

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»  
(ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий каф. РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.И. Туев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ТЕХНОЛОГИИ КОРПУСИРОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ БЕЛОГО ЦВЕТА

Учебно-методические указания для выполнения лабораторных работ для  
магистрантов, обучающихся по направлениям подготовки  
11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и  
27.04.04 «Управление в технических системах»

Разработали:  
Заведующий каф. РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.И. Туев

Профессор каф. РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ А.А. Вилисов

Доцент каф. РЭТЭМ  
\_\_\_\_\_ В.С. Солдаткин

Томск 2016

Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И., Технологии корпусирования светодиодов белого цвета: Учебно-методические указания для выполнения лабораторных работ для магистрантов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 19с.

Настоящие учебно-методические указания для выполнения лабораторных составлено с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) для магистров, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 27.04.04 «Управление в технических системах». Содержит описание четырёх лабораторных работ по основным разделам курса «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий» и направлено на формирования у студентов следующих умений и навыков:

**Уметь:**

- разрабатывать технологические процессы на светодиод белого цвета свечения различной сложности.

**Владеть:**

- навыками расчета теплового режима светодиода при его проектировании.

© Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И., 2016

© ТУСУР, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Требования к технике безопасности.....	4
Лабораторная работа №1 АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВАХ, СВЕТОВОГО ПОТОКА ОТ ПРЯМОГО ТОКА, СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ ОТ ПРЯМОГО ТОКА НА ОБРАЗЦАХ ИНДИКАТОРНЫХ, СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ	7
Лабораторная работа №2 РАСЧЁТ ЛИНЗЫ ДЛЯ СВЕТОДИОДА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЗЫ И МОНТАЖ В СВЕТОДИОД, ИЗМЕРЕНИЕ КРИВОЙ СИЛЫ СВЕТА, РАСЧЁТ СВЕТОВОГО ПОТОКА И СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ СВЕТОДИОДА	9
Лабораторная работа №3 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ОБРАЗЦОВ МОЩНОГО СВЕТОДИОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ P-N ПЕРЕХОДА.....	11
Лабораторная работа №4 ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ, ГЕРМЕТИЗАЦИЯ СВЕТОДИОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ПОТОКА, СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ И КОРРЕЛИРОВАННОЙ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕТОДИОДА.....	15

## **Требования к технике безопасности**

Перед началом лабораторных работ студенты должны получить инструктаж по технике безопасности в лаборатории и ознакомиться с правилами эксплуатации приборов и другого оборудования, используемого при выполнении работ. Инструктаж проводит преподаватель, ведущий занятия. После проведения инструктажа студент расписывается в регистрационном журнале о том, что он ознакомлен с правилами безопасной работы в лаборатории и обязуется их выполнять. Студенты не прошедшие инструктаж к работе не допускаются. Студенты, замеченные в нарушении настоящих правил, отстраняются от выполнения лабораторных работ.

### **Требования безопасности перед началом и окончанием работы**

Каждый студент должен:

1. Знать расположение общих рубильников силовой сети напряжением 220 вольт, частотой 50 Гц для того, чтобы в случае необходимости быстро отключить питание от лабораторных установок;
2. Изучить описание лабораторной работы и инструкции к используемым приборам;
3. Ознакомиться с макетом установки;
4. Проверить наличие заземления на каждом приборе, подлежащем заземлению. В случае отсутствия заземления сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией;

Запрещается:

- Включать в сеть приборы, вращать ручки настройки без разрешения преподавателя;
  - Переставлять приборы из установки;
  - Разбирать схемы, вскрывать приборы и т.д.;
  - Начинать проведение эксперимента без разрешения преподавателя;
  - Загромождать рабочее место и установку одеждой, сумками и др. посторонними предметами.
5. Перед началом эксперимента получить допуск у преподавателя.
  6. В присутствии преподавателя включить приборы, входящие в установку, в соответствии с инструкциями к приборам и описанием лабораторной работы. Если приборы не работают, сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.
  7. При нарушении нормальной работы прибора (сильное зашкаливание, характерный запах горелого и т.п.) немедленно отключить прибор и сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией;

Запрещается:

- Работать с незаземленными и неисправными приборами.
- Самим проводить устранение неисправностей.
- Оставлять без наблюдения включенные приборы.

8. Если работа выполнена полностью и правильно, то по указанию преподавателя выключить приборы в соответствии с инструкцией и привести в порядок рабочее место.

### **Требования безопасности в аварийных ситуациях**

1. При появлении запаха гари, дыма или возгорания принять меры по обнаружению источника возгорания и его ликвидации;

2. В случае пожара обесточить помещение, вызвать по телефону 01 пожарную охрану, произвести эвакуацию людей, сообщить администрации о случившемся и приступить к тушению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения;

3. В случае поражения человека электрическим током, необходимо быстро освободить пострадавшего от действия тока. Вызвать врача. Если пострадавший находится без сознания, то нужно привести его в сознание, давая нюхать нашатырный спирт, если пострадавший плохо дышит, начать делать искусственное дыхание и массаж сердца и продолжать их делать до прибытия врача;

4. В случае затопления помещения водой необходимо обесточить помещение, вызвать сантехника, вынести ценное оборудование и при необходимости сообщить администрации о случившемся.

### **Порядок оформления работ**

В процессе выполнения лабораторной работы студент должен наблюдать за ходом эксперимента, отмечая все его особенности: изменение цвета, тепловые эффекты, выделение газа и т.д. Результаты наблюдений записывают в лабораторный журнал, придерживаясь определенной последовательности:

- название лабораторной работы, дата выполнения;
- цель работы;
- краткая теория вопроса;
- результаты эксперимента;
- выводы по результатам работы.

Записи в лабораторном журнале производят чернилами.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 01-2013. Пример оформления титульного листа приводится в приложении А.

Для оформления Отчета также необходимо ознакомиться со следующими стандартами:

ГОСТ 7.12-93 ССИБИД. Сокращение русских слов и словосочетаний в библиографическом описании произведений печати.

ГОСТ 7.32-91 ССИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.

## Лабораторная работа №1

### АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВАХ, СВЕТОВОГО ПОТОКА ОТ ПРЯМОГО ТОКА, СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ ОТ ПРЯМОГО ТОКА НА ОБРАЗЦАХ ИНДИКАТОРНЫХ, СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

#### Оборудование и оснастка для выполнения лабораторной работы

##### 1. Измеритель светового потока "ТКА-КК1" ТУ 4486-016-16796024-2011

Прибор предназначен для измерения полного светового потока светодиодов в видимой области спектра (от 380 до 780 нм) по методу "интегрирующей сферы" ("сферы Ульбрихта"). Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков. Диаметр сферы 140 мм, приёмник света – фотодиод, размещённый в нижней полусфере. Измерительный блок выполнен в виде шара на жёстком основании, шар является "интегрирующей сферой". В нём имеется входной тубус для установки светодиодов диаметром до 14 мм и сменных диафрагм, входящих в комплект, для позиционирования светодиодов диаметрами 3,5,9 мм.

Основные технические характеристики:

- диапазон измерения светового потока 1 - 200 000 мЛм;
- основная относительная погрешность измерения светового потока, не более 10,0%;

- время непрерывной работы прибора не менее 8,0 ч;

Рабочие условия эксплуатации прибора:

- температура окружающего воздуха от 0 до 40°C
- относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха 25°C, 65±15%

- атмосферное давление 86-107 кПа.

##### 2. Источники питания MPS 3003

Основные технические характеристики:

Многооборотный регулятор для точной установки напряжения, последовательное и параллельное соединение 2х каналов: автотрекинг, 2-х полярный выход, режимы работы: стабилизация тока, напряжения и динамическая нагрузка, индикация: 3-разрядные LED-дисплеи на ток и напряжение, защита от перегрузки и переплюсовки, электронное отключение нагрузки 2 вентилятора охлаждения, включен в Госреестр средств измерений, регистрационный номер 32050-06.

- выходное напряжение 30 В.

- ток 3 А.

- уровень пульсаций 1 мВ.
  - количество каналов 2 + 1.
  - дополнительный канал 5В/3А.
  - точность установки 0.1В/0.01А.
  - влияние нагрузки 0.01% ±3мВ.
  - влияние сетевое напряжения 0.01% ±3мВ.
  - размер 155x375x255 мм.
2. Цифровой миллиамперметр.
  3. Светодиод белого цвета свечения.
  4. Соединительные провода.
  5. Фотометрический шар.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Собрать схему включения светодиода с источником питания и миллиамперметром.
2. Поместить светодиод в фотометрический шар, при этом обеспечить изоляцию соединительных проводов, подводимых к светодиоду.
3. На источнике питания установить стабилизацию по значению прямого тока.
4. На источнике питания задать прямой ток при котором у светодиода начинается свечение, измерить значение прямого напряжения и светового потока.
5. Проводя измерения величин по п.4, повышать значение тока с шагом 10 мА.
6. Все данные результатов измерений записывать.
7. Рассчитать значение световой отдачи.
8. Построить график зависимости светового потока от прямого тока.
9. Построить график зависимости световой отдачи от прямого тока.
10. Ответить на контрольные вопросы. Написать отчёт.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем объясняется разница в значениях прямого напряжения для светодиодов разных цветов свечения при одинаковых значениях прямого тока?
2. Почему на ВАХ, после значения тока 20 мА наблюдается линейный участок?
3. Как выглядит обратная ветвь ВАХ. С чем связано значение обратного напряжения?

## Лабораторная работа №2

### РАСЧЁТ ЛИНЗЫ ДЛЯ СВЕТОДИОДА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЗЫ И МОНТАЖ В СВЕТОДИОД, ИЗМЕРЕНИЕ КРИВОЙ СИЛЫ СВЕТА, РАСЧЁТ СВЕТОВОГО ПОТОКА И СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ СВЕТОДИОДА

#### Оборудование и оснастка для выполнения лабораторной работы

1. Гонеофотометр.
2. Измеритель светового потока "ТКА-КК1" ТУ 4486-016-16796024-2011

Прибор предназначен для измерения полного светового потока светодиодов в видимой области спектра (от 380 до 780 нм) по методу "интегрирующей сферы" ("сферы Ульбрихта"). Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков. Диаметр сферы 140 мм, приёмник света – фотодиод, размещённый в нижней полусфере. Измерительный блок выполнен в виде шара на жёстком основании, шар является "интегрирующей сферой". В нём имеется входной тубус для установки светодиодов диаметром до 14 мм и сменных диафрагм, входящих в комплект, для позиционирования светодиодов диаметрами 3,5,9 мм.

Основные технические характеристики:

- диапазон измерения светового потока 1 - 200 000 мЛм;
  - основная относительная погрешность измерения светового потока, не более 10,0%;
  - время непрерывной работы прибора не мене 8,0 ч;
- Рабочие условия эксплуатации прибора:
- температура окружающего воздуха от 0 до 40°C
  - относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха 25°C, 65±15%

- атмосферное давление 86-107 кПа.

#### 3. Источники питания MPS 3003

Основные технические характеристики:

Многооборотный регулятор для точной установки напряжения, последовательное и параллельное соединение 2х каналов: автотрекинг, 2-х полярный выход, режимы работы: стабилизация тока, напряжения и динамическая нагрузка, индикация: 3-разрядные LED-дисплеи на ток и напряжение, защита от перегрузки и переплюсовки, электронное отключение нагрузки 2 вентилятора охлаждения, включен в Госреестр средств измерений, регистрационный номер 32050-06.

- выходное напряжение 30 В.
- ток 3 А.
- уровень пульсаций 1 мВ.
- количество каналов 2 + 1.
- дополнительный канал 5В/3А.
- точность установки 0.1В/0.01А.
- влияние нагрузки 0.01% ±3мВ.
- влияние сетевого напряжения 0.01% ±3мВ.
- размер 155x375x255 мм.
- 4. Цифровой миллиамперметр.
- 5. Светодиод белого цвета свечения.
- 6. Соединительные провода.
- 7. Фотометрический шар.

#### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Рассчитать кривую силы света светодиода согласно инструкции преподавателя.
2. Собрать схему включения светодиода с источником питания и миллиамперметром.
3. Поместить светодиод в держатель гонеофотометра, при этом обеспечить изоляцию соединительных проводов, подводимых к светодиоду.
4. На источнике питания установить стабилизацию по значению прямого тока.
5. Включить гонеофотометр.
6. Провести измерения кривой силы света светодиода.
7. Все данные результатов измерений записывать.
8. Рассчитать значение световой отдачи.
9. Построить график кривой силы света.
10. Ответить на контрольные вопросы. Написать отчёт.

### Лабораторная работа №3

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОРПУСА ОБРАЗЦОВ МОЩНОГО СВЕТОДИОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ P-N ПЕРЕХОДА

### Краткая теория

Можно оценить способность отвода тепла от активной области кристалла, используя следующие формулы для определения теплового сопротивления:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (1)$$

где  $P_e$  – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;

$T_1, T_2$  – значения температуры двух тел или тела и среды ( $T_1$  – более высокая температура, чем  $T_2$ );

$R_t$  – тепловое сопротивление.

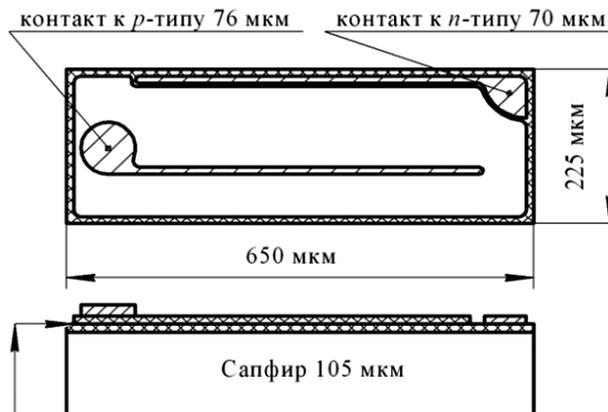
Для слоистой структуры тепловое сопротивление каждого слоя приблизительно оценивается по формуле:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (2)$$

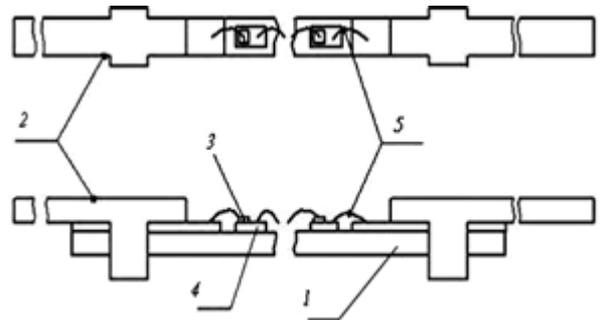
где  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

$\lambda$  – теплопроводность вещества (Вт/м·К).



Наименование слоя	Толщина слоя
<i>p</i> - тип GaN	0,2 мкм
<i>p</i> - тип AlGaN	0,03 мкм
Активная область InGaN/GaN	0,2 мкм
<i>n</i> - тип GaN	2,5 мкм
<i>u</i> - тип GaN	2 мкм



Рассмотрим оценочный тепловой расчёт на примере светодиодного излучающего элемента (СИЭ), который состоит из основания (1), торцевых выводов (2), последовательно соединённых светодиодных кристаллов (кристаллы планарного типа на

основе твёрдых растворов GaN, выращенные на сапфировой подложке) (3), приклеенных теплоэлектропроводящим клеем на металлизированные площадки (4). Светодиодные кристаллы соединены последовательно металлическими проволоками (5). Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией.

Так как теплопроводность люминофорной композиции, примерно на 90% состоящей из компаунда на основе силикона, не превышает 0,05 Вт/м·К, считаем, что отвод тепла осуществляется по пути наименьшего теплового сопротивления через подложку на металлическое основание СИЭ. Электрическая нагрузка на один кристалл составляет: прямое напряжение 2,9 В, прямой ток 10 мА, таким образом, потребляемая мощность составляет 29 мВт. При таких электрических режимах работы и габаритных размерах кристалла  $650 \times 225 \times 110 \text{ мкм}^3$ , его КПД составит не менее 50%, из этого следует, что 50% генерируется в виде оптического излучения и 50% – в виде теплового. По данным, представленным производителями кристаллов, температура *p-n*-перехода не должна превышать 125 °С. Исходя из указанных данных, можно провести оценочный расчёт тепловых режимов работы СИЭ в первом приближении с учётом отсутствия конвекции в колбе лампы.

Основное выделение тепла происходит в активной области кристалла GaN со значением теплопроводности  $\sim 1,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , тепловой поток проходит от активной области через *n* тип и *p* тип полупроводника со значениями толщины, указанными на рис. 5, затем через сапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  теплопроводность 46 Вт/м·К), металлизацию и теплопроводящий клей на металлическое основание СИЭ. Рассчитаем тепловое сопротивление кристалла, представив светодиодный кристалл в виде схемы, подобной электрической эквивалентной, последовательных сопротивлений, где каждый слой (в зависимости от материала) является сопротивлением. На основе данных значений теплопроводности материалов и их толщин по формуле (2) проведён расчёт теплового сопротивления кристалла (*p-n*-переход – металлизация), которое составляет 31 К/Вт. Далее из кристалла тепловой поток проходит через теплопроводящий клей на металлическое основание. Теплопроводность клея составляет примерно 60 Вт/м·К, толщина клея не более 30 мкм, тогда тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт. По данным от производителя (фирма Engled) аналогичных СИЭ тепловое сопротивление их изделий составляет 45 К/Вт, что косвенно подтверждает достоверность проведённых оценочных расчётов.

По формуле (3) проведём расчёт температуры *p-n*-перехода:

$$T_{p-n} = T_{\text{окр}} + (R_t \cdot P_e), \quad (3)$$

где  $T_{p-n}$  – температура *p-n*-перехода (°С);  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды (°С).

При  $T_{\text{окр}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  температура  $p$ - $n$ -перехода  $T_{p-n} = 25 + (33,87 \times 0,029) = 25,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Соответственно по формуле (3) определим значения температуры  $p$ - $n$ -перехода, которая составляет для варианта лампы с двумя СИЭ  $51,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , а с четырьмя СИЭ  $102,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Согласно методике [4] ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов деградации светодиодов без изменения основных механизмов отказов.

Коэффициент ускорения определяется энергией активации отказов ( $E_a$ ).

$$K_y = \exp \left[ \left( \frac{E_a}{kT} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{p-n} + 273} \right) - \left( \frac{1}{T_{p-ny} + 273} \right) \right], \quad (4)$$

где  $K_y$  – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

$E_a$  – энергия активации отказов, эВ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T_{p-n}$  – температура  $p$ - $n$ -перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме),  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{p-ny}$  – температура  $p$ - $n$ -перехода в ускоренном режиме испытаний,  $^\circ\text{C}$ .

Номинальное время наработки  $t_{\text{ном}}$  (срок службы СД) определяют по уравнению (5), задав коэффициент форсирования  $K_y$ , исходя из режимов ускоренных испытаний:

$$T_{\text{ном}} = t_y \cdot k_y, \quad (5)$$

где  $t_y$  – время испытаний в ускоренном режиме.

Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 ч.

Построим график прогнозируемого срока службы для лампы с одним, двумя и четырьмя СИЭ, значение энергии активации отказов для типовых светодиодов составляет примерно 0,75 эВ, данное значение будет использоваться для дальнейших расчётов. График построен в Ms Excel для заданных значений температур от 25 до 80 $^\circ\text{C}$  и на основе формул (4), (5).



Зависимость срока службы от температуры для: лампы с одним СИЭ – 1; лампа с двумя СИЭ – 2; лампа с четырьмя СИЭ – 3

### **Оборудование и оснастка для выполнения лабораторной работы**

1. Мультиметр с термопарой.
2. Источник питания светодиода.
3. Мощный светодиод или светодиодная матрица.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Установить светодиод на медную шайбу с отверстием, и закрепить.
2. В отверстие шайбы установить термопару.
3. Подключить термопару к мультиметру.
4. Включить мультиметр и измерить значение температуры, зафиксировать результаты в рабочей тетради.
5. Подключить светодиод к источнику питания.
6. Включить источник питания в сеть и установить значение тока, при котором светодиод начинает светиться, кратное 10.
7. Зафиксировать значение температуры, прямого напряжения и прямого тока в рабочей тетради.
8. Повышать значение прямого тока с шагом 10 мА, и выполнять п.7 выдерживая светодиод в течении 5 минут для термостабилизации до значения тока, при котором значения напряжения начинает существенно расти.
9. По формулам 1-5 построить график.
10. Составить отчёт по лабораторной работе.

## Лабораторная работа №4

# ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ, ГЕРМЕТИЗАЦИЯ СВЕТОДИОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ПОТОКА, СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ И КОРРЕЛИРОВАННОЙ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕТОДИОДА

### Краткая теория

В современных СД, в большинстве случаев используют кристалл синего цвета свечения и фотолуминофор жёлтого свечения с полушириной спектра порядка 110 нм. Это наиболее эффективный и дешёвый метод, т.к. КПД фотолуминофора на основе *YAG* и *YGG* достигает 90%. Для повышения индекса цветопередачи используют смесь люминофоров. В качестве базового используют люминофоры типа *YAG* или *YGG* и добавляют в композицию красные и зелёные люминофоры (нитридные и силикатные).



Рисунок 7. Процесс формирования излучения СД с кристаллом синего свечения и люминофором

Световая отдача светодиода является основной характеристикой эффективности светодиода – это отношение излучаемого светового потока к затраченной электрической мощности:

$$n = \Phi_v / (I \times U), \quad (37)$$

где,  $\Phi_v$  – световой поток излучённый светодиодом.

$$\Phi_v = 683 \times P \times k(\lambda), \quad (38)$$

где,  $P$  – оптическая мощность излучения,

$k(\lambda)$  – коэффициент чувствительности человеческого глаза к оптическому излучению с длиной волны  $\lambda$ . Связь световой отдачи СД и люминофора выражается по формуле:

$$[(x_w - x_b)^2 + (y_w - y_b)^2]^{1/2} n_b = [(x_w - x_e)^2 + (y_w - y_e)^2]^{1/2} n_e, \quad (39)$$

где  $n_b$  и  $n_e$  – световые отдачи прошедшего через люминофор синего излучения СД и возбуждённого жёлтого излучения люминофора,

$x_w$  и  $y_w$  – цветовые координаты белого цвета,

$x_b$  и  $y_b$  – цветовые координаты синего излучения,

$x_e$  и  $y_e$  – цветовые координаты излучения люминофора.

Из формулы 11 видно, что на графике цветов МКО можно провести прямую, соединяющую цветовые координаты излучения кристалла СД и цветовые координаты люминофора, затем, варьируя интенсивность излучения кристалла или концентрацию люминофора, определить цветовые координаты белого цвета СД. Также можно оценить зависимость световой отдачи СД белого свечения от концентрации люминофора или интенсивности излучения кристалла. График цветов МКО и формула показывают, что наиболее эффективным для изготовления СД с кристаллом синего свечения является использование люминофоров с максимумом излучения в жёлто-зелёной области оптического спектра. Люминофоры, излучающие в жёлто-зелёной области оптического спектра и возбуждающиеся от воздействия излучением в синей области оптического спектра, имеют кристаллическую решётку типа гранат, в узлах которой находятся атомы иттрия, алюминия и гадолиния.

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов  $((Y_{1-a} Gd_a) Al_5 O_{12} \times Ce^{3+} (YGG))$ . Кристаллическая решетка  $YAl_5O_{12}$  активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Два основных механизма работы люминофора:

1. Поглощение излучения люминесцентными центрами (активаторами и примесями) – переход электронов на более высокие энергетические уровни либо отрыв электрона от активатора, что приводит к образованию дырки.

2. Поглощение основой люминофора – образуются электроны и дырки. Дырки могут мигрировать по кристаллу и локализоваться на центрах люминесценции. Излучение происходит при возвращении электрона на более низкие энергетические уровни или при рекомбинации электронов и дырок. Ширина запрещённой зоны может составлять 1 – 10 эВ.

Для нанесения люминофора в светодиод используют связующие компоненты. Такими компонентами являются оптически прозрачные компаунды на основе силикона или эпоксидной смолы, а также пластины из поликарбоната.

Как правило, квантовый выход из композиции люминофора и связующего

компонента, в котором он растворён, выше в твёрдых растворах, чем в жидких, так как с повышением вязкости уменьшается вероятность безызлучательных процессов возбуждения через внутреннюю конверсию. Но в твёрдых растворах возможен эффект поляризации так как частицы люминофора «зажаты» между упорядоченными молекулами растворителя.

Для люминофора характерно температурное тушение и концентрационное.

У люминофоров *YGG* (*YAG*) ширина запрещенной зоны достигает более 3.8эВ, а основа люминофора имеет показатель преломления  $1,50 \leq n_{фл} \leq 1,85$ . Люминофоры, удовлетворяющие таким условиям, предпочтительно использовать для изготовления СД белого свечения.

### **Оборудование и оснастка для выполнения лабораторной работы**

#### **1. Измеритель светового потока "ТКА-КК1" ТУ 4486-016-16796024-2011**

Прибор предназначен для измерения полного светового потока светодиодов в видимой области спектра (от 380 до 780 нм) по методу "интегрирующей сферы" ("сферы Ульбрихта"). Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков. Диаметр сферы 140 мм, приёмник света – фотодиод, размещённый в нижней полусфере. Измерительный блок выполнен в виде шара на жёстком основании, шар является "интегрирующей сферой". В нём имеется входной тубус для установки светодиодов диаметром до 14 мм и сменных диафрагм, входящих в комплект, для позиционирования светодиодов диаметрами 3,5,9 мм.

Основные технические характеристики:

- диапазон измерения светового потока 1 - 200 000 мЛм;
- основная относительная погрешность измерения светового потока, не более 10,0%;

- время непрерывной работы прибора не мене 8,0 ч;

Рабочие условия эксплуатации прибора:

- температура окружающего воздуха от 0 до 40°С
- относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха 25°С, 65±15%
- атмосферное давление 86-107 кПа.

#### **2. Источники питания MPS 3003**

Основные технические характеристики:

Многооборотный регулятор для точной установки напряжения, последовательное и параллельное соединение 2х каналов: автотрекинг, 2-х полярный выход, режимы работы:

стабилизация тока, напряжения и динамическая нагрузка, индикация: 3-разрядные LED-дисплеи на ток и напряжение, защита от перегрузки и переполюсовки, электронное отключение нагрузки 2 вентилятора охлаждения, включен в Госреестр средств измерений, регистрационный номер 32050-06.

- выходное напряжение 30 В.
  - ток 3 А.
  - уровень пульсаций 1 мВ.
  - количество каналов 2 + 1.
  - дополнительный канал 5В/3А.
  - точность установки 0.1В/0.01А.
  - влияние нагрузки 0.01% ±3мВ.
  - влияние сетевое напряжения 0.01% ±3мВ.
  - размер 155x375x255 мм.
2. Цифровой миллиамперметр.
  3. Заготовка светодиода.
  4. Соединительные провода.
  5. Фотометрический шар.
  6. Люминофор.
  7. Компаунд.
  8. Весы электронные.
  9. Электропечь
  10. Микроскоп.

### **Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Приготовить люминофорную композиция в соответствии с инструкцией преподавателя.
2. Под микроскопом нанести люминофорную композицию на кристалл светодиода в отражатель под микроскопом.
3. Поместить светодиод в электропечь и высушить люминофорную композицию.
4. Проверить визуально, что люминофорная композиция загерметизировалась.
5. Собрать схему включения светодиода с источником питания и миллиамперметром.
6. Поместить светодиод в фотометрический шар, при этом обеспечить изоляцию соединительных проводов, подводимых к светодиоду.
7. На источнике питания установить стабилизацию по значению прямого тока.

8. На источнике питания задать прямой ток при котором у светодиода начинается свечение, измерить значение прямого напряжения и светового потока.

9. Проводя измерения величин по п.8, повышать значение тока с шагом 10 мА.

10. Все данные результатов измерений записывать.

11. Рассчитать значение световой отдачи.

12. Построить график зависимости светового потока от прямого тока.

13. Построить график зависимости световой отдачи от прямого тока.

14. Ответить на контрольные вопросы.

15. Написать отчёт.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем объясняется «спад» значений светового потока и световой отдачи при высоких значениях прямого тока?

2. Какой рабочий режим по значению прямого тока наиболее подходит для светодиодов данного типа?

3. Если на графике зависимости световой отдачи от прямого тока в начальный период, при низких значениях тока, провести линию, чем будет объясняться угол наклона этой линии.