 94.5% до 98% по экспериментальным данным и с 96% до 98% по данным симуляции. Увеличение радиуса инкапсуляции и индекса преломления материала инкапсуляции также приводят к увеличению эффективности экстракции. Видно, как эффективность экстракции  $\eta_{экс}$  значительно уменьшается, когда радиус инкапсулирующей линзы становится соразмерным с габаритам чипа.

Далее исследуются характеристики люминофора, с использованием интегрирующей сфера диаметром 30 см. Образец помещался на стенке сферы, так, чтобы одна из его сторон оставалась снаружи. Для регистрации фотонов, отражённых от образца, и обратно излучённых люминофором, источник возбуждал образец изнутри сферы, отражение от которого измерялось спектрофотокалориметром. Для регистрации просвеченных через образец и преобразованных фотонов, образец возбуждался извне сферы, соответственно источник располагался за пределами интегрирующей сферы.

Чтобы определить абсолютные значения количества отражённого и просвеченного излучения для люминофоров на основе YAG:Ce, во-первых, мощность исходного синего излучения измерялась в сфере. Спектрофотокалориметр измеряет спектральное распределение потока (Вт/нм), которое показывает какая часть измеряемой мощности соответствует определённой длине волны, что позволяет напрямую рассчитать оптические мощности для отдельных длин волн, соответствующих излучениям как чипа, так и люминофора. В качестве образца люминофора использовался смешанный с полимером в концентрации 0.5 гр/см<sup>3</sup> YAG:Ce с длиной волны 550 нм, а также тот же самый люминофор, спрессованный без полимера. Концентрация люминофора в силиконе была равна 10%, поскольку плотность частиц люминофора в 10%-ном образце ( $\sim 9 \times 10^4$  частиц/мм<sup>3</sup>) имеет тот же порядок величины, что и плотность в люминофорных слоях, обычно применяемых в светодиодах. Важно рассчитывать вес люминофора для соблюдения единой концентрации на единицу объёма по всему образцу для образцов с полимером и без него.

Получив экспериментально все необходимые значения, квантовая эффективность люминофора рассчитывалась из соотношения:

$$\eta_l = \frac{N_{\text{изл}}}{N_{\text{ч}}} = \frac{N_{\text{изл}}}{N_{\text{ч}}^{\text{общ}} - (N_{\text{ч}}^{\text{отр}} + N_{\text{ч}}^{\text{тр}})}, \quad (2)$$

Здесь  $N_{\text{изл}}$  – число фотонов, излучаемых люминофором,  $N_{\text{ч}}$  – число фотонов, излучаемых чипом,  $N_{\text{ч}}^{\text{отр}}$  и  $N_{\text{ч}}^{\text{тр}}$  – соответственно отражённые и трансмиссионные синие фотоны.

Результаты измерений показали, что 34% начальной световой энергии теряется при отражении частицами в случае свободного люминофора. Ещё 11% оптической мощности теряется при безызлучательном поглощении люминофором синих фотонов. Данные потери обусловлены Стоксовым сдвигом и квантовой эффективностью люминофора. Лишь 55% от начальной мощности излучения на выходе составляют просвеченные синие и жёлтые фотоны, излученные чипом и

люминофором соответственно. В итоге измеренная эффективность составила 89% для свободного люминофора и 87% для люминофора с инкапсуляцией.

Сделано заключение, что традиционный метод упаковки светодиодов не является идеальным для эффективной экстракции фотонов в люминофорном слое. Даже если бы квантовая эффективность люминофора равнялась бы 100%, не все фотоны, излученные люминофором при его возбуждении, извлекаются из оптической системы светодиода.

Также во второй главе изучается влияние концентрации и толщины люминофора на преобразование спектра светодиода. Концентрация частиц люминофора изменялась от  $1.0 \cdot 10^7$  до  $8.0 \cdot 10^7$  частиц на  $\text{см}^3$ , которая рассчитывалась вычислением из значений среднего размера частиц и плотности люминофора. Также варьировалась толщина слоя люминофора от 50 до 500 мкм. Исследовалось то, как излучение светодиодной упаковки в целом зависит от концентрации, расположения и распределения люминофора. Из проведённых экспериментов делается заключение, что при толщине слоя в 0,5 мм, оптимальный баланс между преобразованным желтым светом и исходным синим светом (наиболее близкую к точке 6500К цветовую температуру) имели образцы с концентрацией  $\sim 2,0 \text{ E}7 \text{ см}^{-3}$ ; более концентрированные образцы препятствуют пропусканию синего излучения, тогда как менее концентрированные образцы дают меньше преобразованного излучения. Найдено, что при увеличении концентрации люминофора до определенного уровня, желтая составляющая преобразованного света увеличивается, что приводит к перемещению координат цветности CIE 1931 в сторону точки белого света (0,33, 0,33). В частности, изменение концентрации люминофора от  $1,0 \text{ E}7$  до  $2,5 \text{ E}7$  на  $\text{см}^{-3}$  сдвигает X-Y координаты цветности от (0,28; 0,34) до (0,32; 0,38). Было сделано заключение, что оптимизированная концентрация и толщина люминофора составляет  $2.5 \text{ E}7$  на  $\text{см}^{-3}$  и 50 мкм соответственно.

Также исследовалась зависимость интенсивности излучения от плотности протекающего через светодиод тока в

интегрирующей сфере, где ток возбуждения варьировался в диапазоне 10-70 А/см<sup>2</sup>. Видно, что интенсивность излучения возрастает с увеличением возбуждающего тока. Однако при изменении протекающего тока координаты цветности белого света не изменяются, а световой поток излучаемого белого света становится в 3 раза выше потока возбуждающего синего света при концентрации люминофора 2.5 E7 см<sup>-3</sup>, толщине слоя 50 мкм и плотности тока - 30 А/см<sup>2</sup>.

Добавлением люминофора Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>, имеющим значительную интенсивность в красной области, был изучен потенциал улучшения таких показателей излучения как коррелированная цветовая температура, индекс цветопередачи и световой поток излучения светодиода. Для данного эксперимента были использованы синие GaN чипы производства фирмы Fullsun, размером 1x1 мм с доминирующей длиной волны 450 нм мощностью в 1 Вт. В качестве люминофоров применялись Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> и Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> с пиковыми длинами волн ~550 нм и ~580 нм и полной шириной на уровне половины амплитуды 91 нм и 100 нм соответственно. Светодиоды были изготовлены следующим образом: 1) чипы были нанесены на подложки проводящим клеем; 2) затем нагревались до 150°C в печи; 3) смесь прозрачного силикона и люминофоров была произведена в соотношении 1 грамм люминофора на 10 грамм силикона; 4) люминофор Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> был смешан с Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> в двух концентрациях - 10% и 20% (общее количество порошка и инкапсулянта при этом остаётся неизменным), а также один из образцов оставлялся без добавления Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> для сравнения; 5) люминофорные композиты диспенсировались и полностью отверждались.

В итоге световой поток показывает высшее значение при увеличении концентрации красно-оранжевого Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> до 20%. Цветовая температура, напротив, понижается с увеличением концентрации Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>, так как на спектре излучения добавляется красная составляющая. Индекс цветопередачи же максимален при концентрации

$\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ , равной 10%, и, такое соотношение является оптимальным для получения белого света, так как при дальнейшем увеличении процента  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ , координата результирующего излучения будет сильно уходить в красную область. Для чистого  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  люминофора пиковое значение длины волны приходится на 530 нм, а полная ширина на половине амплитуды составляет 91 нм; при добавлении 10%  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  пиковое значение смещается до 562 нм, а полная ширина половины амплитуды 100 нм; а при добавлении 20%  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  эти значения соответственно 570 нм и – 83 нм.

В проведённом эксперименте добавление люминофора с усиленным красным излучением улучшает цветовые характеристики преобразованного люминофором светодиода, приближая координаты ближе к чистому белому свету. Делается заключение, что использование нескольких люминофоров с различным химическим составом является хорошей альтернативой светодиодам с двумя и тремя чипами различных длин волн, позволяющие получить белый свет.

Также изучалось влияние длины волны возбуждающего чипа на эффективность преобразования люминофора. Для проверки того, насколько длина волны возбуждающего излучения влияет на интенсивность в целом, был проведён эксперимент, в котором использовались три различных чипа с разными длинами волн: 440 нм, 450 нм и 456 нм. Все чипы имели одинаковые габариты с эмиттерной площадью излучения 1 мм<sup>2</sup>. Все три чипа были использованы для накачки люминофорного состава с  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$  в одинаковом корпусе, количество люминофора в нанесённом слое поддерживалось одинаковым для всех трёх чипов, для исключения его влияния на излучаемый поток. Для того, чтобы определить влияние только длины волны чипа, ток через чипы устанавливался таким, чтобы поток излучения  $\Phi_e$  синих чипов был равным для трёх светодиодов.

Результаты эксперимента оценивались, опираясь на три основных показателя: эффективность преобразования светодиода  $\eta_{np}$ , квантовую эффективность люминофора  $\eta_l$ ,

световой поток  $\Phi_v$ . Определено, что эффективность преобразования становится выше при уменьшении длины волны возбуждающего люминофор чипа с 456 нм до 440 нм. В светодиоде с чипом с длиной волны 440 нм эффективность люминофора  $\eta_l$  составляла 88.1%, в светодиоде с 450 нм – 71.3%, а с 456 нм - 65.4%. Световой поток также проявлял тенденцию к возрастанию при уменьшении длины волны чипа. В исходном светодиоде в трёх случаях световой поток, излучаемый синим чипом, составлял 5.4 Лм, однако после люминофорного преобразования он возрос до 50 Лм, а разница светового потока между светодиодами с 440 и 456 нм чипами составляла 14.4 Лм.

В ходе эксперимента было определено, что смещение длины волны возбуждающего чипа на 10 нм в коротковолновую или длинноволновую области оказывает влияние на эффективность преобразования и было определено, что спектру возбуждения, широко применяемого коммерческого  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  наиболее соответствует длина волны 440 нм.

**В третьей главе «Разработка методов повышения эффективности светодиодов»** докладывается о разработке метода нанесения люминофора, при котором он наносится концентрировано на эмиттерную площадь чипа, в весовом соотношении 1:1 и концентрации 5 г/см<sup>3</sup>, и люминофор распространяется лишь на эмиттерной площади поверхности чипа. Для нанесения люминофора использовался метод центрифугирования, который позволяет сделать слой очень тонким и равномерным. Порошок люминофора смешивался с полимерным инкапсулянтном до достижения хорошего его диспергирования в весовом соотношении 1:1, а его концентрация составляла 5 г/см<sup>3</sup>. Вязкость и удельный вес полимера составляли 3,8 Па·с и 1,23 г/см<sup>3</sup> соответственно. Такая концентрация является высокой, что позволяет получать слои в 8-10 раз тоньше с поддержанием концентрации люминофора на единицу толщины слоя. Чтобы проанализировать характеристики светодиода, цветовая температура, индекс цветопередачи и поток излучения светодиода с люминофором на чипе измерялись в интегрирующей сфере при прямом токе

350 мА. А также для измерения распределения цветовой температуры и светового потока использовался люксметр. Расстояние между люксметром и светодиодом составляло 2 м. Цветовая температура светодиода регистрировалась каждые  $5^\circ$ , при изменении угла между светодиодом и детектором от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ .

При постоянном угле направленности светодиода относительно детектора, картина освещённости от такого светодиода с люминофором на чипе более равномерна, также, как и цветовая температура на освещённой площади. Метод «люминофор на чипе» обеспечивает бóльшую концентрацию частиц люминофора в пределах эмиттерной плоскости чипа, что препятствует рассеянию синих фотонов в области вдали от чипа, устраняя эффект «жёлтого кольца». Угол половинной яркости, на котором световой поток вдвое ниже центрального излучения, составляет  $50^\circ$ , по сравнению с  $60^\circ$  для светодиода с обычным диспенсированием люминофора на подложке. Поток излучения этого метода покрытия люминофором составляет около 0,206 Вт, в то время как обычного люминофорного покрытия – 0,191 Вт. Отклонение цветовой температуры с изменением угла на  $90^\circ$  составляет 450 К по сравнению с отклонением цветовой температуры в 1700К при диспенсированном люминофоре.

Также исследуется влияние площади чипа с люминофором на эффективность всего светодиодного пакета. Для того, чтобы исследовать практическую значимость уменьшения размера чипа для увеличения эффективности его излучения были использованы два чипа, имеющие различные размеры:  $1 \times 1$  мм и  $1 \times 0.45$  мм. Оба чипа основаны на InGaN гетероструктуре с длиной волны излучения  $\lambda=450$  нм. Данные чипы были покрыты жёлтым люминофором YAG:Ce. Таким образом, было установлено влияние размера эмиттерной площади не только на эффективность экстракции синих фотонов из полупроводника, но также на экстракцию фотонов из чипа и люминофора, как единой излучающей системы. Выяснено, что светодиодные чипы при уменьшении площади выдают бóльшую мощность излучения при одинаковом потребляемом токе. Показано, что

синий чип обоих размеров без люминофора будет показывать больший поток излучения, чем с нанесённым люминофором. В результате, при 100 мА маленький чип показал на 2% больший коэффициент преобразования, чем большой чип. Чипы с люминофором также показали 2%-ое увеличение преобразования мощности.

Также рассматривается разработанный метод производства светодиода – капсульный метод упаковки, в котором люминофор располагается под внешним слоем инкапсулирующего материала силиконовой инкапсуляции. Капсула располагается на чипе и имеет форму полусферы, которая в некотором роде выполняет функцию выпукловогнутой линзы. Толщина капсулы составляет ~200 мкм при внешнем диаметре – 3 мм. В процессе изготовления люминофор расплылся на внутреннюю часть силиконового слоя, закрепляясь на нём при помощи адгезивных свойств силикона. В итоге, слой люминофора получается толщиной порядка нескольких диаметров частиц люминофора. Наблюдается повышение светоотдачи у данного метода по сравнению с традиционным методом. Данный метод способствует внутреннему отражению фотонов в инкапсулирующем слое прозрачного полимера, при этом они не сталкиваются с частицами люминофора, что способствует их лучшей экстракции на выходе светодиодного пакета. Наблюдается повышение оптической мощности у данного метода по сравнению с традиционным методом, где по мере возрастания силы тока через светодиод, разница в оптической мощности также увеличивается, и достигает 13%.

Докладывается о разработанном люминофоре пирамидообразной формы, где структура полых пирамид придаёт светодиоду геометрию оптического распространения фотонов, определяющую ход световых лучей для их максимальной экстракции из оптической системы. Для изготовления преобразовательного люминофорного слоя пирамидообразной формы использовался YAG:Ce. Для создания пирамидообразных конусов две силиконовые пластины

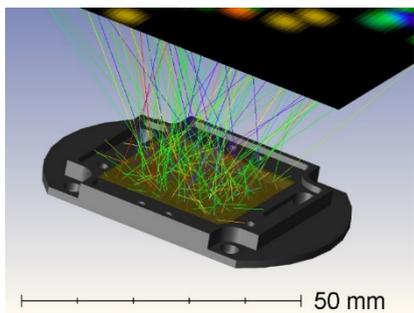
были сформированы в форме пирамида-подобных структур в качестве шаблонов, а затем были перелиты в эпоксидную смолу для придания им твердой консистенции, в которые заливался композит. YAG:Ce был смешан с инкапсулирующим полимерным силиконом в пропорциях 1:10 (концентрация люминофора была оптимальной – 0.5 г/см<sup>3</sup>), которым заполнялись эти формы, далее они спрессовывались, формируя тонкий слой люминофора. Преобразовательный слой состоял из 25 пирамид (5 рядов 5 колонн) высотой 4 мм и шириной у основания – 4 мм. Для проведения измерений фотолюминесценции изготовленных люминофорных покрытий была собрана светодиодная матрица, состоящая из 100 последовательных и 100 параллельных чипов.

Зависимость светового потока и светоотдачи от прямого тока через светодиод показывает увеличение с 93 до 107 лм/Вт для пирамидообразного люминофора и с 65 до 68 лм/Вт для преобразователя плоского типа в диапазоне протекающего через светодиод прямого тока 100-3000 мА. Прирост в 8% наблюдался при 100 мА и в 14% при 3000 мА по сравнению с плоским типом люминофорного преобразователя. Прирост по световому потоку приближался к 8% при более низких токах и доходил почти до 10% при предельных значениях тока светодиода. Коррелированные цветовые температуры этих двух светодиодов составляли 4324 К для пирамидообразного и 4644К для обычного светодиода.

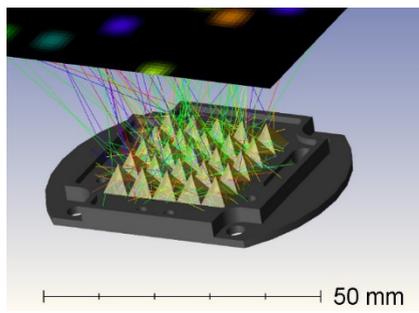
Был применён метод трассировки лучей для изучения распределения лучей в пирамидообразной структуре светодиодной упаковки, для чего было использовано программное обеспечение OpticStudio от Zemax. Для этого была смоделирована подложка, имеющая идентичную геометрическую форму физической применяемой подложке «чип на плате». Результаты трассировки подтвердили, что отраженные от люминофора плоского типа синие фотоны распространяются в обратном от него направлении, а в пирамидообразном люминофоре эти лучи направлены в разных направлениях внутри пирамиды, способствуя также их

направлению к выходу, и что преобразованные лучи не направлены строго вверх, а распространяются под разными углами от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Программа ZEMAX OpticStudio представляет оптические параметры с виртуального детектора двумя величинами: освещённость по детектору и полный световой поток. Освещённость в случае пирамидообразного люминофора составила в результатах симуляции  $9,525E+2$  Лм/см<sup>2</sup>, а в случае плоского типа люминофора  $7,909E+2$  Лм/см<sup>2</sup>, а полный световой поток, регистрируемый детектором –  $1.01E+5$  Лм для модели с пирамидообразным люминофором и  $8.123E+4$  Лм для модели с плоским типом люминофора. Таким образом, светодиод с пирамидообразным люминофором показывает 15%-ое увеличение пиковой освещённости и 19%-ое увеличение общего светового потока по отношению к обычному плоскому методу заливки люминофора, в то время как экспериментальные данные показывают 10%-ое увеличение светового потока (рис. 1).

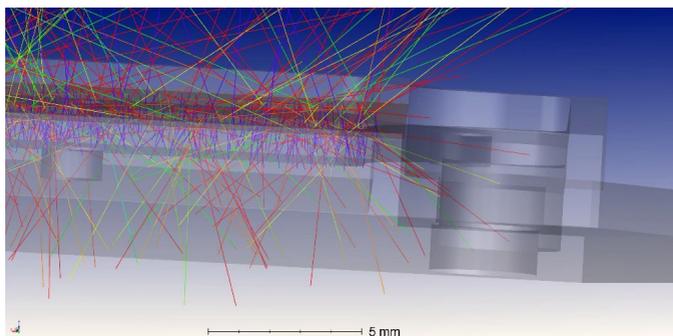
Цветовая температура пирамидообразного и капсульного светодиодов сравнивалась с цветовой температурой обычного светодиода, рассматриваясь как зависимость от угла наблюдения. Если рассматривать изменение угловой зависимости цветовой температуры от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , её отклонение под  $90^\circ$  у плоского типа люминофора составляет 680К, у пирамидообразного – 525К, а у капсульного – 86К. Исследуется вопрос о двумерном пространственном распределении освещённости белых светодиодов.  $60^\circ$  есть теоретический выпускаемый угол, рассчитанный из геометрии подложки, дальше которого излучение не распространяется непосредственно из самого светодиода, не отражаясь от граней подложки. Пирамидообразный метод не показывает значительного расширения угла отклонения луча от центра, несмотря на свою выступающую структуру. Капсульный метод упаковки имеет отличающееся распределение в силу своей сферической формы, и, данный метод отклоняет излучение на более широкий угол, по сравнению с остальными измеряемыми образцами светодиодов.



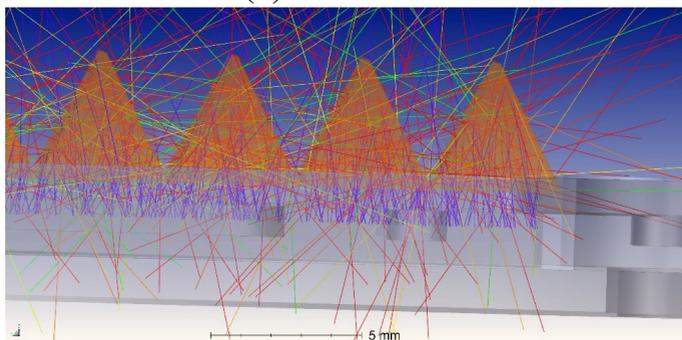
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1 Изображение лучей при симуляции для светодиодов: а) плоского типа б) пирамидообразного в) вид сбоку для плоского типа г) вид сбоку для пирамидообразного типа

**В четвёртой главе «Факторы, влияющие на параметры получаемых светодиодов и их оптимизация»** изучается диаграмма направленности светодиодного чипа, которая описывает относительную интенсивность света в любом направлении от света источника. Для определения направления и картины излучения синих InGaN чипов с помощью гониометра, измерялась диаграмма распределения интенсивности их излучения. На обратную сторону подложки, на которой выращивается чип, наносился металлический слой, так, чтобы излучение, отражаясь, перенаправляется в сторону чипа. Для измерения диаграммы направленности излучения светодиодного чипа, гониометр оснащался фотометром. Выравнивание светодиода относительно центра вращения системы отсчета выполнялось с помощью поэтапного процесса, при котором светодиод попеременно выравнивается между двумя ортогональными ракурсами с помощью лазера. Выравнивание заканчивалось, когда сдвиг светодиода не наблюдался при изменении азимутального угла. Из результатов по распределению интенсивности видно, что основное излучение поверхности чипа направлено вперёд от фронтальной поверхности чипа, а также происходит значительное излучение с боковых сечений чипа.

Далее рассматривается влияние неоднородности частиц люминофора в слое на оптические характеристики излучения светодиодов. Для этого изготавливался слой из люминофора и силикона, имеющий квадратную геометрическую форму и толщину  $\sim 400$  мкм с однородной концентрацией люминофора - 10 об.%. Чтобы смоделировать неоднородное распределение, объем  $V_0$  эталонного слоя делился на объемы  $V_1$  и  $V_2$ , имеющие одинаковую ширину, но половину толщины эталонного люминофорного слоя. Располагались эти слои поочередно над светодиодом перпендикулярно направлению излучения. Концентрации люминофора в нижнем слое устанавливалась либо ниже, либо выше концентрации люминофора эталонного слоя. Концентрации люминофора  $k_1$  и  $k_2$  в объёмах  $V_1$  и  $V_2$  взаимосвязаны и подчиняются выражению:

$$V_{0k_0} = V_{1k_1} + V_{2k_2} = \text{const} \quad (3)$$

Исследуемые соотношения между  $k_1$  и  $k_2$  варьируются в пределах до  $k_1:k_2 = 1:24$ , что означает, что концентрация в слое 1 в 24 раза выше, чем в слое 2, а также в следующих соотношениях: 1:12, 1: 6, 1: 3, 1: 2, 1: 1, 2: 1, 3:1, 6: 1, 12: 1, 24: 1. Результаты экспериментов показывают, что в случае, когда концентрация люминофора в слое 1 ниже, чем концентрация в слое с равномерным распределением люминофора, излучение света становится более интенсивным. Из результатов следует, что слои с более низкой концентрацией люминофора вблизи светодиодного чипа позволяют изготавливать белые светодиоды с идентичной общей средней координатой цветности X, но с более высоким потоком энергии  $\Phi_e$ , чем у светодиодов с однородным распределением люминофора в слое.

Вместе с тем исследуется негативное влияние, оказываемое дефектами в люминофорном слое, таких как пузыри воздуха вокруг частиц люминофора, а также влияние его неоднородности на оптические характеристики светодиода. Для устранения данной проблемы было проведено исследование, в котором применялся метод изготовления люминофорного слоя при помощи вакуумной вытяжки. Световой поток светодиодов измерялся с помощью люксметра на разных расстояниях для того, чтобы определить его зависимость от расстояния до светодиода, и сравнить его с теми же расстояниями для светодиода без пузырей. Светодиод без пузырей при интегрированном измерении интенсивности имеет большую световую отдачу в 102 лм/Вт по сравнению со световой отдачей 97 лм/Вт для светодиода, полученного без вакуума. С расстоянием, светодиод с пузырями имеет более интенсивный спад светового потока, чем без пузырей.

Тестируется электрическая схема питания светодиодов, в которой, при изменении нагрузки, ток остаётся постоянным. Для преобразования сетевого напряжения в 220В была собрана электрическая схема, в которой преобразователь на входе выполнен диодным мостом и сглаживающим фильтром на ёмкости  $C$ . Для образования импульсов высокой частоты

применяется ШИМ контроллер LD7552BPS. Для поддержания постоянства электрической и оптической мощностей светодиода, применяется подход с использованием аналогового умножителя серии AD633JNZ. Для стабилизации выходной мощности источника постоянного напряжения, аналоговый умножитель используется в качестве активного усилителя в цепи обратной связи, на вход X которого подаётся потенциал, пропорциональный току светодиода, выделяющийся как падение напряжения на токо-чувствительном резисторе  $R$ , а на вход Y - падение напряжения с самого светодиода. В результате аналоговый умножитель на выходе выдаёт значение сигнала, равное произведению величин тока и напряжения на светодиоде. Выходное напряжение с умножителя затем поступает на инвертирующий вход операционного усилителя, которое вычитается из опорного напряжения на неинвертирующем входе. Таким образом ток через транзистор поддерживается постоянным, а выходное сопротивление источника является высоким.

Для тестирования собранных преобразователей измерялись их выходные электрические характеристики на протяжении определённого периода времени. Выходная оптическая мощность и остальные оптические параметры измерялись в интегрирующей сфере. В течении 10 минут температура подложки измерялась при помощи термопары, и она изменилась от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ . Изменение выходной мощности светодиода составило  $0.008 \text{ мВт}/^{\circ}\text{C}$ . Для сравнения, среднее изменение мощности управляемого обычным источником тока светодиода составляет  $0.04 \text{ мВт}/^{\circ}\text{C}$  в диапазоне температуры от 1 до  $80^{\circ}\text{C}$ .

Апробирование результатов, полученных в диссертации, было произведено внедрением изготовленных белых светодиодов для освещения улиц. Были протестированы характеристики трёх различных видов конструкций уличных светильников со встроенными светодиодными модулями. Исследовалась картина освещённости дорог при освещении изготовленными светильниками, и она сравнивалась с

типичным распределением в виде диаграммы. Также была исследована подверженность уличных светодиодных модулей деградации, где они подвергались постоянному эксплуатированию при токе 3.0 А, и световой поток измерялся люксметром через каждые 48 часов. По прошествии 500 часов, яркость светодиодов экспоненциально уменьшалась, и по прошествии 10 тысяч часов световой поток снизился на 13%. Также было установлено, что с повышением окружающей температуры оптическая мощность выходного излучения снижается.

## ВЫВОДЫ

1. При возбуждении синим излучением люминофора  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ , применяемого в светодиодах, количество отражённых фотонов составило 34%, количество прошедших через люминофор фотонов 55%, приводя к квантовой эффективности люминофора в 89%.
2. Использование в светодиодах комбинации люминофоров  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  и  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  в процентном соотношении 80:20%, вместо одиночного  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ , даёт увеличение светового потока на 8.3%, индекса цветопередачи с 70 до 75, и понижение цветовой температуры с 7134 К до 6433 К, приближая координаты на диаграмме CIE 1931 к идеальному белому свету.
3. Сферическая инкапсуляция светодиода способствует увеличению эффективности экстракции по сравнению с плоской инкапсуляцией с 94.5% до 98.0% соответственно, что обусловлено преломлением лучей; метод трассировки лучей показывает рост эффективности с увеличением радиуса и индекса преломления инкапсуляции.
4. Поток излучения светодиода, изготовленного по технологии «люминофор на чипе», увеличивается на 7.8%, в сравнении со стандартным светодиодом, а угловое распределение цветовой температуры улучшается в среднем на 13 Кельвин/градус, что обусловлено меньшим углом рассеяния фотонов при данном методе.

5. Уменьшение площади люминофорного слоя, при нанесении его на светодиодный чип с меньшей на 55% эмиттерной площадью, показывает увеличенную с 19% до 21% квантовую эффективность при фотолюминесценции, что обусловлено более эффективным поглощением фотонов в люминофоре и улучшенной инжекцией тока в светодиодном чипе.
6. Применение разработанной модели светодиода, где люминофор расположен внутри сферической инкапсулирующей плёнки в виде капсулы, приводит к увеличению потока излучения на 13%, за счёт увеличения экстракции фотонов в результате внутреннего отражения в плёнке и увеличения угла выхода фотонов.
7. Применение разработанной пирамидообразной структуры люминофорного покрытия приводит к увеличению световой отдачи светодиода на 14% за счёт увеличения угла отражения фотонов, в результате чего происходит перепоглощение и возбуждение люминофора.
8. Метод трассировки лучей Монте-Карло, осуществлённый при помощи программы ZEMAX OpticStudio, показал 19%-ное увеличение светового потока и 15%-ное увеличение освещённости в симуляции параметров изготовленных пирамидообразных светодиодов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В РАБОТАХ

- [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 // Azerbaijan Journal of Physics., 2020, Vol. XXVI, № 2, pp. 21-24.

Защита диссертации состоится "22" декабря 2021г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании Диссертационного Совета ВЕД 1.14, действующего на базе Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Адрес: AZ1143, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида 131, Институт Физики НАНА

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Автореферат разослан по соответствующим адресам

"22" ноября 2021 года.

Подписано в печать: 19.11.2021

Формат бумаги: А5

Объём: 40472

Тираж: 70