

На правах рукописи



**Гончарова Юлия Сергеевна**

**ТЕПЛОЙ РЕЖИМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ  
СВЕТА ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА НАДЕЖНОСТЬ  
И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ**

**05.11.07**—Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный руководитель:** **Смирнов Серафим Всеволодович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры физической электроники, ТУСУР, г.Томск

**Официальные оппоненты:** **Градобоев Александр Васильевич,** доктор технических наук, профессор кафедры естественнонаучного образования Юргинского технологического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск

**Овчаров Александр Тимофеевич,**  
доктор технических наук, профессор, кафедры Архитектурного проектирования Томского государственного университета архитектуры и строительства. г. Томск

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г.Новосибирск

Защита состоится «21» декабря 2016 года в 09 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская 146, а также на сайте: <https://tusur.ru/ru/nauka-i-innovatsii/podgotovka-kadrov-vysshey-nauchnoy-kvalifikatsii/ob-yavleniya-o-zaschitah-dissertatsiy/dissertatsiya-teplovoy-rezhim-poluprovodnikovyh-istochnikov-sveta-pri-uskorenyh-ispytaniyah-na-nadyozhnost-i-dolgovechnost>

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.ф.-м. наук



А.Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Полупроводниковые источники света–оптикоэлектронные приборы, преобразующие электрическую энергию в немонохроматическое излучение белого света, находят широкое применение в устройствах автоматики, системах передачи и отображения информации, телеметрии, медицины, а также в светотехнических устройствах. Их параметры, физические и конструктивные особенности подробно рассмотрены в монографиях Берг Ф., Дин П. (1979) [1], Шуберт Ф. (2008) [2], Коган Л. [3].

В последнее время наибольшее внимание привлекают полупроводниковые источники белого света на основе гетероструктур GaN-GaNN с люминофором. Значения их световой отдачи достигли значений порядка 120 лм/Вт в промышленности и 180 лм/Вт – в исследовательских лабораториях, кроме того, важными их достоинствами являются: низкое энергопотребление и большой срок службы. При условии соблюдения рекомендованных производителем электрических и тепловых режимов, срок службы устройств на их основе может достигать 10-15 лет. При такой высокой предполагаемой долговечности натурные испытания полупроводниковых источников света становятся нерентабельными, ввиду их высокой длительности и трудоемкости и поэтому актуальным становится разработка ускоренных методов испытаний. Ускоренные испытания позволяют за более короткое время определить среднее время наработки источника света и сделать достоверный долгосрочный прогноз. Как правило, процесс ускорения достигается за счет увеличения температуры или прямого тока при испытаниях. Но для того, чтобы корректно выбрать режимы испытаний необходимо точно определить:

- основные тепловые процессы и области тепловыделения;
- температуру корпуса, температуру активной области кристалла и температуру люминофора при испытаниях;
- кажущуюся энергию активации процесса деградации;
- коэффициент ускорения при предельно-допустимых температурах и плотностях тока.

Исходя из вышесказанного, возможно сформулировать три основных направлений исследований в данной работе:

- Определение предельных рабочих характеристик полупроводниковых источников света.
- Разработка методов измерения температуры кристаллов источников света, в процессе эксплуатации и испытаний.

-Изучение процессов деградации полупроводниковых излучающих структур и люминофора.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта: «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства» по постановлению правительства РФ №218 от 2010 года.

### **Степень разработанности**

В настоящее время проблеме надежности полупроводниковых источников света уделяется большое внимание, что находит отражение в многочисленных публикациях в научно-технической литературе. Однако единого подхода к ускоренным методам оценки долговечности их работы не выработано. Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются предложения IESTM-21-11 [4], но они направлены на оценку надежности в большей мере светодиодных устройств, чем их элементной базы.

**Цель работы:** исследование и выбор тепловых режимов полупроводниковых источников света на основе кристаллов из InGaN с люминофорным покрытием, при ускоренных испытаниях на надежность и долговечность.

### **Для достижения цели были поставлены следующие задачи**

- Исследовать процессы выделения тепла в элементах источника света;
- Исследовать влияние температуры кристалла на основные электрические и фотометрические характеристики;
- Разработать методы измерения температуры кристаллов в процессе испытаний, с погрешностью не более чем  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- Установить взаимосвязи между температурой, временем испытаний и процессами деградации параметров источника света;
- Разработать методики ускоренных испытаний полупроводниковых источников света, при выборе в качестве ускоряющих факторов тока и температуры.
- Разработать модель прогнозирования долговечности на основе результатов ускоренных испытаний.

### **Выбор объекта исследования**

В качестве объекта исследования выбраны полупроводниковые источники света типа КИПД154А92 и КИПД154Г92 производства АО НИИПП (г.Томск), они созданы на основе кристаллов из InGaN с люминофорным покрытием и собраны в стандартном пластмассовом корпусе типа 5050. По своим электрическим и фотометрическим параметрам они являются типичными представителями изделий выпускаемые, как отечественными, так и зарубежными предприятиями.

Поэтому результаты проведенных исследований на этих источниках света могут быть распространены на другие подобные изделия.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач были применены следующие методы и оборудование:

- для исследования фотометрических характеристик использовали измерительные системы AvaSpec-2048 (Голландия) и USB-2000 (США);
- для измерения электрических характеристик использовали автоматизированный комплекс «Метроном» (ТУСУР) и комплекс на основе измерителя E7-21 (Беларусь);
- для измерения теплового сопротивления и температуры источников света использовали установку УТС (ТУСУР) и установку измерения температуры кристаллов источников света (ТУСУР);
- для ускоренных испытаний объектов исследования было использовано производственное оборудование ОА НИИПП (г.Томск).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Температурная зависимость ширины линий излучения кристалла и люминофорного покрытия полупроводниковых источников света на уровне 0,5 от максимума, позволяет проводить бесконтактное, дистанционное измерение температуры активной области кристалла и люминофора в процессе ускоренных испытаний с погрешностью не более чем  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
2. Распределение температуры в полупроводниковых источниках света при испытаниях зависит от температуры корпуса, плотности тока в активной области кристалла и величины поглощенной мощности в люминофорном покрытии, причем температура покрытия на 10-15  $^{\circ}\text{C}$  превышает температуру кристалла;
3. Величины, кажущейся энергии активации процесса деградации полупроводниковых источников света на гетероструктурах GaN-InGaN, определенные из ступенчатых температурных и электрических испытаний могут различаться на 12-17%, поэтому для корректного выбора коэффициента ускорения следует усреднять полученные этими двумя методами значения.
4. При ускоренных испытаниях при повышенной температуре в течение 1000-2000 часов температура кристалла источника света, увеличивается со временем по экспоненциальному закону  $T(t) = T(t=0)\exp(\alpha t)$ , где  $\alpha$  – температурный коэффициент;  $T(t)$  – текущее значение температуры  $T(t=0)$  – температура в начале испытаний;  $t$  – время испытаний.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность первого защищаемого положения подтверждается теоретической обоснованностью, высокой воспроизводимостью и согласованностью результатов, с расчетными значениями и результатами, полученными из измерений теплового сопротивления источников света.

Достоверность второго защищаемого положения основывается на экспериментальных данных, полученных с помощью современного оборудования, прошедшего поверку и калибровку на источниках света с известными характеристиками.

Достоверность третьего и четвертого защищаемых положений подтверждена массовыми испытаниями и статистической обработкой результатов в условиях мелкосерийного производства АО НИИПП.

### **Научная новизна защищаемых положений**

Научная новизна первого защищаемого положения состоит в разработке метода бесконтактного измерения температуры кристалла и люминофорного покрытия, как отдельных изделий, так и изделий в составе устройств и комплексов в процессе их эксплуатации и ускоренных испытаний.

Научная новизна второго защищаемого положения состоит в выявлении особенностей тепловыделения в полупроводниковых источниках света. Таким образом, показано, что тепловое сопротивление полупроводникового источника света не является величиной постоянной, а зависит от плотности тока, температуры корпуса и времени испытаний.

Также установлено, что 10-15% потребляемой источником света мощности выделяется в виде тепла в люминофорном покрытии.

Научная новизна третьего защищаемого положения состоит в факте определения кажущейся энергии активации деградации источников света на основе наногетероструктур InGaN, которая для источников света КИПД154А92 составила 0,6-0,65 эВ, а для КИПД154Г92 - 0,7-0,73 эВ, двумя взаимодополняющими друг друга способами. И установлено, что значения кажущейся энергии активации определенные из результатов ступенчатых температурных испытаний ниже на 12-17%, чем определенные из результатов электрических испытаний.

Научная новизна четвертого защищаемого положения заключается в установлении зависимости температуры кристалла источника света и коэффициента ускорения от времени испытаний.

### **Научная ценность.**

Новые результаты, полученные при выполнении работы, позволяют углубить знания о процессах тепловыделения в полупроводниковых источниках света на основе наногетероструктур InGaN с люминофорным покрытием и выявить закономерности изменения их характеристик, как в процессе эксплуатации, так и в процессе ускоренных испытаний. Развитый в работе подход к анализу результатов ускоренных испытаний источников света при повышенных температурах позволяет произвести корректную оценку срока службы изделий и выявить наиболее перспективные пути повышения их ресурса работы.

### **Практическая значимость работы.**

Предложенные бесконтактные методы измерения температуры кристалла могут быть использованы в производстве и эксплуатации полупроводниковых светодиодов и оптоэлектронных устройств на их основе. Предложенная методика ускоренных испытаний рекомендована к использованию при разработке и производстве полупроводниковых светоизлучающих диодов. По результатам испытаний определен медианный срок службы светодиодов КИПД154Г92, по пессимистическому прогнозу составляющий порядка 300 000 часов.

### **Реализация результатов работы.**

Результаты работы использованы в ТУСУР и АО НИИПП при выполнении х/д 37/10 по постановлению правительства РФ №218. Созданный в процессе работы макет установки для измерения температуры источников света используется в ТУСУР при выполнении учебных заданий по групповому проектному образованию студентами специальности «Микро- и наноэлектроника». Совместно с АО НИИПП обсуждается возможность изготовления разработанной установки для контроля качества светодиодов в условиях серийного производства.

**Личный вклад автора состоит** в постановке задач исследования, в планирование экспериментов, в анализе результатов экспериментов и испытаний, формулировке выводов и основных положений. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии. В проведении исследований и написании статей участвовали сотрудники ТУСУР: кандидаты технических наук Саврук Е.В. и Солдаткин В.С., аспирант Романова М.А., а так же инженер-технолог АО НИИПП Гарипов И.Ф. Общее руководство работой осуществлялось профессором, доктором технических наук Смирновым С.В.

### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной научно - практической интернет - конференции «Инновационные технологии обучения физико-математическим дисциплинам». - Мозырь, Беларусь, 2011; Всероссийской научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». - Томск: 2010, 2011; Международной научной конференции «Колмогоровские чтения». - Секция «Физика» - Москва, 2007; XI всероссийской конференции студентов и аспирантов «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2010; XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2011; IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». - Томск, 2011; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» - Томск, 2012 и 2014 годы.

### **Публикации.**

Результаты диссертационной работы изложены в 6 статьях в рецензируемых изданиях, из которых 5 опубликованы в журналах рекомендованных ВАК. Получено 2 патента на изобретение и один патент на полезную модель.

**Объём и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 145 страницах машинописного текста, иллюстрируется 72 рисунками и 15 таблицами, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 111 наименований и приложений.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана оценка актуальности работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены сведения о научной новизне, практической и научной ценности полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния полупроводниковых светодиодов и исследованию их надежности. Рассмотрены процессы выделения и отвода тепла от полупроводникового кристалла. Приведены основные принципы ускоренных испытаний на долговечность и безотказность. Описаны основные физико-химические процессы, приводящие к деградации параметров полупроводниковых источников света, показана определяющая роль температуры в этих процессах. Приведен



критический обзор наиболее распространенных методов измерения температуры кристалла. В заключительной части сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** дана характеристика объектов исследования - полупроводниковых светодиодов КИПД 154А92 и КИПД154Г92 в пластмассовом корпусе 5050, производства АО НИИПП (Томск). Основные характеристики светодиодов:

- максимально допустимый постоянный прямой ток 500 мА;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение 5 В;
- световой поток 60-150 лм;
- максимально допустимый импульсный прямой ток (при  $f = 1$  кГц ,  $Q = 10$ ) 700 мА;
- повышенная рабочая температура корпуса +85 °С;
- наработка до отказа 50000 ч.

Приведены основные, используемые в работе, методы и оборудование измерения электрических и светотехнических характеристик источников света. Приведено краткое описание оригинальных, специально, для светодиодной тематики, разработанных в ТУСУР приборов для автоматических измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик типа «Метроном» и установки измерения теплового сопротивления типа «УТС». Описаны основные методы исследования и испытаний, используемые для анализа процессов деградации полупроводниковых источников света в процессе ускоренных испытаний. Приведены характеристики используемого в данной работе испытательного оборудования.

**В третьей главе** приведены теоретические и экспериментальные результаты исследования тепловых режимов полупроводниковых источников света. Используя решение стационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями 2-го рода, получены выражения для расчета теплового сопротивления кристалла светодиода в пластмассовом корпусе типа 5050 (рис.1) (тепловая модель для расчета представлена на рис.2).



Рисунок 1- Светодиоды типа КИПД154А92, КИПД154Г92 в корпусе 5050

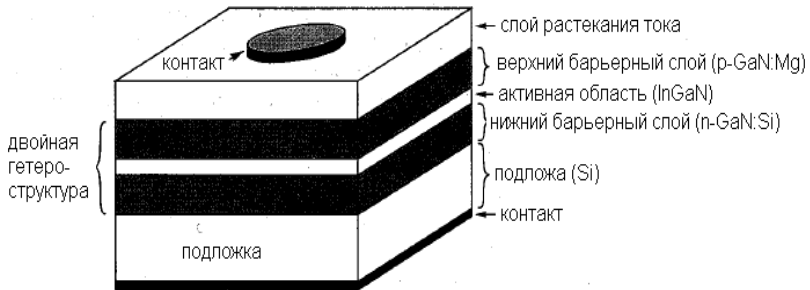


Рисунок 2 - Схема модели кристалла для теплового расчета

В объеме кристалла, высотой  $h$  и теплопроводностью  $\lambda$  в области омического контакта имеющего вид круга радиусом  $r_0$  (50мкм) происходит выделение тепла с плотностью мощности излучения  $q_0$ . Если пренебречь конвективным теплоотводом с поверхности кристалла, и учитывать только теплоотвод через основание корпуса, то математически установившееся температурное поле в момент времени  $\tau$  в кристалле будет описываться уравнением теплопроводности Лапласа [5].

Теоретический расчет позволяет оценить тепловое сопротивление и соответственно температуру кристалла. При рабочем токе 350 мА тепловое сопротивление кристалла будет равно 17 °С/Вт. Для практических расчетов возможно использовать выражение вида:

$$R_T \approx \frac{1}{2\pi\lambda r_0} \arctan\left(\frac{2h}{r_0}\right); \quad (1)$$

Расчет по этой формуле дает несколько большую величину теплового сопротивления равную 21 °С/Вт.

Суммарное тепловое сопротивление составило 36,2 °С/Вт. Температура активной области кристалла, с учетом мощности излучения, светодиода при испытаниях при нормальных условиях +25 °С и при прямом токе 60 мА составит 37 °С, а при токе 350 мА - 86°С. На рисунке 3 представлена расчетная зависимость температуры кристалла светодиода КИПД154 в зависимости от прямого тока.

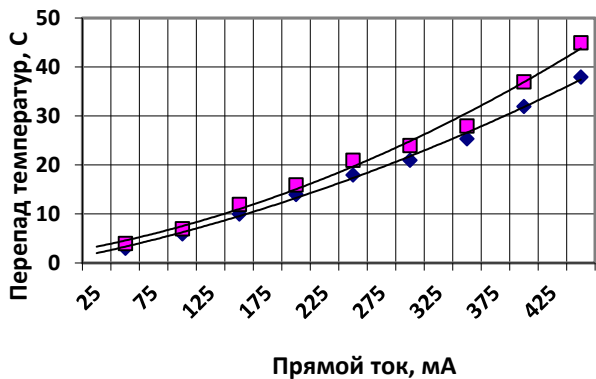


Рисунок 3 - Расчетная зависимость перепада температуры кристалл-корпус светодиода КИПД154А92 в зависимости от прямого тока при температуре корпуса +25°C (нижний график) и +85°C (верхний график)

На рисунке 4 представлены полученные результаты измерения теплового сопротивления, из которых следует, что тепловое сопротивление источника света не постоянная величина, а является функцией прямого тока. Это связано, как с уменьшением квантовой эффективности источника, так и с локализацией плотности тока в кристалле.

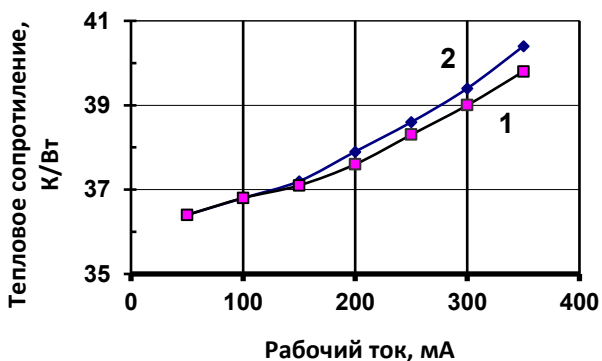


Рисунок 4 - Зависимость теплового сопротивления источников света от величины прямого тока

Для исследования теплового сопротивления была использована установка «УТС», в которой, для измерения температуры р-п перехода, в качестве термочувствительного параметра использовано прямое падение напряжения, а выделяющаяся в кристалле тепловая мощность определялась как разность между потребляемой электрической мощностью и полной мощностью излучения (рисунок 5).

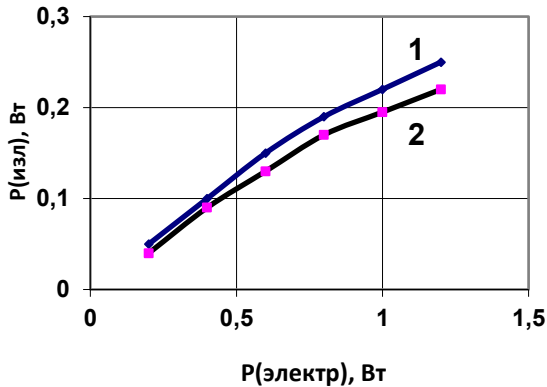


Рисунок 5 - Зависимость мощности излучения КИПД 154А от подаваемой электрической мощности. 1- мощность излучения без люминофора; 2- мощность излучения с люминофором

Так как мощность излучения источника, при фиксированном значении прямого тока, зависит от температуры корпуса и времени эксплуатации или испытаниях, то и температура р-п перехода кристалла также зависит от этих параметров. Поэтому возникает необходимость её контроля, как в процессе испытаний, так и в процессе эксплуатации. При этом следует принимать во внимание, что источник света может находиться в испытательной камере или в составе светотехнического устройства. Для этой цели был разработан способ и устройство бесконтактного измерения температуры, основанный на анализе спектра излучения источника. Известно, что форма и интенсивность спектра сильно зависит от температуры [2]. В данной работе измерение температуры осуществлялось путем регистрации ширины линии излучения на уровне 0,5 от максимального значения при рабочем токе, с последующим сравнением значения этой ширины, со значением, полученным в импульсном режиме при длительности импульсов не более 1 мкс и частотой следования 1 кГц. Использование волоконной оптики и волоконных спектрометров высокого разрешения, позволило

осуществлять измерения температуры источников света в труднодоступных местах, например, в испытательной камере, с погрешностью порядка  $\pm 3\text{K}$ . На рисунке 6 представлены результаты измерений. На рисунке 7 представлены зависимости температуры кристалла и люминофорного покрытия источника света от температуры корпуса.

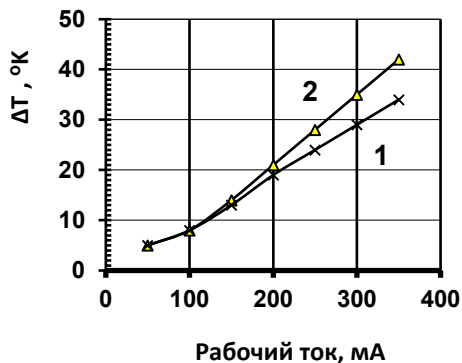


Рисунок 6 - Зависимость перепада температур  $\Delta T$  активная область кристалла-окружающая среда от рабочего тока. 1- SemiLed ; 2- КИПД 154A92. ( $T_{cp}=21^{\circ}\text{C}$ )

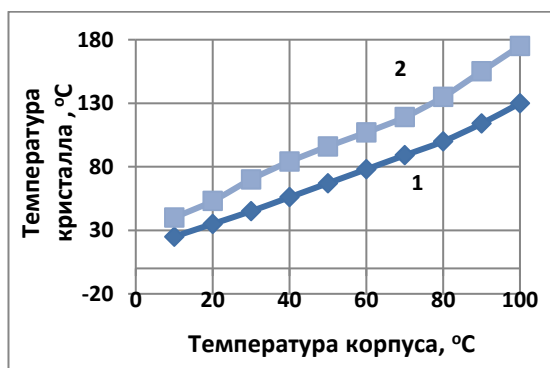


Рисунок 7 - Зависимость температуры кристалла и люминофора от температуры корпуса

С помощью разработанного метода были проведены исследования теплового режима люминофорных покрытий. Известно, что люминофорные покрытия поглощают часть излучения исходящего

из кристалла, а так как условия отвода тепла не являются эффективными, в результате чего происходит дополнительный их разогрев. Люминофорное покрытие имеет температуру на 10-15 °С выше, чем температура кристалла. При повышении температуры испытаний до 85 °С разность температур уменьшается, что может быть связано, как с уменьшением мощности излучения кристалла, так и с увеличением теплопроводности материала покрытия. Распределение температуры по толщине покрытия подчиняется параболическому закону, при этом максимальная температура достигается на поверхности:

$$\frac{T_{\max}}{T_1} = 1 + \frac{\alpha a_1^2 I_0 \exp(-\alpha L) L^3}{2\lambda_2 T_1} \quad (2)$$

Где  $\alpha$  - коэффициент поглощения;  $\lambda_2$  - теплопроводность люминофорного покрытия,  $I_0$  – световой поток;  $a_1$ - радиус (характерный размер люминофорного покрытия).

**Четвертая глава** посвящена анализу теплового режима полупроводниковых источников света в процессах испытаний на надежность и долговечность. В настоящее время для прогнозирования долговечности изделий полупроводниковой электроники остается практически единственный способ – проведение ускоренных испытаний в условиях более высоких тепловых и электрических нагрузок. Процесс старения ускоряется, а деградация параметров происходит так же, как и в обычном режиме работы, затем полученные результаты экстраполируют на нормальные условия эксплуатации. Это позволяет за относительно короткий срок изучить период «старения» изделия через взаимосвязь механизмов отказов с временем их проявления. В данной работе ускоренные испытания полупроводниковых источников света проводились в соответствии с ОСТ 11-336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. Определение кажущейся энергии активации проводилось по результатам ступенчатых испытаний двумя методами:

- 1) при ступенчатом увеличении температуры;
- 2) при ступенчатом увеличении тока.

Отличительной особенностью данных методов, от стандартных, являлось то, что на каждой ступени испытаний контролировалась температура активной области кристалла источника света, разработанным методом. В качестве чувствительного к деградации параметра выбраны величина светового потока и величина прямого тока, кроме этих параметров контролировались так же, цветовая температура и величина обратного тока.

На рисунке 8 представлен внешний вид устройств для крепления светодиодов при ускоренных испытаниях, представляющих собой кольца из плакированного алюминия, которые, в свою очередь, помещаются в термокамеру. Электропитание подводится индивидуально к каждому изделию, а температура колец контролируется термопарами. На рисунке так же показан сегмент кольца с распаянными на нем испытываемыми источниками света.

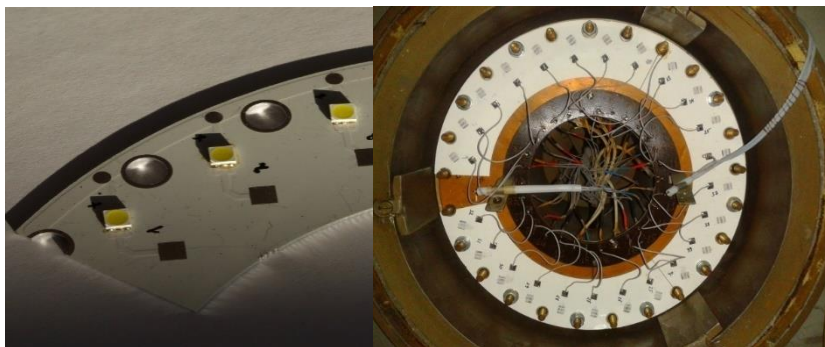
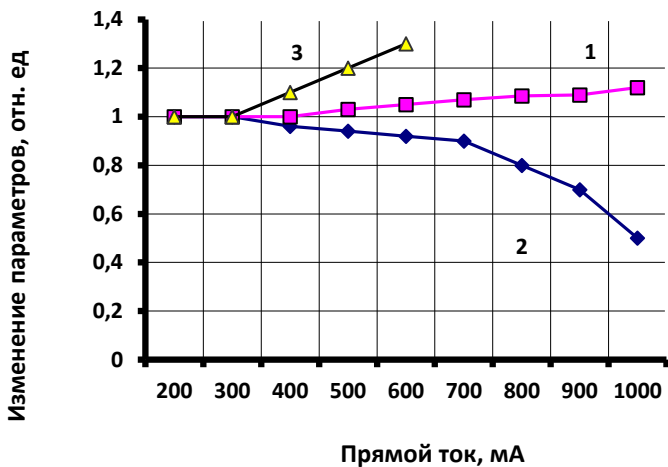


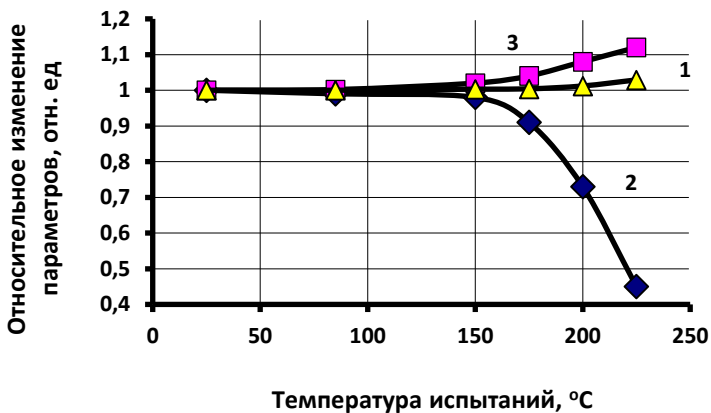
Рисунок 8 - Внешний вид устройств для ускоренных испытаний при повышенной температуре

На рисунках 9 представлены результаты ступенчатых испытаний: а) при ступенчатом увеличении тока со временем выдержки на каждой ступени 24 часа и последующим контролем основных параметров; б) при ступенчатом увеличении температуры со временем выдержки на каждой ступени 24 часа.

Результаты усреднены по партии по 20 шт.



a)



б)

Рисунок 9 - а) Изменение параметров источника света при ступенчатых токовых испытаниях при температуре корпуса +85 °С. б) Изменение параметров полупроводникового источника света при ступенчатых температурных испытаниях при прямом токе 350 мА; где 1 – прямое напряжение, 2 – световой поток, 3 – цветовая температура



Результаты измерений кажущейся энергии активации деградации основных параметров источников света КИПД 154А, по результатам ступенчатых испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений кажущейся энергии активации деградации.

№ п/п	Параметр	Кажущаяся энергия деградации, эВ	
		Электрическая нагрузка	Тепловая нагрузка
1	Световой поток	0,7-0,73	0,6-0,65
2	Прямое напряжение	1,1-1,3	1-1,1
3	Обратный ток, при $U_{обр}=30В$	0,1-0,12	0,12-0,14
4	Цветовая температура	1,3-1,5	1,2-1,4

Таким образом, при учете общего снижения внешнего квантового выхода при температуре испытаний происходит увеличение выделяемой тепловой мощности, следовательно, реальная температура кристалла при испытаниях при повышенной температуре существенно выше, чем расчетная. Температура кристалла и люминофора увеличивается также и со временем ускоренных испытаний. Чем дольше время испытаний и выше коэффициент ускорения - тем выше температура. Если аппроксимировать уменьшение светового потока светодиода в процессе испытаний экспоненциальной зависимостью, то повышение температуры кристалла в процессе испытаний можно представить в виде:

$$T(t) = T(t = 0)\exp(\alpha t) \quad (3)$$

где  $\alpha = \left(\frac{1}{t}\right) \ln\left(\frac{T(t)}{T(t=0)}\right)$  температурный коэффициент;  $T(t)$  –, текущее значение температуры  $T(t=0)$  – температура в начале испытаний;  $t$ – время испытаний.

На рисунке 10 представлено относительное изменение параметров источника света КИПД154А92 при ускоренных испытаниях в процессе испытаний при токе 350 мА и температуре корпуса 85°С.

Результаты усреднены по партии по 45шт.

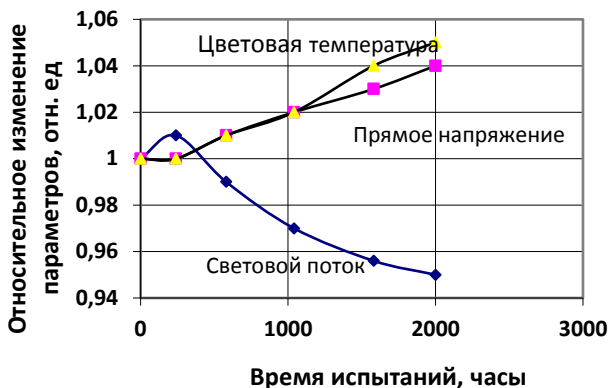


Рисунок 10 - Изменение параметров источника света КИПД154А92 при ускоренных испытаниях в процессе испытаний при токе 350 мА и температуре корпуса 85°C

Таким образом, реальный коэффициент ускорения при испытаниях значительно выше расчетного. Это обусловлено несколькими причинами, основной из которых является увеличение температуры нагрева р-п перехода, связанное с уменьшением в процессе испытаний внутренней и внешней квантовой эффективности и увеличением, за счет этого, выделяющегося в кристалле тепла. Изменение коэффициента ускорения в процессе испытаний может быть описано соотношением Аррениуса с учетом выражения для температуры кристалла и имеет вид:

$$K(t) = K(t = 0) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT(t=0) \exp(\alpha t)}\right); \quad (4)$$

где  $K(t)$ - коэффициент ускорения;  $k$  - постоянная Больцмана;  $\Delta E$ - кажущаяся энергия активации процесса деградации источника света.

Основываясь на результатах измерения температуры кристалла полупроводниковых источников света типа КИПД154А до и после испытаний, возможно сделать следующие выводы:

- 1) при ускоренных испытаниях на надежность при температуре 85 °С в течении 1500 часов наблюдается превышение температуры кристалла по сравнению с начальной температурой на 5-7 °С, при этом коэффициент ускорения увеличивается в 1,6 раза;
- 2) при ускоренных испытаниях на долговечность до достижения падения светового потока на 30% от начального, температура

кристалла в конце срока испытаний повышается на 12-15 °С, по сравнению с начальной температурой.

Одновременно со снижением светового потока при испытаниях наблюдалось увеличение цветовой температуры источников света на 15-20%, что связано, на наш взгляд, с деградационными процессами в люминофорном покрытии. Эти изменения легко фиксируются с помощью оптического микроскопа на изделиях, прошедших испытания со ступенчато-возрастающей нагрузкой. В процессе испытаний нарушается однородность распределения люминофора в компаунде. Причем характер распределения зависит от положения кристалла и люминофора в процессе испытаний, при вертикальном расположении люминофор смещается вниз, к одной из сторон корпуса. (рисунок 11).

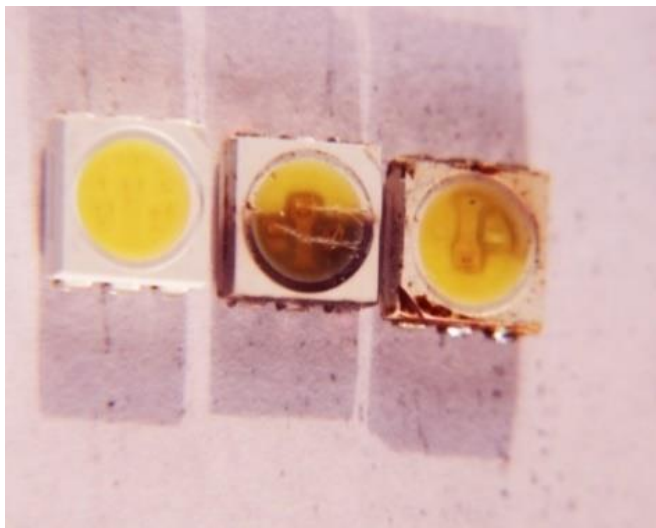


Рисунок 11 - Внешний вид полупроводниковых светодиодов до и после испытаний

В таблице 2 приведена статистика отказов полупроводниковых источников света типа КИПД-154А92 при ускоренных испытаниях, проводимых в 2011-2015 годах.

Таблица 2. Виды отказов полупроводниковых источников света.

№ п/п	Вид отказа	Доля отказов, %	Энергия активации, эВ
1	Снижение светового потока на 30%	71	0,65-0,75
2	Увеличение прямого напряжения	15	0,8-1,1
3	Обрыв	4	0,35
4	Короткое замыкание	7	0,3
5	Увеличение цветовой температуры	3	1-1,2

В заключении главы 4 рассмотрена возможность прогнозирования долговечности полупроводниковых источников света на основании результатов ускоренных испытаний за фиксированное время 2000 часов, с использованием концепции IESTM-21-11 [4]. Показано, что средний срок службы светодиодов КИПД154А92 по пессимистическому прогнозу составляет порядка 300 000 часов. А также сформулировано направление дальнейших исследований. Целью таких исследований является изучение физико-химических механизмов и закономерностей процессов деградации полупроводниковых источников света в процессе эксплуатации и испытаний. И наиболее важным результатом этих исследований должна быть разработка математических моделей деградации, с учетом всех составляющих кажущейся энергии активации процесса деградаций.

#### **Основные выводы по работе**

1. Проведенный теоретический и экспериментальный анализ теплового режима полупроводниковых светодиодов КИПД154А92 и КИПД154Г92 в корпусе типа 5050 показал, что:

- тепловое сопротивление не является величиной постоянной, а зависит как от плотности тока, так и от температуры корпуса;
- спектр излучения кристалла и люминофора (интенсивность, длина волны и ширина спектра) обладает высокой чувствительностью к изменению температуры кристалла и может быть использован для её бесконтактного контроля, как в процессе эксплуатации источников света, так и при их ускоренных испытаниях;
- максимум температуры в полупроводниковом светодиоде находится на поверхности люминофорного покрытия, который на 10-15 °С превышает температуру кристалла;

- в процессе испытаний, при постоянной температуре корпуса, температура кристалла растет со временем за счет уменьшения величины светового потока и увеличения доли выделяющейся тепловой мощности.

2. Методами ступенчатых испытаний при повышенных температурах и повышенных токах определены кажущиеся энергии активации процессов деградации светового потока, прямого напряжения, обратного тока и цветовой температуры. Показано, что полученные значения энергии активации при ступенчатых электрических испытаниях выше, чем при температурных ступенчатых испытаниях и имеют величину 0,7-0,73 эВ и 0,6-0,65 эВ соответственно.

3. Установлено, что при ускоренных испытаниях при фиксированной температуре корпуса +85 и прямом токе 350 мА, коэффициент ускорения увеличивается в процессе испытаний в 1,5-1,7 раза через 1000 часов.

4. Показано, что по результатам ускоренных испытаний светодиодов при температуре корпуса +85 °С в течении 2000 часов, с использованием рекомендаций ТК-21, возможно определить средний срок службы, который составляет порядка 300 000 часов.

**Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:**

1. Гончарова Ю.С. Просветляющие и отражающие наноразмерные покрытия для полупроводниковых источников света// Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники». 2010 №2(22). С.203-205.

2. Гончарова Ю.С., Саврук Е.В., Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов// Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники , 2011 №2-2(24). С.55-58

3. Дохтуров В.В., Саврук Е.В., Смирнов С.В., Гончарова Ю.С. Тепловой режим светодиодных сигнальных ламп// Электроника и электрооборудование транспорта. №5, 2012, С. 37-39

4. Дохтуров В.В., Смирнов С.В., Гончарова Ю.С. Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света// Полупроводниковая светотехника 2013, №3, С. 18-19

5. Гончарова Ю.С., Гарипов И.Ф., Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на

долговечность//Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», 2013 №2, С. 51-53

6. Гончарова Ю.С., Романова М.А., Смирнов С.В. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света//Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2015, №2(36), С.38-40.

#### **Патенты**

1. Гончарова Ю.С., Саврук Е.В., Смирнов С.В. Способ изготовления полупроводникового источника света// патент РФ на изобретение №

2. Гончарова Ю.С., Саврук Е.В., Смирнов С.В. Устройство для измерения температуры полупроводниковых источников света в осветительных устройствах// Патент РФ на полезную модель, № 116693.

3. Гончарова Ю.С., Саврук Е.В., Смирнов С.В. Пат. 2538070 РФ, МПК G01 R31/265 G01 K 7/00 Способ бесконтактного определения неравномерности температурного поля в полупроводниковых источниках света; заявл. 18.07.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1

#### **Список цитируемой литературы.**

1. Берг Ф. Светодиоды // Берг Ф. Дин П. / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича, М.:Мир, 1979. – 686 с.

2. Шуберт Ф. Светодиоды // Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича - 2-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.

3. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды-М.: Энергоатомиздат, 1983, - 210 с.

4. IES TM-21-11: “Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources”

5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.