

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

На правах рукописи



Гончарова Юлия Сергеевна

Тепловой режим полупроводниковых источников света при ускоренных
испытаниях на надежность и долговечность

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Д.т.н., профессор,

Смирнов Серафим Всеволодович

Томск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА.....	13
1.1 Люминофоры для полупроводниковых источников белого света	22
1.2 Процессы выделения и отвода тепла в полупроводниковых источниках света	25
1.3 Методы измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света	32
1.4 Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на надежность и долговечность	36
1.5 Основные виды отказов полупроводниковых источников света, возникающие в процессах эксплуатации и испытаний.....	44
1.5.1 Деградация активной области светодиодов	46
1.5.2 Деградация электродов	48
1.5.3 Тепловая деградация	49
1.5.4 Электростатический разряд и электрическая перегрузка.....	49
1.5.5 Термическая усталость и короткое замыкание.....	50
1.6 Выводы.....	51
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ	52
2.1 Полупроводниковые источники света типа КИПД 154А92,КИПД154Г92 ...	52
2.2 Используемые методы исследования электрических и фотометрических параметров и режимов работы полупроводниковых источников света.....	56
2.2.1 Методы измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик	56
2.2.2 Измерение теплового сопротивления полупроводниковых источников света	58
2.2.3 Методика измерения спектральных характеристик.....	62

2.2.4	Измерение мощности и внешнего квантового выхода излучения	63
2.2.5	Гонио-фотометрический метод измерения величины светового потока, диаграммы направленности и координат цветности	65
2.3	Оборудование для испытаний на надежность и долговечность	67
2.4	Методы испытаний на надежность и долговечность	69
2.4.1	Рекомендации по проведению испытаний	69
2.4.2	Методы анализа отказов полупроводниковых источников света после ускоренных испытаний	70
2.5	Выводы	71
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА		72
3.1	Расчет теплового сопротивления источника света	73
3.2	Измерение теплового сопротивления полупроводниковых источников света КИПД154А92в корпусах типа 5050-1,2	79
3.3	Измерение температуры перехода по длине волны максимума спектра излучения и полуширине спектра излучения	85
3.4	Спектры излучения люминофоров	92
3.5	Гранулометрический состав люминофоров	97
3.6	Тепловой режим люминофорного покрытия	100
3.7	Выводы	104
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА		105
4.1	Определение кажущейся энергии активации по результатам электротермотренировки при ступенчато возрастающей нагрузке	105
4.2	Ускоренные испытания полупроводниковых источников света	114
4.3	Характерные виды отказов полупроводниковых источников света типа КИПД154А при ускоренных испытаниях	122
4.4	Прогноз долговечности полупроводниковых источников света на основе результатов ускоренных испытаний в течении 1000 – 2000 часов	129

4.5	Выводы	132
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Полупроводниковые источники света – оптические приборы, преобразующие электрическую энергию в немонахроматическое 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., Шуберт Ф., Коган Л.[1-3]

В последнее время наибольшее внимание привлекают полупроводниковые источники белого света на основе кристаллов из гетероструктур GaN-GaInN, покрытых люминофором. Значения их световой отдачи достигли значений порядка 130 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 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 выявить основные тепловые процессы и области тепловыделения и точно определить параметры:

- температура корпуса, температура активной области кристалла и температура люминофора при испытаниях;
- кажущаяся энергия активации процесса деградации;

- коэффициент ускорения при предельно-допустимых температурах и плотностях тока.

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

1. определение предельных рабочих характеристик полупроводниковых источников света;
2. разработка методов измерения температуры кристаллов источников света в процессе эксплуатации и испытаний;
3. 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

1. исследовать процессы выделения тепла в элементах источника света;
2. исследовать влияние температуры кристалла на основные электрические и фотометрические характеристики;

3. разработать методы измерения температуры кристаллов в процессе испытаний, с погрешностью не более чем $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
4. установить взаимосвязи между температурой, временем испытаний и процессами деградации параметров источника света;
5. разработать методики ускоренных испытаний полупроводниковых источников света, при выборе в качестве ускоряющих факторов тока и температуры;
6. 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 корпусах типа 5050-1 и 5050-2. По своим электрическим и колориметрическим параметрам они являются типичными представителями изделий выпускаемых, как отечественными, так и зарубежными предприятиями. Поэтому результаты проведенных исследований на этих источниках света могут быть распространены и на другие подобные изделия.

Методы исследования

Для решения поставленных задач были применены следующие методы и оборудование:

- для исследования колориметрических 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 Е7-21 (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 спектра 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, температура кристалла увеличивается со временем по экспоненциальному закону $T(t) = T(t=0)\exp(\alpha t)$, где α - 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 результатов, 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, отдельных изделий, а также 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 определении 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 источников света и электронных устройств на их основе. Разработанная методика ускоренных испытаний рекомендована к использованию при разработке и производстве полупроводниковых светоизлучающих диодов. По результатам испытаний определен медианный срок службы полупроводниковых источников света КИПД154Г92, по пессимистическому прогнозу он составляет 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 «Электроника и нанoeлектроника». Совместно с АО НИИПП обсуждается возможность изготовления разработанной установки для контроля качества изделий в условиях серийного производства.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, в планировании 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:

- Международная научно-практическая интернет-конференция «Инновационные технологии обучения физико-математическим дисциплинам». - Мозырь, Беларусь, 2011;
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». –Томск, 2010;
- Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». –Томск, 2011;
- Международная научной конференции «Колмогоровские чтения». - Москва, 2007;
- XI всероссийская конференция студентов и аспирантов «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2010;
- XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». - Томск. 2011;
- IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». - Томск, 2011;
- Международная научно-практическая 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.

ГЛАВА 1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

В последнее десятилетие полупроводниковые источники света стали чем-то большим, чем просто электронные компоненты. Сохранив свои сигнальные и индикаторные функции, новые сверхяркие полупроводниковые источники света начали заменять обычные лампы накаливания и газоразрядные лампы [1,2,3].

Как известно, 95% электроэнергии, которой питается лампа накаливания, идет на обогрев вольфрамовой нити, и лишь 5% преобразуется в световую энергию. Иными словами, почти вся электрическая мощность, подведенная к спирали, расходуется на то, чтобы производить тепло, а не свет. Обычная лампа накаливания дает от 5 до 20 люмен на 1 ватт потребленной энергии, а полупроводниковые источники – 100 люмен и выше. В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики различных источников света. Можно привести также следующие преимущества полупроводниковых источников:

- высокий ресурс прочности – ударная и вибрационная устойчивость;
- минимальное влияние температуры окружающей среды;
- чистота и разнообразие цветов, (16 миллионов различных цветов);
- направленность излучения;
- регулируемая интенсивность свечения;
- низкое рабочее напряжение, работа во влажных и взрывоопасных условиях;
- экологическая безопасность.

Таблица 1.1 - Сравнительные характеристики источников света [4]

Тип источника излучения	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Световая отдача, лм\Вт	Срок службы, час
Вакуумные и газонаполненные лампы накаливания общего назначения	15-1 000	85-19 500	5-19,5	1 000

Продолжение таблицы 1.1

Тип источника излучения	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Световая отдача, лм\Вт	Срок службы, час
Галогенные лампы накаливания общего назначения	1000-2000	22000-440000	22	2000-3000
Ртутные разрядные люминесцентные лампы	15-80	600-5400	40-65	1000-15000
Ртутные лампы высокого давления	80-2000	3400-120000	40-60	10000-15000
Ртутные лампы сверхвысокого давления	120-1000	4200-53000	35-53	100-800
Металлогалогенные лампы	250-3500	19000-350000	75-100	2000-10000
Натриевые лампы низкого давления	85-140	6000-11000	70-80	20000
Натриевые лампы высокого давления	50-1000	25000-47000	100-115	10000-15000
Ксеноновые лампы	50-10000	35700-2088000	18-40	100-800
Полупроводниковые источники	1-1000	100-100000	120-180	50000

Полупроводниковые источники устойчивы к вибрациям, ударам и другим механическим воздействиям и в случае правильного использования могут

работать на протяжении десятков тысяч часов. В зависимости от состава материала кристалла, они могут излучать свет в различных областях спектра:

- GaAlAs – арсенид галлия алюминия - красная и инфракрасная область спектра;
- GaAsP – фосфид арсенида галлия;
- AlInGaP – фосфид алюминий-индий-галлий -красный, оранжевый и желтый свет;
- GaP – фосфид галлия -зеленый свет;
- SiC – карбид кремния-голубой свет;
- InGaN – нитрид индия-галлия;
- GaN – нитрид галлия - ультрафиолетовая иголубая область;
- AlN – нитрид алюминия - ультрафиолетовая область спектра.

Излучаемый ими свет является монохроматическим, а для получения немонохроматического белого света существуют три способа[1,4]:

1. преобразование части излучения голубого светодиода в желтый с помощью люминофора;
2. преобразование ультрафиолетового излучения светодиода тремя люминофорами в сине-зеленое–красное излучение;
3. аддитивное смешение излучений красного, зеленого и голубого светодиодов (RGB-принцип).

Наибольшее применение нашли полупроводниковые источники света с люминофором.

Типовая конструкция источника представлена на рисунке 1.1. Конструкция состоит из кристалла, корпуса, люминофора и вторичной оптической системой в виде световыводящей линзы из кремнийорганики или эпоксидной смолы [1].

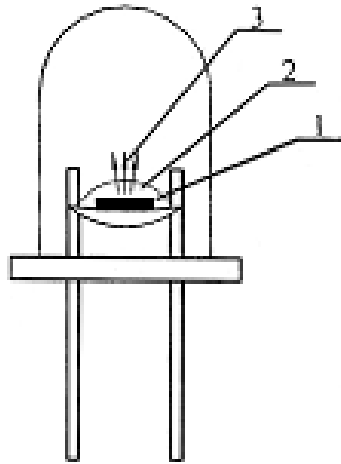


Рисунок 1.1 – Типичная конструкция полупроводникового источника света; 1 – полупроводниковый кристалл, 2 – слой желтого люминофора, 3 – смешанное излучение кристалла и люминофора

Активным элементом полупроводникового источника света является кристалл на основе эпитаксиальной гетероструктуры GaN-GaInN [1-5], примерная конструкция которого приведена на рисунке 1.2.

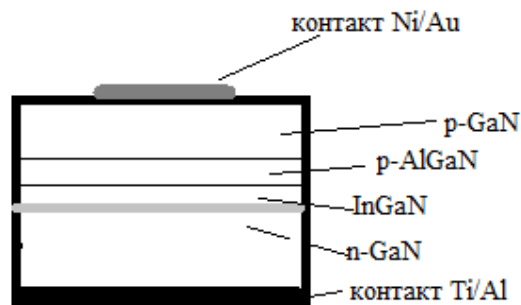


Рисунок 1.2 - Конструкция кристалла на основе гетероструктуры GaN-GaInN с вертикальной геометрией[1]

Принцип действия таких устройств основан на явлении электролюминесценции при протекании тока в структурах с p-n-переходом, и эффективном преобразовании электрической энергии в световую. Когерентное

монохроматическое или спонтанное высвечивание (люминесценцию) в полупроводнике можно получить рядом методов возбуждения (накачки): оптическим возбуждением, воздействием на полупроводник пучком быстрых электронов с высокой энергией, возбуждением полупроводниковых материалов импульсами электрического поля (ударной ионизацией). Наиболее распространенный метод возбуждения рекомбинационного излучения при инжекции носителей через p-n-переход, образованный с помощью гетероструктур представлен на рисунке 1.3 [1,5].

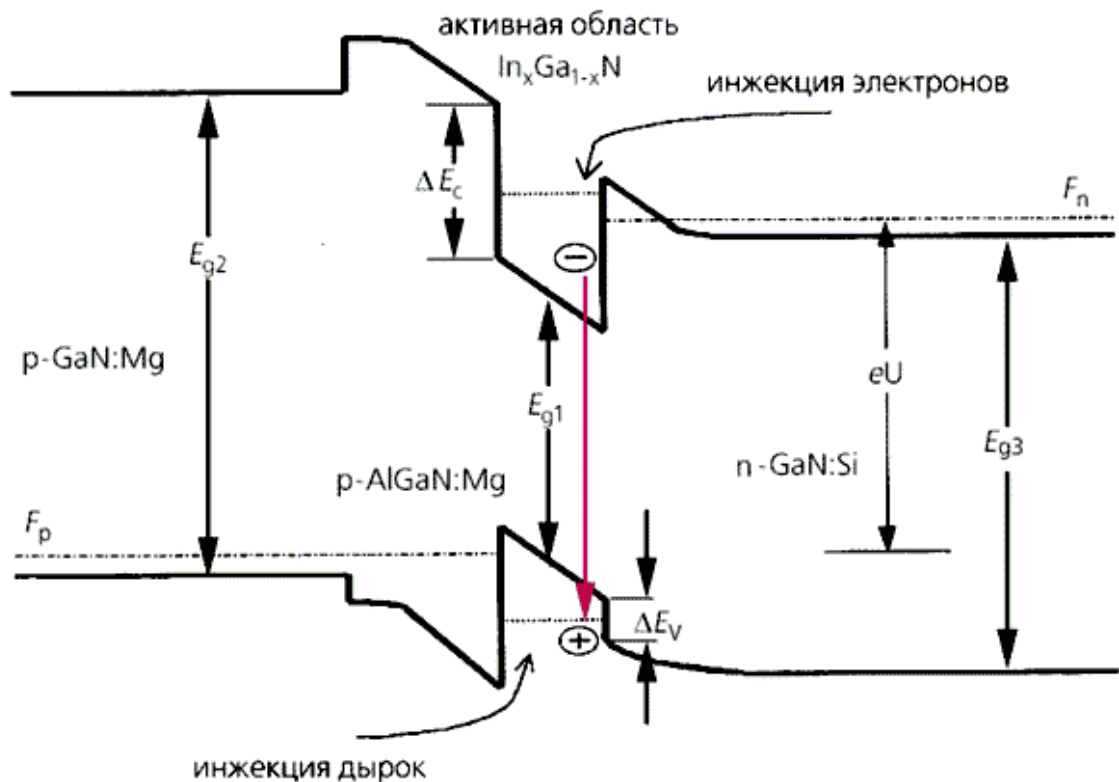


Рисунок 1.3 - Энергетическая диаграмма p-гетероструктуры типа InGaN/AlGaIn/GaN при прямом смещении U

Черными стрелками показана инжекция электронов и дырок в активную область p-n гетероструктуры. Попадая в узкие и достаточно глубокие энергетические ямы, электроны и дырки оказываются запертыми в них. Если активный слой (с узкой запрещенной зоной E_{g1}) содержит малое количество дефектов, электронно-дырочные пары рекомбинируют с излучением кванта E_{g1} . Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры, в которой между

внешними p - и n -областями полупроводника с большими величинами ширины запрещенной зоны E_{g2} , E_{g3} расположен тонкий слой с меньшей шириной E_{g1} . Толщину этого слоя d можно сделать очень малой, порядка сотен или даже десятков атомных слоев. Помимо потенциального барьера обычного p - n перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов ΔE_c и дырок ΔE_v . Если приложить к переходу прямое смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой. Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх - к краю валентной зоны в слое, где минимальны их энергии. Широкозонные внешние части гетероперехода можно сильно легировать с обеих сторон, добиваясь больших концентраций в них равновесных носителей и тогда удастся достичь при инжекции значительных концентраций неравновесных электронно-дырочных пар в слое. Отказ от легирования активной области принципиально важен, поскольку атомы примеси, могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Попав в яму, инжектированные электроны наталкиваются на потенциальный барьер ΔE_c , дырки - на барьер ΔE_v , поэтому и те, и другие перестают диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое с испусканием фотонов [6,7].

В настоящее время надежность и эффективность источников света определяется ключевыми этапами технологии:

- выбором подложки для последующего выращивания гетероструктуры (например, на основе GaN);
- технологией создания гетероэпитаксиальной структуры с множественными квантовыми ямами (AlGaN/ InGaN/ GaN);
- конструкцией и технологией изготовления прибора;
- технологией сборки кристалла в корпус.

В качестве подложек используются монокристаллический GaN, сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC) и кремний (Si). Подложки из GaN и SiC лучше всего подходят для выращивания на них светодиодных структур, так как позволяют получать пленки с плотностью дефектов менее 10^5 см^{-2} , кроме того, эти

подложки достаточно теплопроводны. Однако подложки из GaN и SiC стоят еще очень дорого, хотя уже получены образцы диаметром 3 и 4 дюйма соответственно, что пригодно для развития серийного производства. В настоящее время имеются кремниевые подложки большого диаметра, доступные по цене. Однако, из-за рассогласования кристаллических решеток Si и GaN требуется разработка тонких технологий, что является дорогостоящим процессом. Подложки из сапфира в настоящее время наиболее экономичны и давно применяются в производстве. Они прозрачны для белого света, но обладают плохой теплопроводностью. По этой причине при использовании их в мощных приборах требуется или обратный монтаж кристаллов в корпус или использование технологии, позволяющей отделять сапфировую подложку от гетероструктуры GaN. Технология выращивания эпитаксиальных структур на основе GaN базируется в настоящее время на методе металло - органического осаждения паров (MOCVD). MOCVD является единственной технологией, с помощью которой можно выращивать все, относящееся к структуре, включая: буферные и активные слои GaN, формирующие p- и n- области светодиода, а также множественные квантовые ямы активной области. Основным недостатком этого метода состоит в относительно медленном процессе роста гетероэпитаксиальных структур (технологический цикл составляет 5-10 часов). Для роста более толстых буферных слоев GaN используется процесс гидридного осаждения (HVPE). Процесс HVPE и процесс MOCVD являются взаимодополняющими процессами позволяющими выращивать качественные гетеро-эпитаксиальные слои AlGaIn/ InGaIn/ GaIn на различных перечисленных выше подложках. Важными этапами светодиодной технологии является планарная обработка пластин: ионное легирование для создания изолирующих областей, сухое травление, создание омических контактов к p- и n- областям гетероструктуры, нанесение тонких металлических слоев для контактных выводов, разделение пластины на кристаллы. Основным направлением в развитии конструкции светодиодов и технологии производства кристаллов является повышение энергетики квантового выхода за счет применения совершенных

материалов подложек и кристаллодержателей с очень малым тепловым сопротивлением. Такая необходимость возникла с появлением устойчивой тенденции использования кристаллов при больших плотностях тока (до 200 А/см²). Только такой подход на сегодняшний день позволяет увеличить квантовый выход в несколько раз по сравнению с прежними показателями. Параллельно с увеличением плотности тока развивается интеграция, одним из видов которой является увеличение размеров кристаллов. Это тоже оправдано и, скорее всего, именно такой подход позволяет наряду с развитием теплоотводящих материалов получить конструкции кристаллов и устройств на них с наибольшими энергетическими показателями выхода «люмен/ватт». Поэтому все больше появляется сообщений о том, что в кристалле имеет место определенный оптический выход с определенной площади структуры. Именно с площади, то есть в дальнейшем, с развитием возможности варьировать площади поверхности (размеры) кристалла в широких пределах, можно будет говорить о световом выходе, только зная размер кристалла или количество кристаллов в интегральной матрице. Основными проблемами, тормозящими прогресс в этой области, являются сложности формирования равномерной плотности тока по всей площади большого кристалла, иначе не имеет смысла делать его большим, и по-прежнему отвод тепла остается определяющим в выборе размера. Особо стоит отметить тенденции развития технологий производства белых светодиодов. Используя в качестве источника излучения синий кристалл с центральной длиной волны около 455–460 нм, нанося на него люминофор, преобразуется спектр исходного излучения в белый. Тенденция роста квантового выхода в этой системе может использовать все вышеописанные варианты, а также совершенствование материала люминофора [1,7,8].

Однако, наступит предел размеров кристалла и плотности мощности, с которой может эффективно работать люминофор, и исчерпаются возможности комбинаций состава люминофора. Поэтому создание широкополосной излучающей полупроводниковой структуры становится очень актуальной. Основной вопрос состоит в совершенствовании технологии выращивания

кристаллов вообще, и структур с неким набором зон различной ширины в одной активной области в частности. Конструкция кристаллов одновременно должна решать несколько задач: хороший отвод тепла от р-п - перехода, выгодное, с точки зрения хода оптических лучей расположение граней и распределение излучения внутри кристалла - по всему объему. Выход излучения должен наблюдаться по всей поверхности граней кристалла, площадь верхнего омического контакта, несмотря на маленький размер, не должна влиять на равномерность растекания тока, так как р-п - переход расположен в противоположной стороне от него, а распределение тока формируется толщиной подложки SiC и специальным слоем омического контакта AuSn. Второй контакт занимает всю площадь нижней грани. Поэтому, вся площадь активной области работает при одинаковой плотности тока, и нет локализации излучения, находящейся в зависимости от расположения омического контакта. Линейность люмен-амперной характеристики сохраняется вплоть до плотности тока почти в 200 A/cm^2 [8,9,10,11].

Для более эффективного отвода тепла и снижения температуры перехода существуют три различных подхода[12,13]:

1. уменьшение толщины подложки;
2. технология обратного монтажа (flip-chip);
3. удаление первоначальной подложки, которая используется для роста светодиодных гетероструктур, и затем перемещение эпитаксиальных слоев на электро- и теплопроводное основание.

Технология посадки кристалла способом "flip-chip" удобна для сборки методом поверхностного монтажа на теплоотводящий носитель. Чтобы обеспечить длительную работу мощных светодиодов без существенной деградации, необходимо подобрать светодиодный чип с лучшими свойствами по отводу тепла и разработать соответствующий корпус.

1.1 Люминофоры для полупроводниковых источников белого света

Эффективность источников в значительной мере определяется параметрами люминофорных преобразователей спектров излучения кристаллов. Цветовые характеристики системы кристалл-люминофор определяются четырьмя параметрами[8,11,14]:

1. спектром люминесценции люминофора;
2. длиной волны излучения кристалла;
3. концентрацией порошка люминофора в люминофорной суспензии;
4. толщиной пленки суспензии.

Для источников белого цвета свечения используются люминофоры со структурой граната, активированные церием излучение поглощается непосредственно ионом активатора Ce_3^+ и переизлучается в длинноволновой области спектра, при этом световая эффективность люминофора зависит от многих факторов: пространственного расположения, его толщины, концентрации, состава [8,11,14].

Надежность и эффективность источников белого света сильно зависит от рабочей температуры люминофора, при этом влияние температуры на его свойства не является однозначным. Во-первых, увеличение температуры приводит к снижению квантовой эффективности люминофора (температурному тушению) и как следствие к уменьшению световыхода и увеличению тепловыделения в элементах источника света. Во-вторых, увеличение температуры приводит к увеличению скорости химических реакций в покрытии, и особенно, на контактлюминофор-связующий компаунд, что приводит к образованию новых химических соединений, приводящих к уменьшению прозрачности покрытия и уменьшению светоотдачи. Так как квантовая эффективность преобразования люминофорным покрытием синего света из кристалла в зеленый и красный находится в пределах 70-85%, то часть излучения неизбежно в нем поглощается и превращается в тепло. А так как

теплопроводность материала покрытия мала и не превышает 0,25 Вт/мК, то, выделяющаяся в покрытии тепловая энергия может привести к дополнительному нагреву до температур, значительно превышающих температуру кристалла. Особенно сильно это явление проявляется при удаленном расположении люминофора, когда затруднен теплоотвод через кристалл [1].

В производстве источников света в основном используют высокоэффективные люминофоры на основе иттрий-алюминиевых и иттрий-гадолиниевых гранатов легированных церием. Условная химическая формула: $((Y_{1-a}Gd_a) Al_5O_{12} \times Ce^{3+} (YGG))$. Люминофоры поставляются в виде порошка, с размером частиц 10-15 мкм.

Таблица 1.2- Примерный химический состав люминофора

Химический элемент	% вес	% атомные
Иттрий	45	16
Алюминий	22	27
Церий	4	1
Гадолиний	3	1
Кислород	26	55

Люминофорное покрытие представляет собой взвесь порошка люминофора в кремний-органической связке, в примерном весовом соотношении 1:10, которое в процессе изготовления изделия наносится на поверхность кристалла светодиода.

Толщина слоя люминофора и концентрация люминофора в эпоксидной смоле определяют соотношение интенсивностей двух типов излучения, излучение кристалла (синий свет) и излучение люминофора (красно-зеленый свет), что, в результате их смешения, позволяет оптимизировать такие характеристики светодиода белого света, как световая эффективность и индекс цветопередачи. Для источников белого света важной характеристикой является объемная однородность цвета. Цветность источника белого света не должна зависеть от направления излучения. Для получения однородности цвета необходимо

обеспечить такое распределение люминофора, при котором для всех направлений излучения внутри материала длина оптического пути была бы одинаковой [1].

Объемной однородности цвета можно также добиться введением в состав покрытия минеральных рассеивающих примесей. В качестве таких примесей могут использоваться оптически прозрачные вещества, например TiO_2 , CaF_2 , SiO_2 , CaCO_3 и BaSO_4 , показатель преломления которых отличается от показателя преломления смолы. Назначение минеральных добавок заключается в том, чтобы заставить свет отражаться, преломляться и рассеиваться, уравнивая тем самым вероятность распространения света во всех направлениях, что и обеспечивает объемную однородность цвета[1].

Рассеивание света в объеме и на поверхности люминофоров, а также их фотолюминесценция, вносят дополнительные искажения в наблюдаемые спектры поглощения. Если спектры поглощения и флуоресценции перекрываются и оптическая плотность образца в области перекрывания велика, то наблюдается поглощение света собственной флуоресценции самим флуоресцирующим компонентом - реабсорбция или вторичное поглощение[14]. Эффект реабсорбции, наряду с уменьшением интенсивности флуоресценции, всегда приводит к искажению формы спектров. При этом нарушается зеркальная симметрия спектров поглощения и флуоресценции. Это обусловлено тем, что реабсорбция вызывает искажения формы спектра флуоресценции исключительно в области его перекрывания со спектром поглощения. В результате этих искажений постепенно, с ростом оптической плотности образца в этой области (например, за счет увеличения концентрации флуоресцирующего компонента), исчезает коротковолновая (для многих люминофоров обладающая разрешенной колебательной структурой) часть спектра флуоресценции. Искажения становятся тем больше, чем больше оптическая плотность флуоресцирующего компонента в области перекрывания спектров. В конечном счете, от истинного спектра флуоресценции остается лишь длинноволновый бесструктурный хвост, расположенный практически вне области собственного поглощения флуоресцирующего компонента. Спектральный максимум этого бесструктурного

образования может оказаться на десятки нанометров смещенным относительно положения максимума истинного спектра[15].

Явление реабсорбции обусловлено как люминесцентными свойствами вещества люминофора, так и методическими особенностями измерения флуоресценции. Как уже упоминалось выше, квантовый выход люминесценции всегда меньше единицы и часть поглощенного молекулой света расходуется безызлучательно[12,14]. Подбор требуемой величины оптической плотности возможен за счет уменьшения концентрации люминесцирующей компоненты или же за счет уменьшения толщины слоя [15].

1.2 Процессы выделения и отвода тепла в полупроводниковых источниках света

При работе источника далеко не вся подводимая к нему электрическая энергия расходуется на излучение. Значительная ее часть (60-80%) выделяется в виде тепла. Температура р-п перехода, соответствующая температуре активной области кристаллической решетки, является весьма важным параметром светодиода, т.к. от нее зависит внутренний квантовый выход излучения [1,16], а работа светодиода при повышенных температурах приводит к значительному снижению срока его службы. Кроме того, высокая температура может привести к деформации корпуса прибора. Очевидно, если не принять должных мер по отводу излишнего тепла, светодиод будет работать ненадежно или даже выйдет из строя. Именно поэтому многие производители не решаются на серийный выпуск источников света с рассеиваемой мощностью более 3 Ватт [13,16]. Местами выделения тепла внутри источника являются контакты, внешние слои и активная область. При низких значениях тока нагревом контактов и внешних слоев можно пренебречь ввиду малости мощности, рассеиваемой на их паразитных сопротивлениях. Поэтому при малых токах основным источником тепла является активная область светодиода, нагрев которой происходит в результате безызлучательной рекомбинации [1,17,18]. При повышении тока вклад

сопротивлений контактов и внешних слоев в увеличение температуры диода становится более заметным.

Переход электрона из n- области в p-область вызывает охлаждение n- области. Количество уносимого в одну секунду тепла Q_n – составляет:

$$Q_n \approx 0.24 I_F (\phi k - U_F), \quad (1.1)$$

где I_F – прямой ток через переход; ϕk – контактная разность потенциалов; U_F – прямое падение напряжения на переходе. В области p-n перехода электроны рекомбинируют. Рекомбинация сопровождается выделением энергии:

$$Q_n^+ \approx 0.24 I_F (E_g), \quad (1.2)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны. Часть энергии излучается в виде света $P_{изл}$ и выходит за пределы кристалла, но часть света поглощается в полупроводниковом материале и на контактах. Суммарное количество тепла, выделяющееся в p-n переходе равно:

$$\Delta Q_{тепла} \approx Q_n^+ - Q_n^- - P_{изл} \approx 0.24 (1 - \eta) I_F U_F, \quad (1.3)$$

Температура p-n перехода СД ($T_{пер}$) определяется суммой температуры окружающей среды (T_a) и произведения теплового сопротивления (R_{j-a}) на мощность рассеяния (P_d):

$$T_{пер} = (T_a + (R_{j-a} * P_d)), \quad (1.4)$$

Тепловое сопротивление R_{j-a} состоит из нескольких составляющих, основными из них являются: тепловое сопротивление переход-корпус R_{j-p} (тепловое сопротивление от активной области кристалл до места «пайки» корпуса к радиатору) и теплового сопротивления радиатора R_{h-a} [19]. Типичное расположение светодиода в корпусе К2 на печатной плате показано на рисунке 1.4.

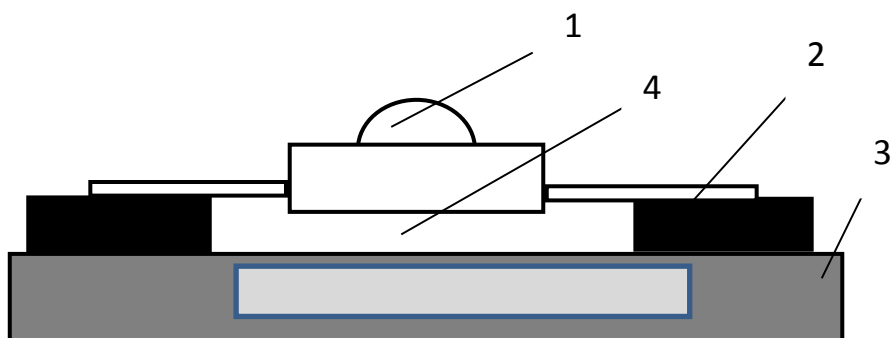


Рисунок 1.4 - Вариант расположения источника света на печатной плате. 1- источник света; 2- контактные площадки; 3- печатная плата; 4-теплопроводящая паста

Для улучшения теплоотвода пространство между корпусом и платой заполняют теплопроводящей пастой.

На рисунке 1.5 представлена по электротепловой аналогии схема отвода тепла от источника света.

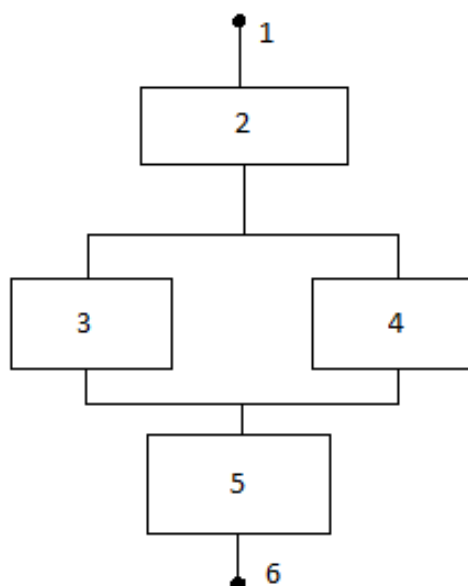


Рисунок 1.5 - Тепловая модель источника. 1 –температура перехода (T_j); 2 – тепловое сопротивление переход-корпус (R_{j-p}); 3, 4 – тепловое сопротивление

корпус-контактное устройство (R_{p-h}); 5 – тепловое сопротивление платы (R_{h-a}); 6 – температура окружающей среды (T_a)

Тепловое сопротивление R_{j-p} является паспортизованной величиной.

Общее тепловое сопротивление состоит из ряда последовательно и параллельно включенных тепловых сопротивлений

$$R_{j-a} = R_{j-p} + 0,5R_{p-h} + R_{h-a}, \quad (1.5)$$

Для более точной оценки теплового сопротивления необходимо учитывать и теплоотвод с поверхности корпуса в окружающую среду.

Выделение электрической мощности в активной области структуры приводит к ее разогреву. Особенностью, усложняющей моделирование, является действие различных механизмов тепловой обратной связи в структурах прибора, которые приводят к изменению исходного распределения источников тепла в структуре. В результате распределения температуры, плотности тока и мощности становятся неоднородными [20] (рисунок 1.6).

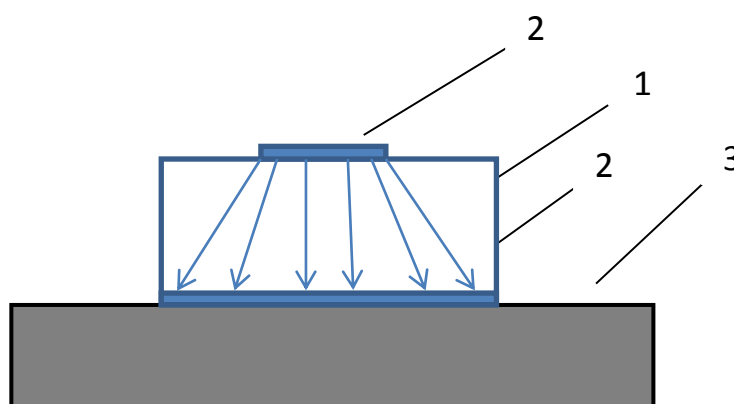


Рисунок 1.6 - Неоднородное распределение плотности тока и тепла в кристалле полупроводникового источника света. 1- кристалл; 2- контактные площадки; 3- теплоотвод

С целью уменьшения степени локализации тока, электрические контакты выполняют в виде гребенки, как это делает фирма OSRAM OptoSemiconductors[4]. Вид такого кристалла представлен на рисунках 1.7 и 1.8.

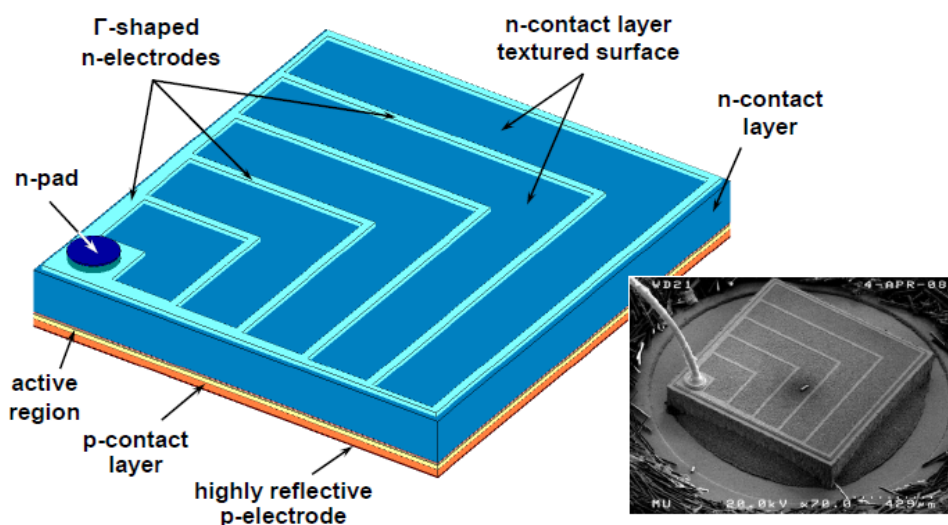


Рисунок 1.7 - Геометрия электрических контактов кристалла (размером 1x1мм)

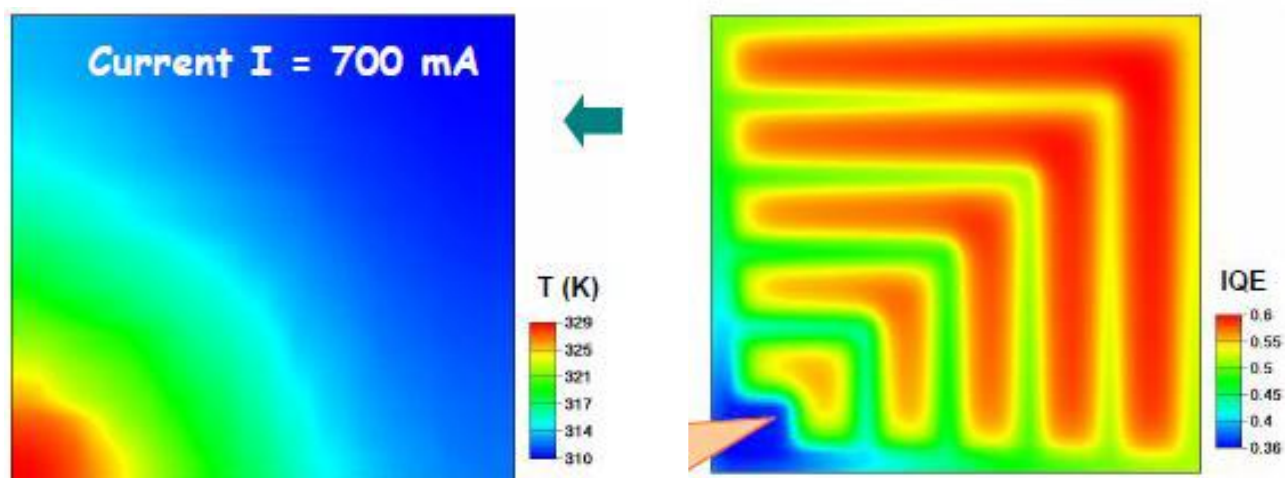


Рисунок 1.8 - Результаты моделирования распределения температуры и плотности тока по площади кристалла [18]

Как следует из результатов моделирования, за счет неоднородного распределения плотности тока в электродной системе возникает избыточный перепад температур по кристаллу, достигающий в данном случае 20К.

Кроме этого, производство и эксплуатация источников света всегда сопровождается появлением макродефектов, то есть отклонений

электрофизических или теплофизических параметров локальной области структуры от номинальных значений больше допустимого уровня. Наличие дефектов приводит к появлению локальных перегревов и перераспределению плотности тока и мощности в структуре [21,22].

С ростом температуры интенсивность излучения полупроводниковых источников света уменьшается. Причинами являются:

- безызлучательная рекомбинация через глубокие примесные уровни;
- рекомбинация на поверхности;
- потеря носителей в барьерных слоях гетероструктур;
- снижение квантовой эффективности люминофора;
- увеличение сопротивления омических контактов.

Стационарная интенсивность люминесценции I_{Φ} связана с температурой соотношением:

$$(I_{\Phi}^{-1}) \sim 1 + \frac{\nu_0}{\nu_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1.6)$$

где ν_0 – частота безызлучательных переходов; ν_1 – частота излучательных переходов; k – постоянная Больцмана.

Температурную зависимость интенсивности излучения описывают следующей зависимостью [1]:

$$I = I|_{300K} \cdot \exp\left(-\frac{T-300}{T_1}\right), \quad (1.7)$$

где T_1 – характеристическая температура кристалла. Предпочтительнее, чтобы характеристическая температура была достаточно высокой, поскольку этому соответствует слабая температурная зависимость.

Светодиоды обладают своими, индивидуальными, зависимостями интенсивности излучения от температуры. На рисунке 1.9 в качестве примера показана зависимость светового потока белого светодиода CreeXLamp XR-E от температуры кристалла при токе 350 мА [23].

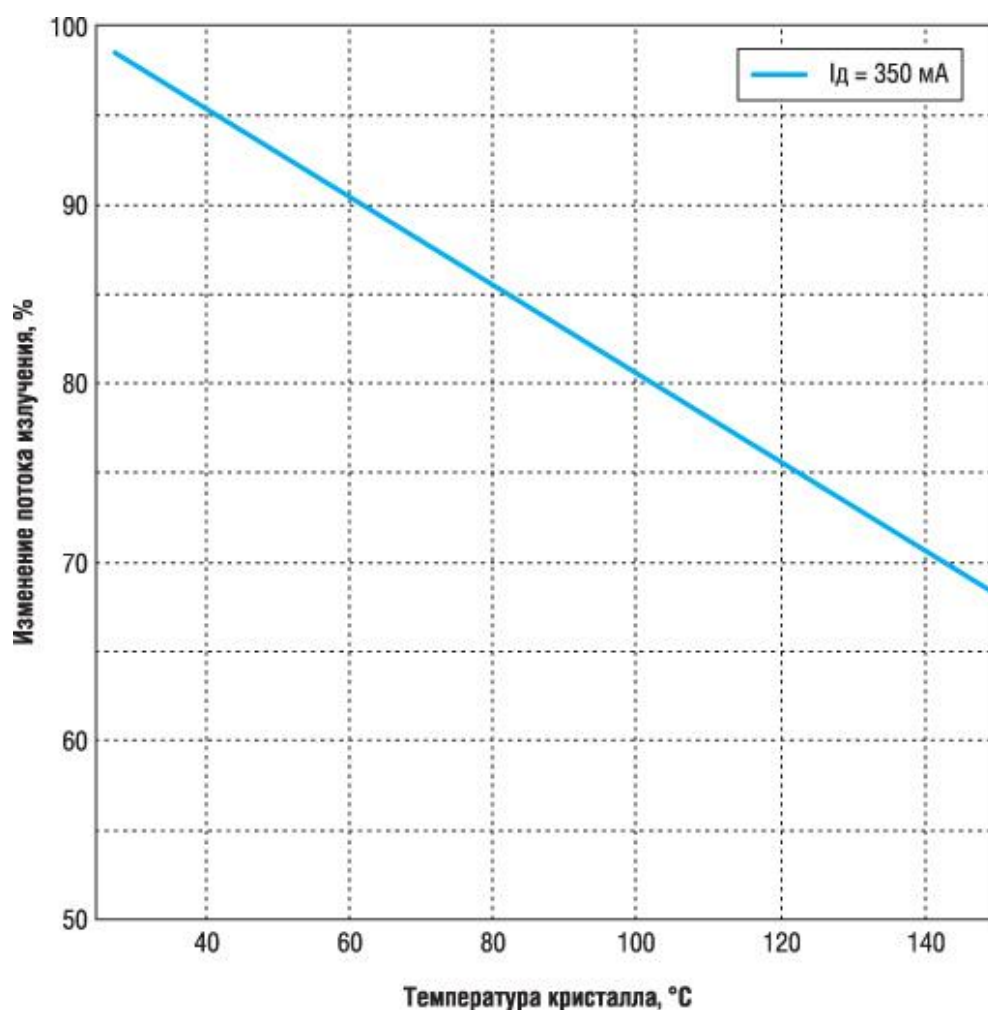


Рисунок 1.9 - Относительное изменение светового потока источника света CreeXLamp XR-E в зависимости от температуры кристалла [23]

Температура р-п перехода ощутимо влияет не только на интенсивность излучения, но и на спектральные характеристики излучения. Так, с ростом температуры наблюдается увеличение длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической яркости [1,24]. Энергия кванта соответствующего максимуму люминесценции $E_{\text{макс}}$, изменяется с температурой и сдвигается при нагревании практически так же, как ширина запрещенной зоны E_g , то есть выполняется соотношение:

$$\frac{dE_{\text{макс}}}{dT} \approx \frac{dE_g}{dT}. \quad (1.8)$$

Это может привести к ощутимому изменению цветовой температуры и индекса цветопередачи [17].

1.3 Методы измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света

Как следует из вышесказанного, важной задачей становится точное измерение рабочей температуры кристалла источника света в области р-пперехода.

Существуют различные методы определения температуры кристаллов[13,25-31]:

- рамановская спектроскопия;
- измерение порогового напряжения;
- измерение коэффициента отражения методом фототермической микроскопии;
- по спектрам электролюминесценции;
- по спектрам фотолюминесценции;
- измерение смещения длины волны пика излучения;
- измерение изменения полуширины максимума спектра излучения;
- измерение сдвига прямого падения напряжения;
- по изменению интенсивности свечения;
- по величине обратного тока;
- измерение величины низкочастотных шумов.

Большинство этих методов косвенные, так как, температура перехода определяется по измеряемым электрическим параметрам. Наибольшее применение нашли методы, основанные на использовании вольт-амперной характеристики р-п перехода [32].

Термочувствительными параметрами для измерения температуры в диодах, являются обратный ток р-п перехода и прямое падение напряжения на р-п переходе. Обратный ток диода состоит из нескольких компонентов: тока утечки, характеризующегося поверхностными энергетическими состояниями и тока, определяемого генерацией и рекомбинацией носителей в области пространственного заряда р-п перехода. Анализируя отдельные составляющие

обратного тока р-п перехода можно прийти к выводу о том, что все они, кроме теплового тока, или малы или слабо зависят от температуры. Поэтому при тех температурах, при которых диоды эксплуатируются, обратный ток представлен в основном тепловым током, который почти не зависит от напряжения, и равен [1,32]:

$$J_s = T^{(3+\frac{\gamma}{2})} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right), \quad (1.9)$$

где γ – постоянная.

Таким образом, J_s зависит от температуры экспоненциально.

Зависимость прямого падения напряжения на р-п переходе от температуры можно получить из выражения для вольт-амперной характеристики р-п перехода

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{eU_f}{n_{ideal} \cdot kT}\right) - 1 \right), \quad (1.10)$$

где J_s – плотность тока насыщения. Для невырожденных полупроводников в режиме прямого смещения $U_f \gg kT/e$ справедливо соотношение [5]:

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal} \cdot kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{J_f}{J_s}\right) \right], \quad (1.11)$$

Плотность тока насыщения зависит от значений коэффициентов диффузии и времени жизни электронов и дырок, эффективной плотности состояний на краях валентной зоны и зоны проводимости, а также от ширины запрещенной зоны. Следует отметить, что все перечисленные параметры зависят от температуры р-п-перехода. Таким образом, зависимость прямого напряжения светодиода от температуры имеет вид [1,5]:

$$\frac{dU_f}{dT} = \frac{eV_f - E_g}{eT} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{e}, \quad (1.12)$$

Правая часть выражения (1.12) отображает температурные зависимости концентрации собственных носителей, ширины запрещенной зоны и эффективной плотности состояний.

С помощью этих зависимостей может быть определен температурный коэффициент напряжения (ТКН), который определяется производной термочувствительного параметра по температуре. Величина ТКН различных типов диодов изменяется в пределах от 1 до 3,5 мВ·К⁻¹ [32].

В общем случае процесс измерения температуры полупроводниковых приборов с использованием термочувствительных параметров состоит из двух последовательных операций: калибровки термочувствительного параметра и измерения термочувствительного параметра в его зависимости от мощности тепловыделения в приборе. Обе эти операции производятся в импульсном режиме, когда измерительный ток подается на прибор в режиме коротких и редких импульсов (с большой скважностью). Последнее необходимо, чтобы измерительный ток не вызывал собой заметного изменения температуры прибора. Калибровка термочувствительного параметра производится в термостате, куда помещается полупроводниковый прибор. Температура всех его элементов одинакова и считается равной температуре термостата. Зависимость термочувствительного параметра от температуры термостата определяется при протекании через полупроводниковый прибор только импульсного измерительного тока. Результаты измерений оформляются в виде калибровочных графиков зависимости термочувствительного параметра от температуры термостатирования. После выполнения калибровки переходят к операции измерения термочувствительного параметра в рабочем режиме. При этом он определяется уже температурой разогрева прибора за счет его собственного тепловыделения. Это дает возможность определять температуру перехода T_j через падение напряжения при помощи выражения [1]:

$$T_j = T_0 + \frac{U_T - U_0}{K_V}, \quad (1.13)$$

где T_0 - температура окружающей среды, U_T и U_0 - падения напряжения, измеряемые при реперном токе при температурах T и T_0 , K_V - температурный коэффициент, который был найден путем предварительной градуировки конкретного типа прибора [25-27].

Принцип зависимости термочувствительного параметра от температуры может нарушаться для некоторых термочувствительных параметров, влияние на величину которых оказывает неравномерность температуры, возникающая при собственном разогреве полупроводникового кристалла.

Методика измерения температуры в диодах по величине обратного тока используется редко ввиду сложности его измерения и неудовлетворительной точности её результатов. Для мощных диодов при хорошем отводе тепла от корпуса результат измерения температуры по обратному току может отличаться от истинной температуры р-п перехода в 1,5 – 2 раза. Это объясняется тем, что этот термочувствительный параметр даёт результат измерения температуры, усреднённой по тому объёму полупроводникового кристалла, в котором он измеряется. На характер усреднения влияет главным образом распределение температуры по объёму кристалла. Прямое падение напряжения как термочувствительный параметр получило наиболее широкое распространение для измерения температуры в диодах вследствие своих преимуществ перед обратным током перехода. Во-первых, параметр напряжение (U_F) при постоянном токе (I_F) линейно зависит от температуры в большом интервале изменения для всех типов полупроводниковых приборов, имеющих р-п переход. Во-вторых, температурные приращения напряжения U_F сравнительно легко измеряются. Все представленные выше методы определения температуры активной области кристалла обладают в совокупности следующими недостатками [27,31]:

- методы являются контактными, что не позволяет диагностировать светодиоды, включенные в электрические цепи устройств (компьютеры, светодиодные лампы, табло или матрицы);
- методы не позволяют с высокой точностью определить реальную температуру активной области, так как измеряется «усредненная» температура по кристаллу.

Более перспективными являются бесконтактные оптические методы измерения температуры, которые основаны на температурной градуировке длины волны в максимуме излучения «эталонного» источника света [27,31]. Представленный способ состоит из следующих этапов: «эталонный» источник помещают в термостат. При необходимой температуре термостата после достижения температурного равновесия системы «термостат-источник» регистрируется зависимость значения длины волны в максимуме спектра

излучения от температуры кристалла. Полученная зависимость позволяет определять температуру активной области образцов, близких по своим рабочим параметрам к эталонному. Возможно определить температуру кристалла используя длинноволновую часть спектра излучения светодиода. Из этого спектра определяют значение длин волн в заданных точках в выбранной длинноволновой области спектра и далее по градуировочным зависимостям определяют температуру активной области кристалла[31].

Большой интерес представляют методы измерения температуры поверхности элементов источника света, путем регистрации теплового ИК-излучения. При использовании этого метода, возможно получить наглядную картину распределения температур. Анализ характера ИК-излучения позволяет судить как о распределении тока, так и о наличии скрытых дефектов, которые могут привести изделие к выходу из строя в процессе эксплуатации[32,33]. Чувствительность, разрешающая способность и быстродействие инфракрасных радиометров во многом зависит от используемого приемника излучения. Применяемые в термографии фотоэлектрические приемники характеризуются следующими параметрами: порогом чувствительности к потоку излучения; величиной выходного сигнала; инерционностью приемника. Наиболее распространенными, являются приемники на основе германия легированного золотом или медью [33].

1.4 Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на надежность и долговечность

Полупроводниковые источники света обычно имеют срок службы, измеряющийся десятками и сотнями тысяч часов. Проведение их испытаний на надежность и долговечность представляет собой практически трудно реализуемую задачу. Поэтому разработке ускоренных методов испытаний уделяется особое внимание. В настоящее время для прогнозирования долговечности полупроводниковых приборов существует практически

единственный способ – проведение испытаний в условиях более высоких нагрузок. С этой целью используются форсированные режимы испытаний или при повышенных температурах или при повышенных электрических нагрузках. Процесс старения ускоряется, а деградация параметров происходит так же, как и в обычном режиме работы. Полученные результаты экстраполируют на нормальные условия эксплуатации. Это позволяет за относительно короткий срок изучить период «старения» приборов через взаимосвязь механизмов отказов со временем их проявления [19,31,33].

Известно, что повышение температуры и напряженности электрического поля ускоряет процесс старения изделий. Роль механизмов отказов в этом процессе различна. Многие из них, в том числе и деградационные, связаны с физико-химическими реакциями.

В основе многих механизмов, приводящих к отказам полупроводниковых приборов, в том числе и полупроводниковых источников света, лежат химические и физические процессы, скорость протекания которых, в зависимости от температуры, определяется уравнением Аррениуса вида[34-36]

$$v = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1.14)$$

где A - коэффициент пропорциональности, определяющий интенсивность реакции, т.е. частоту актов взаимодействия в ней;

ΔE - энергия активации, которая определяет барьер различных состояний в реакции, эВ;

k - постоянная Больцмана ($8,616 \cdot 10^{-5}$ эВ/°К);

T - температура, °К.

Когда в ходе физического или химического процесса атом, ион или молекула переходит из одного энергетического состояния в другое путем преодоления ΔE , то вероятность того, что этот переход произойдет вследствие тепловой энергии пропорциональна величине $\exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$. Процессы деградации изделий электронной техники (диффузия, электродиффузия, дефектообразование, и другие) характеризуются средней скоростью и энергией активации. Проводя

аналогию между химическими реакциями и процессами деградации изделий электронной техники, можно записать формулу для интенсивности отказов в следующей форме:

$$\lambda(T) = K_{\lambda} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.15)$$

где E_a -кажущаяся энергия активации, эВ; K_{λ} - коэффициент пропорциональности. Кажущаяся энергия активации это то минимальное количество энергии, которое необходимо сообщить изделию, чтобы начался тот или иной физико-химический процесс, приводящий к деградации параметров [39-42]. Величина энергии активации для данного механизма отказа может быть определена путем построения зависимости натурального логарифма времени наработки на отказ от обратной величины абсолютной температуры. Если в применяемом температурном диапазоне наблюдается линейный характер этой зависимости, то справедлива обратная экстраполяция величины наработки на отказ к рабочей температуре.

Построив данную зависимость в полулогарифмическом масштабе, можно определить энергию активации дефектов, вызывающих отказы, а по форме кривой судить о стабильности механизма, ответственного за данный вид отказа.

Следует так же отметить, что один и тот же механизм отказа может ускориться различными видами нагрузок, а один и тот же вид нагрузки может ускорить разные виды отказов. Примеры возможных случаев зависимости интенсивностиотказов приборов от уровня тепловой и электрической нагрузок приведены на рисунке 1.10. Установлено, что при повышении температуры может происходить смена доминирования между типами отказов, что находит отражение на графиках зависимости интенсивности отказов от температуры [37-42].

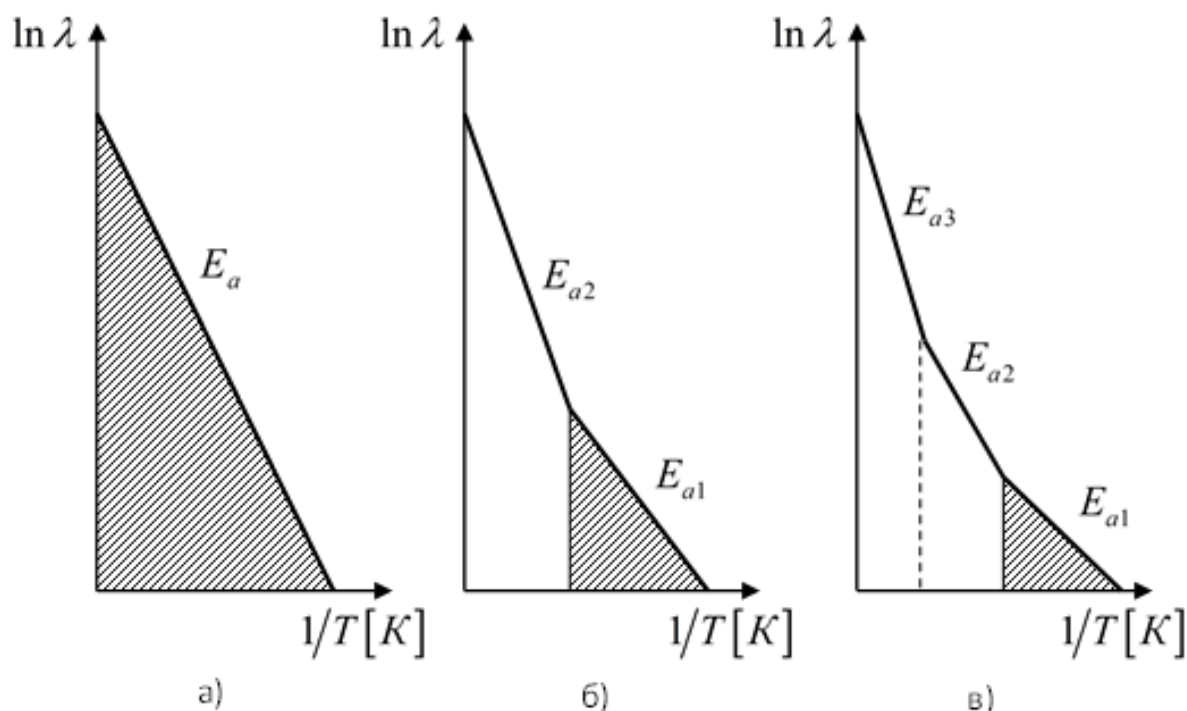


Рисунок 1.10 . Зависимость интенсивности отказов и энергии активации дефектов от уровня нагрузки. а) – в диапазоне нагрузки действует один вид дефекта с одной энергией активации; б) – в диапазоне нагрузки действуют два вида дефектов с различными энергиями активации; в) – в диапазоне нагрузки действуют три вида дефектов с различными энергиями активации

Согласно правилу «10 градусов», скорость старения увеличивается вдвое при увеличении температуры на 10 °С. Этому закону нарастания скорости старения соответствует энергия активации в пределах 0,7-0,8 эВ. Именно эту величину 0,7 эВ фирма AnalogDevices использует в расчетах интенсивности отказов [10]. На практике, при проведении ускоренных испытаний полупроводниковых источников света, в качестве критерия используют величину светового потока, а так же прямое падение напряжения при рабочем токе [43,44,45].

Предположим, что параметр φ изменяется в соответствии с уравнением

$$\varphi = \varphi_0 + At^n \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1.16)$$

Значение этого параметра в момент отказа равно φ_F .

$$\varphi_F = \varphi_0 + At_F^n \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1.17)$$

Вид логарифма времени до отказа представлен ниже

$$\ln t_F = C + \frac{\Delta E}{nkT}, \quad (1.18)$$

Данная формула и есть основная зависимость наработки на отказ от температуры, т.е. $\ln t_F$ от $1/T$, где кажущаяся энергия активации равна $\Delta E/n$, или в n раз меньше энергии активации истинного механизма, вызывающего изменение контрольного параметра. Строгих математических уравнений, определяющих долговечность, не существует, но практически считается, что для приборов с p - n переходом она обратно пропорциональна не только температуре, но и прикладываемому напряжению V или плотности тока j [46]. Если применим традиционный подход к надежности изделий, обусловленный принятыми допущениями: выполнение закона Аррениуса (только учет температурной зависимости), постоянство частоты отказов во времени, отражающий характер зависимости отказов от технологии, то:

$$\bar{t}_F \propto V^{-\gamma(T)}, j^{-\alpha(T)}, \quad (1.19)$$

$$\bar{t}_F \propto \text{const} * \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1.20)$$

где t_F – среднее время наработки до отказа, или медианный срок службы; ΔE – энергия активации; k – константа Больцмана; T – абсолютная температура перехода.

Практика эксплуатации и опыт ускоренных испытаний показали, что зависимость долговечности от температуры описывается логарифмически нормальным распределением с возрастающей функцией интенсивности отказов, которое также хорошо описывает отказы, когда нагрузкой является повышенная влажность и повышенная напряженность электрического поля[47].

Таким образом, для многих полупроводниковых приборов, долговечность которых определяется законом Аррениуса, справедливы следующие обобщения [47]:

- для широкого диапазона температур долговечность описывается логарифмически нормальным распределением:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Lnt - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (1.20)$$

- параметр масштаба σ (среднеквадратического отклонения срока службы) есть константа и не зависит от нагрузки:

$$\sigma \approx \ln \frac{t_{50\%}}{t_{16\%}}, \quad (1.21)$$

где $t_{50\%}$ – время отказа 50 % приборов в выборке, или медианный срок службы; $t_{16\%}$ – время отказа 16 % приборов в выборке;

- логарифм срока службы $\mu = t_{50\%}$ имеет нормальное распределение и является линейной функцией нагрузки: $\mu = a + \beta T^{-1}$, где a, β – параметры, характеризующие особенности изделия и зависящие от условий эксплуатации или режимов испытаний.

Выполнение закона Аррениуса отвечает требованиям линейной экстраполяции результатов испытаний с области повышенных температур на нормальные условия функционирования прибора. В случае комбинированных испытаний (одновременного воздействия повышенной температуры и напряжения смещения) интенсивность отказов аномальных изделий зависит только от температуры, в то время как поведение основной части выборки зависит и от первого, и от второго. В этом случае для определения t_F может быть использована модель Эйринга [47]:

$$\bar{t}_F = \frac{G}{T} \exp \left[\frac{E_a}{kT} - V \left(C + \frac{D}{kT} \right) \right], \quad (1.22)$$

где G, C, D – константы, подлежащие определению; V – напряжение смещения. При $T = \text{const}$, в соответствии с моделью Эйринга, уменьшение напряжения смещения приводит к повышению долговечности. В условиях пониженной нагрузки, время наработки на отказ может в эксплуатационных режимах в несколько раз превышать установленный срок службы [46].

Интенсивность отказов $\lambda_i(t)$ определяется по формуле

$$\lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t_i}, \quad (1.23)$$

где Δn_i – число изделий, отказавших за промежуток времени Δt_i ; n_i – число изделий, отказавших к началу промежутка времени Δt_i ; N – общее число изделий.

Величиной сокращения долговечности за счет развития дефектов при повышении температуры от T_1 к T_2 служит коэффициент ускорения [47]:

$$K_Y^T = \frac{t_1}{t_2} = \exp \left[\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T_1 + P_1 \cdot \Theta_1} - \frac{1}{T_2 + P_2 \cdot \Theta_2} \right) \right], \quad (1.24)$$

где верхний индекс T показывает влияние температуры; t_1, t_2 – среднее время наработки на отказ при температуре T_1, T_2 соответственно; T_1, T_2 – нормальная и повышенная температура соответственно; ΔE – энергия активации для наблюдаемого процесса старения; P_1, P_2 – рассеиваемая мощность на переходе; Θ_1, Θ_2 – термические коэффициенты сопротивления «переход-окружающая среда». Зависимость коэффициента ускорения K от температуры представлена на рисунке 1.11.

Примерно такую величину энергии активации имеют и светодиоды работающие в красной, зеленой и инфракрасной области спектра.

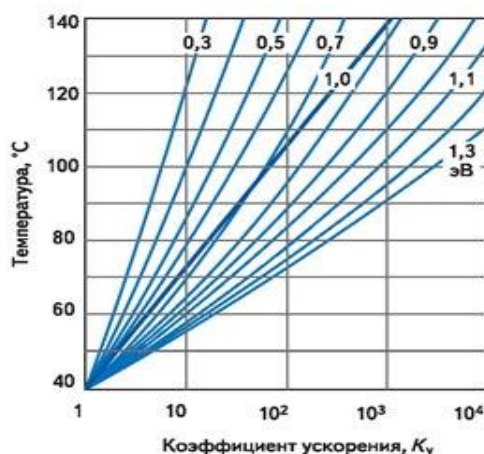


Рисунок 1.11 - Зависимость коэффициента ускорения K от температуры

Испытания при температурах, физически допустимых конструкцией изделий (200–300 °С), будут инициировать отказы, связанные с высокой энергией активации. Высокотемпературное старение способно выявить в течение нескольких часов такие изменения в элементах конструкции изделий, которые в конечном счете, произошли бы в них при длительной работе в нормальных

условиях [47,48,49]. При высоких температурах, близких к пороговым, можно наблюдать отказы уже через 48–100 часов испытаний, относительно редко проявляющиеся при умеренных температурах.

Оценку значения энергии активации возможно произвести с использованием результатов испытаний партии изделий при ступенчато возрастающей нагрузке. Испытания проводят на партии или выборке из партии изделий. Испытания проводят в предельно допустимом электрическом режиме, установленном в технических требованиях для испытаний на безотказность. Испытания проводят в два этапа. Продолжительность первого этапа (t_1) не менее 168 ч, продолжительность второго этапа (t_2) не менее 72 ч. Температура окружающей среды на первом этапе устанавливается равной повышенной температуре, указанной в технических требованиях для проведения испытаний на безотказность. Температура окружающей среды на втором этапе устанавливается на 15 – 35°C выше, чем на первом этапе в пределах ранее определенной области допустимого форсирования. Контроль параметров проводят перед началом испытаний, через 48 ч (t_{11}), по окончании первого этапа (t_{12}) по окончании второго этапа (t_2). Обработку результатов испытаний проводят в следующем порядке [50,51]:

1. Определяют накопленное число отказов: d_{11} – за время t_{11} ; d_{12} – за время с начала испытаний до окончания первого этапа t_{12} ; d_2 – за время с начала испытаний до окончания второго этапа t_2 (включая отказы d_{11} , d_{12}).

Отказы, связанные с нарушением испытательного оборудования, ошибки операторов, а также вызванные грубыми производственными дефектами, в расчетах не учитывают.

2. Для моментов времени испытаний t_{11} , t_{12} , t_2 определяют накопленную долю отказов по формулам:

$$F_{11} = d_{11p}/n, \quad (1.25)$$

$$F_{12} = d_{12p}/n, \quad (1.26)$$

$$F_2 = d_{2p}/n, \quad (1.27)$$

где d_{11p} , d_{12p} , d_{12p} – верхние доверительные границы накопленного числа отказов к моментам времени t_{11} , t_{12} , t_2 при доверительной вероятности $P = 0,6$;

n – объем испытываемой выборки.

3. По значениям F_{11} , F_{12} , t_{11} , t_{12} определяют параметр формы распределения отказов во времени (β) по формуле

$$\beta = (\ln[\ln(1/1 - F_{11})] - \ln[\ln(1/1 - F_{12})]) / \ln[t_{11}/t_{12}], \quad (1.28)$$

4. По значениям F_{12} , F_2 , t_{12} , β , t_2 определяют значение энергии активации по формуле

$$\Delta E = 8,6 \cdot 10^6 / (1/(T_{пер1} + 273) - 1/(T_{пер2} + 273)) \ln\{t_2/t_1 [\ln(1 - F_{12}) / (\ln(1 - F_2) - \ln(1 - F_{12}))]^{1/\beta}\}^{-1}, \quad (1.29)$$

где $T_{пер1}$ и $T_{пер2}$ – температура р-п перехода кристалла при испытаниях на первом и втором этапах соответственно, °С [50,51].

1.5 Основные виды отказов полупроводниковых источников света, возникающие в процессах эксплуатации и испытаний

В настоящий момент не существует стандартов, определяющих срок службы и критерии надежности для данного вида изделий. Существуют предложения считать сроком службы время, в течении которого световой поток деградирует до некоторого значения (например, 70%) от начальной величины. Некоторые компании разработали собственные методы прогнозирования срока службы и надежности на основе данных, полученных от потребителей [51,52]. Однако, большинство существующих стандартов оперирует информацией только в терминах постоянной интенсивности отказов. Хотя в большинстве случаев характеристики изделий ухудшаются постепенно, также наблюдались внезапные отказы из-за роста дислокаций с периферии активной области, разрушения р-п-перехода, роста дислокаций с окисленного торца или промежуточной области, разделяющей торец и диэлектрическое покрытие, и катастрофического

оптического повреждения. Скорости деградации изделий, а следовательно и надежность в значительной мере зависит от изготовителя и уровня производства. Отказы определяют различными методами. Один из методов заключается в том, что при фиксированном токе следят за выходной мощностью прибора, считая прибор неработоспособным при падении выходной мощности ниже определенного уровня (обычно от 20% до 50 %) от исходной величины. Другой метод основан на контроле падения выходной мощности прибора и его компенсации путем увеличения управляющего тока. Когда управляющий ток достигает определенной относительной величины, например, 50% прибор считается вышедшим из строя. Некоторые механизмы отказа и дефекты также могут инициировать выход из строя светодиодов [50,51,52,53].

Увеличение интенсивности электролюминесценции у синих кристаллов в первый период наработки наблюдалось во многих исследованиях, где авторы объясняли это явление активацией акцепторов Mg в *p*-слое GaN гетероструктуры под действием инжекции носителей остаточных комплексов Mg-H, образующихся в процессе роста. Наблюдаемое большее увеличение интенсивности свечения при повышенной плотности тока может свидетельствовать, таким образом, о более эффективном процессе активации акцепторов в случае увеличения плотности тока через гетероструктуру. Следующее за этим, снижение интенсивности электролюминесценции в течение последующего периода времени наработки также объяснялось в модели, как образование донорных дефектов, компенсирующих акцепторы, и увеличивающих безызлучательную рекомбинацию и интенсивность свечения желтой полосы дефектов [54].

Видно, что оценка деградации интенсивности, сделанная при более высокой плотности тока, превосходит значения, наблюдаемые при низкой плотности тока. Это можно объяснить тем, что в процессе деградации на гетерограницах образуется диполь, связанный с неоднородностью инжекции, влияние которого повышается при повышении плотности тока через гетероструктуру. Это свидетельствует о том, что основной причиной деградации интенсивности электролюминесценции гетероструктур является повышенная плотность тока, а

не окружающая температура. Данный факт может объясняться тем, что неоднородности инжекции по площади гетерограницы приводят к локальным изменениям (в частности, к сильному локальному нагреву) и образованию дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации [55,56].

Основным источником внезапных отказов является нарушение электрического контакта. Причинами обрывов электрических цепей являются недостаточная прочность сварных соединений в местах контактов разнородных материалов, электрическое, химическое, механическое разрушение металлических тонкопленочных проводников, дефекты сборки микросхем. Короткие замыкания в электрических цепях обусловлены, в основном, дефектами фотолитографии, возникновением каналов с инверсной электропроводностью, дефектами кристаллической решетки полупроводникового кристалла, дефектами сборки.

Основными причинами параметрических отказов источников света, выражающихся в большинстве случаев в изменении прямого падения напряжения на р-п переходе, являются возникновение каналов электропроводности из-за миграции подвижных зарядов, загрязнения поверхности кристалла и разгерметизации корпуса. С точки зрения физических причин отказы условно делятся на три категории:

1. объемные, связанные с явлениями в объеме полупроводникового кристалла;
2. поверхностные, обусловленные явлениями на поверхности кристалла;
3. контактные, обусловленные нарушением контактных соединений и обрывом тонкопленочных проводников.

1.5.1 Деграция активной области кристаллов источников света

Излучение света в кристалле происходит в результате рекомбинации инжектированных носителей в активной области. Зарождение и рост дислокаций, также как преципитация узловых атомов, приводит к деграции внутренней части этой области. Эти процессы могут осуществиться только при наличии дефекта кристаллической структуры. Высокая плотность инжектированного тока,

разогрев из-за инжектированного тока и тока утечки, а также испускаемый свет ускоряют развитие дефекта. Выбор материала, из которого изготовлен светодиод имеет значение, так как система AlGaAs/GaAs гораздо более чувствительна к этому механизму отказа, чем система InGaAs (P)/InP. Система InGaN/GaN нечувствительна к дефектам. В активных областях могут встречаться простые p-n переходы, встроенные гетероструктуры и множественные квантовые ямы. На границах раздела таких структур неизбежны изменения химического состава или даже параметров решетки. При высоком уровне инжекции химические компоненты могут мигрировать путем электромиграции в другие области. Структурные изменения порождают кристаллические дефекты наподобие дислокаций и точечных дефектов, которые ведут себя как неизлучающие центры, препятствующие естественной излучающей рекомбинации и в результате генерирующие дополнительное тепло внутри активного слоя[53,57]. Заметная деградация вольт-амперной характеристики начинается в первые 100 часов работы. Предполагается что это связано с диффузионным перераспределением примесей в активной области структуры под действием прямого тока проходящего через кристалл. В некоторых случаях, в области микротоков 10^{-4} – 10^{-3} А происходило снижение интенсивности излучения, что вероятно обусловлено ростом доли безызлучательной рекомбинации. Таким образом, на первом этапе деградации происходит формирование центров безызлучательной рекомбинации вокруг стоков, окруженных точечными дефектами. На втором этапе деградация усиливается за счет интенсивной безызлучательной рекомбинации через центры безызлучательной рекомбинации. Чем меньше энергия, выделяющаяся при безызлучательной рекомбинации, тем меньше скорость деградации на этом этапе. На третьем этапе рост вакансий может облегчить диффузию различных примесей, что также может привести к появлению новых центров безызлучательной рекомбинации. Различия в энергиях активации долговременной деградации (0,5–0,7 эВ) и быстрой деградации (0,2 эВ) связаны с различной энергией активации диффузии примеси по междоузлиям и вакансиям.

1.5.2 Деградация электродов

В источниках света обычно используются два типа контактных соединений:

- соединения тонкопленочных металлических контактных площадок на кристалле с внешними выводами (траверсами) корпуса, выполняемые обычно с помощью золотых микропроводников;
- соединение основания кристалла с корпусом методом пайки или клеевого соединения.

Деградация электродов, в основном, имеет место на электроде *p*-области [58]. Основная причина деградации электрода заключается в диффузии металла во внутреннюю область, так называемая периферийная диффузия полупроводника. Диффузия усиливается с увеличением инжектированного тока и температуры. К сожалению, выбрать подходящий материал для омического контакта к *p*-области светодиодов InGaN/GaN довольно сложно из-за большой ширины запрещенной зоны GaN*p*-типа. Электрод должен обладать меньшим коэффициентом взаимной диффузии составляющих, инженеры иногда применяют барьерный слой для подавления эффектов электромиграции. Для решения проблем с токовым насыщением нужно оптимизировать конструкцию электрода светодиода и вертикальную составляющую электрического тока. Электроды из некоторых материалов, таких как прозрачный проводящий оксид индия-олова (ITO), или отражающих металлов (серебро) подвержены таким проблемам как электромиграция и термическая нестабильность [53].

Деградация рабочей кромки является серьезной проблемой для светодиодов на AlGaAs/GaAs, излучающих видимый свет, но нехарактерна для светодиодов на InGaAsP. Окисление путем фотохимических реакций приводит к увеличенным значениям порогового тока и, соответственно, уменьшению времени жизни изделия. Другим типом отказа рабочей кромки является так называемый катастрофический оптический дефект – когда величина световой энергии превосходит определенный уровень и рабочая кромка начинает плавиться. Отказ оптоэлектронных приборов, в обычных условиях устойчивых

кдеградации рабочей кромки, может быть инициирован повреждениями при обработке, посторонними загрязнениями и дефектами материала [59].

1.5.3 Тепловая деградация

Тепловая деградация из-за неоптимального теплоотвода часто доминирует в светодиодах в первые 10 000 часов работы. Значительная выделяемая тепловая мощность требует монтажа кристалла на радиатор или теплопоглощающую подложку, часто с помощью припоя. Если поры в припое создают условия для недостаточного отвода тепла, возникающие горячие точки приводят к тепловой деградации и отказу. Образование каверн в припое может происходить из-за нарушения условий обработки или диффузии металла на границе раздела (т.н. каверны по Киркендаллу). Также образование каверн может происходить из-за электромиграции. Когда в металле протекает достаточно большой ток, вакансии и ионы металлов мигрируют к противоположным полюсам, приводя к образованию каверн (вакансии), кристаллов, бугорков и вискероов. Рост вискероов, который может начаться под действием внутренних напряжений, температуры, влажности и особенностей материала, обычно происходит на границе между припоем и радиатором и может привести к короткому замыканию[60].

В большинстве источников света используют желтый или красный/зеленый люминофор, которые подвержены термической деградации. Когда разработчики смешивают два или более различных люминофора, составляющие должны иметь сравнимое время жизни и характер деградации для обеспечения насыщенности цвета. Цветовая температура и чистота цвета люминофора также деградируют со временем[61].

1.5.4 Электростатический разряд и электрическая перегрузка

Полупроводники чувствительны к дефектам, вызванным электростатическим разрядом (ЭСР). Видами отказа из-за ЭСР могут быть

внезапный отказ, параметрические сдвиги или внутреннее повреждение, приводящее к деградации в процессе последующей эксплуатации. Согласно существующим нормативам, чувствительность светодиодов к ЭСР должна быть больше 100 В при тестировании на модели человеческого тела. Пробой из-за перегрузки и ЭСР являются существенной проблемой для светодиодов. Иногда разработчики используют диод Зенера или барьер Шотки для достижения определенного класса по ЭСР. Большинство коммерческих светодиодов InGaN/GaN формируется на сапфировых подложках, не имеющих электрической проводимости. Это приводит к появлению остаточного электрического заряда в приборе, что делает его более чувствительным к повреждениям, вызванным электростатическим разрядом и перегрузкой[61].

1.5.5 Термическая усталость и короткое замыкание

Разница в коэффициенте термического расширения у соединенных частей и припоя приводит к появлению механических напряжений на этапе изготовления, связанного с термоциклированием. Термическая усталость обычно наблюдается в приборах, изготовленных с использованием мягкого припоя, в то время как приборы, изготовленные с использованием твердого припоя, стабильны при циклической термической нагрузке. Одной из наиболее частых причин отказов в светодиодах являются термические напряжения в герметике. Если - вследствие электрической перегрузки или высокой внешней температуры – температура корпуса достигает температуры перехода наполнителя герметика (T_g), смола начинает быстро расширяться. Разница в коэффициенте термического расширения внутренних компонентов изделия может привести к механическому повреждению. При очень низких температурах может произойти растрескивание эпоксидной композиции. Высокая температура, вызванная внутренним нагревом и неизлучающей рекомбинацией, и достигающая 150 °C, приводит к пожелтению эпоксидной композиции, что в результате меняет выходную оптическую мощность или цвет излучаемого света. Если индекс преломления герметика не

соответствует индексу преломления полупроводникового материала, индуцированный свет остается в полупроводнике, в результате чего возникает дополнительный источник тепла. В результате перегрева эпоксидной композиции может происходить разрыв или отделение электродного вывода и снижение прочности соединения кристалла с подложкой. Эти проблемы в свою очередь могут привести к отслоению кристалла и эпоксидной композиции. Механические напряжения, вызванные легкоплавкими припоями являются еще одной причиной, в результате которой в приборе может появиться обрыв. Несоблюдение требований к давлению, положению и направлению в процессе пайки выводов может привести к появлению механических напряжений при нормальной рабочей температуре и изгибанию выводов в опасной близости от кристалла светодиода [61].

1.6 Выводы

1. Несмотря на высокую внутреннюю квантовую эффективность современных полупроводниковых источников света, значительная часть электрической мощности превращается в тепло, что приводит к интенсивному нагреву активной области кристалла.

2. Распределение тепла в активной области неоднородно, что связано с локализацией плотности тока в объёме кристалла, а так же на поверхности, вблизи омического контакта. Существующие методы измерений не дают полной информации о распределении температуры по кристаллу и люминофору.

3. Срок службы полупроводниковых источников света превышает 100000 часов, поэтому особое значение приобретают ускоренные методы испытаний на надежность и долговечность. Так как в основе большинства ускоренных испытаний положен принцип температурного ускорения, то особое значение приобретает непрерывный контроль температуры в процессе испытаний и определение точного значения кажущейся энергии деградации.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ

В работе исследовалось два типа полупроводниковых источников света в пластмассовом корпусе 5050 с кристаллом на основе гетероструктур GaN-InGaN и желто-зеленого люминофора: типа КИПД 154А92 и КИПД 154Г92 производства ОАО НИИПП (г.Томск), а также опытные образцы светодиодов, разработанных в рамках выполнения работ по постановлению правительства РФ №218. Для сравнительного анализа исследовались так же источники производства зарубежных фирм SEUL (Корея) и REFOND (Китай) [62].

2.1. Полупроводниковые источники света типа КИПД 154А92, КИПД 154Г92

Однокристалльные источники света типа КИПД 154А92, КИПД 154Г92 предназначены для создания светотехнических изделий для систем освещения, контроля и сигнализации. Их изготавливают в металлополимерном корпусе, пригодном как для ручного поверхностного монтажа, так и для автоматизированного поверхностного монтажа [63].

Характеристики разных типов источников света [63]:

- КИПД 154 А92-Б1, КИПД 154 Б92-Б1 -Цветовая температура 4750 -8000К, свет белый холодный;
- КИПД 154 А92-Б2, КИПД 154 Б92-Б2 -Цветовая температура 3700 -4750К, свет белый нейтральный;
- КИПД 154 А92-Б3, КИПД 154 Б92-Б3- Цветовая температура 2600- 3700К, свет белый теплый.

Световой поток при прямом токе 350 мА: – КИПД 154 А92-Б1: 60–150 лм.

Световой поток при прямом токе 60 мА: – КИПД 154 Г92-Б1: 10–25 лм.

Прямое постоянное падение напряжения при прямом токе 350 мА: – КИПД 154 А92-Б1 – КИПД 154 А92-Б2 – КИПД 154 А92-Б3 -не более 3,6В.

Прямое постоянное падение напряжения при прямом токе 60 мА: – КИПД 154 Г92-Б1 не более 3,4В.

Угол излучения по уровню 0,5 -125–145°.

На рисунке 2.1 представлен внешний вид полупроводникового источника света КИПД 154А92-Б2, габаритный чертеж представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.1 - Внешний вид полупроводникового источника света КИПД 154А92-Б2

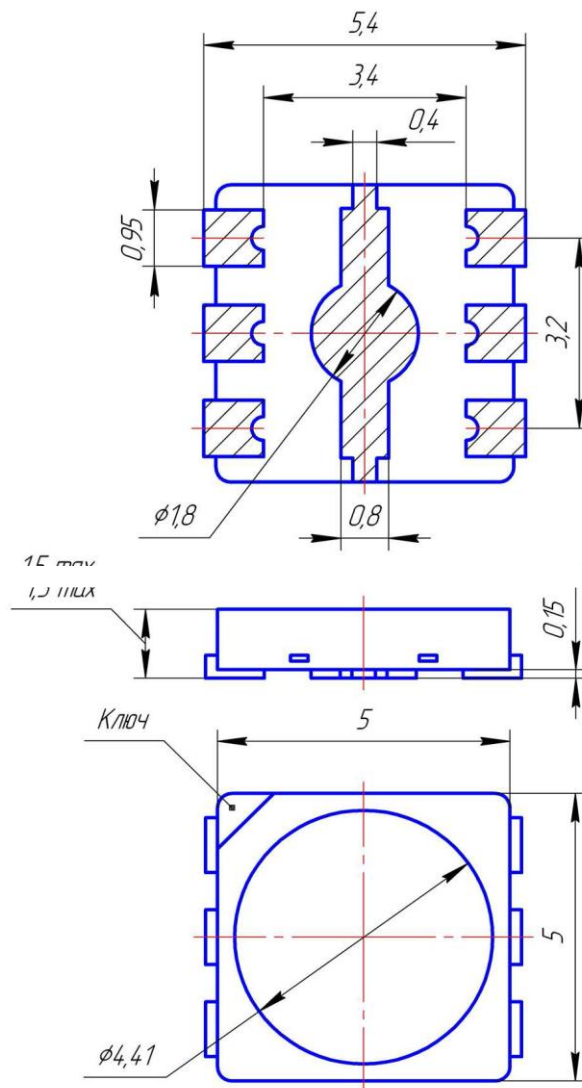


Рисунок 2.2 - Габаритный чертеж источника света КИПД 154 А92-Б2 в корпусе типа 5050-1

Особенностью корпуса 5050-1 является наличие металлической вставки, существенно снижающей тепловое сопротивление кристалл-корпус. Для изделий типа КИПД 154Г92, использовался пластмассовый корпус без металлической вставки (рис.2.3)

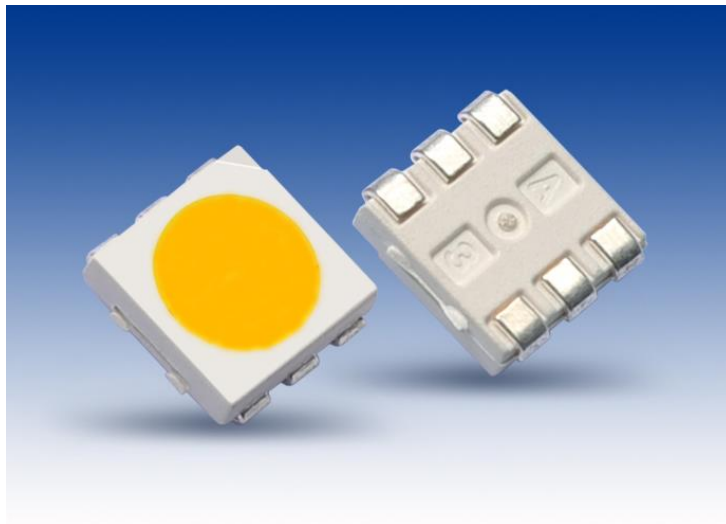


Рисунок 2.3 - Внешний вид источника света КИПД154Г92 в пластмассовом корпусе 5050-2

В корпусе расположен кристалл на основе системы GaN-InGaN размером 1x1 мм (КИПД 154А92), или 0,5x0,5 мм (КИПД 154 Г92 на поверхность которого наносится слой желто-зеленого люминофора типа ФЛЖ-7.

Предельные характеристики эксплуатации источников света:

- максимально допустимый постоянный прямой ток- 500 мА;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение 5 В;
- максимально допустимый импульсный прямой ток при $f = 1$ кГц , $Q = 10 - 700$ мА;
- повышенная рабочая температура корпуса $+85^{\circ}\text{C}$;
- пониженная рабочая температура корпуса -60°C ;
- температура пайки $235\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- допустимое значение потенциала статического электричества 2000 В;
- наработка до отказа 50000 ч;
- тепловое сопротивление р-п переход –корпус - $30^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

- масса не более 0,6 г.

Относительное спектральное распределение мощности излучения представлено на рисунке 2.4.

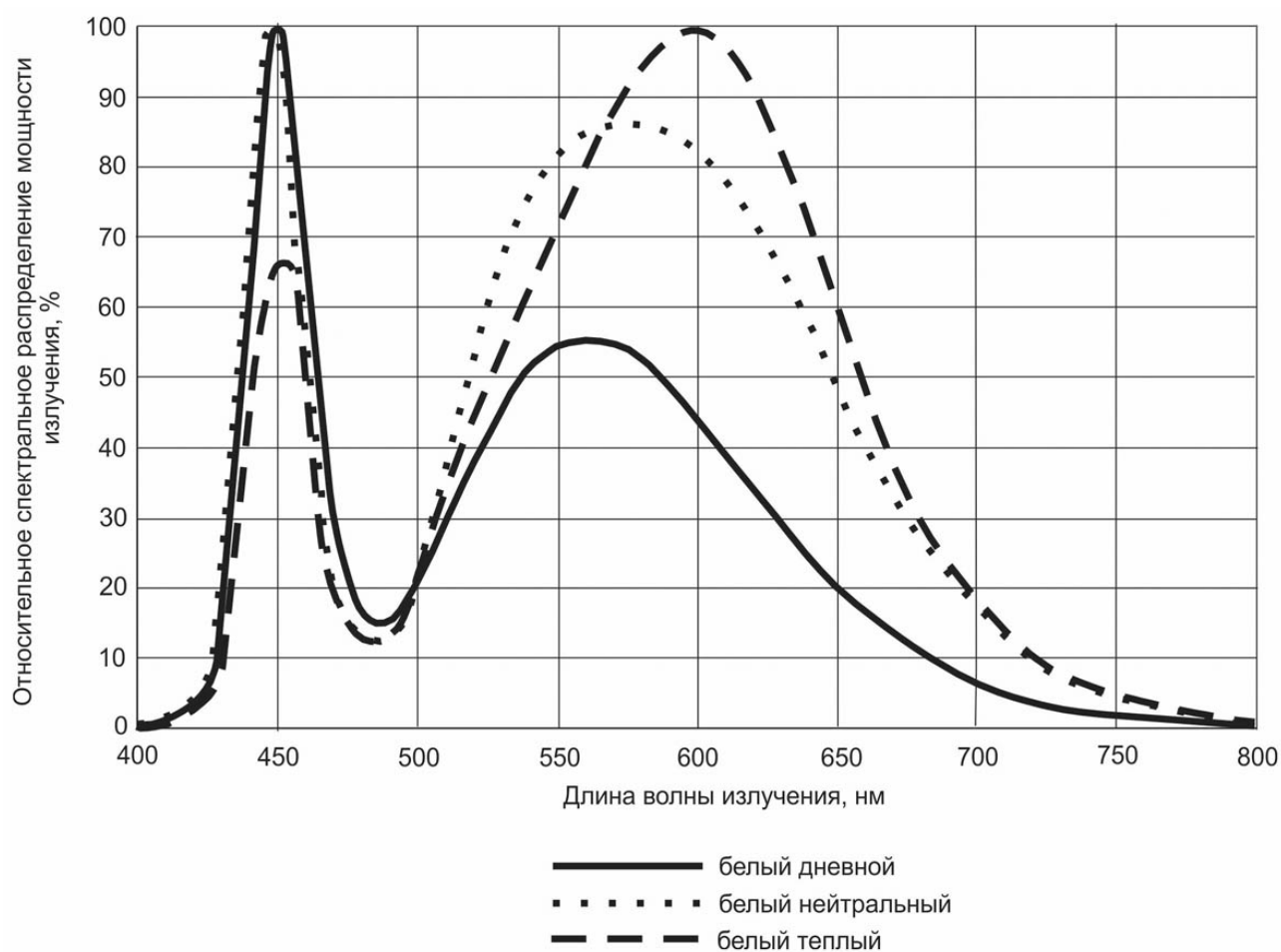
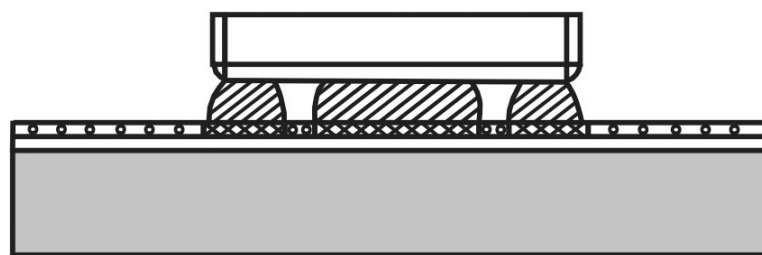


Рисунок 2.4 - Спектр излучения источника света

Рекомендуемый способ монтажа изделия на печатную плату представлен на рисунке 2.5.








-  металлическая подложка
-  диэлектрический слой
-  паяльная маска
-  медная фольга
-  припой

Рисунок 2.5 - Рекомендуемый способ монтажа изделия на печатную плату (теплоотвод)

2.2 Используемые методы исследования электрических и фотометрических параметров и режимов работы полупроводниковых источников света

2.2.1 Методы измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик

В данной работе, исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) источников проводились с помощью автоматизированного комплекса «Метроном-03», изготовленного на кафедре «Физической электроники» ТУСУР [64].

Технические характеристики комплекса «Метроном-03» [64]:

- прикладываемое напряжение к структуре – от -10 до +10 В с шагом 600 мкВ;
- диапазон измеряемых емкостей – 0.5 ... 4000 нФ;
- диапазон корректно измеряемых токов – от 1 до 10^3 нА;
- погрешность измерения во всех диапазонах – менее 1%;
- чувствительность измерителя емкости – меньше 0,01 нФ;
- чувствительность измерителя тока – 0,1 нА.

Общий вид комплекса представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 - Внешний вид комплекса «Метроном-03»

На рисунке 2.7 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых источников света при разных температурах.

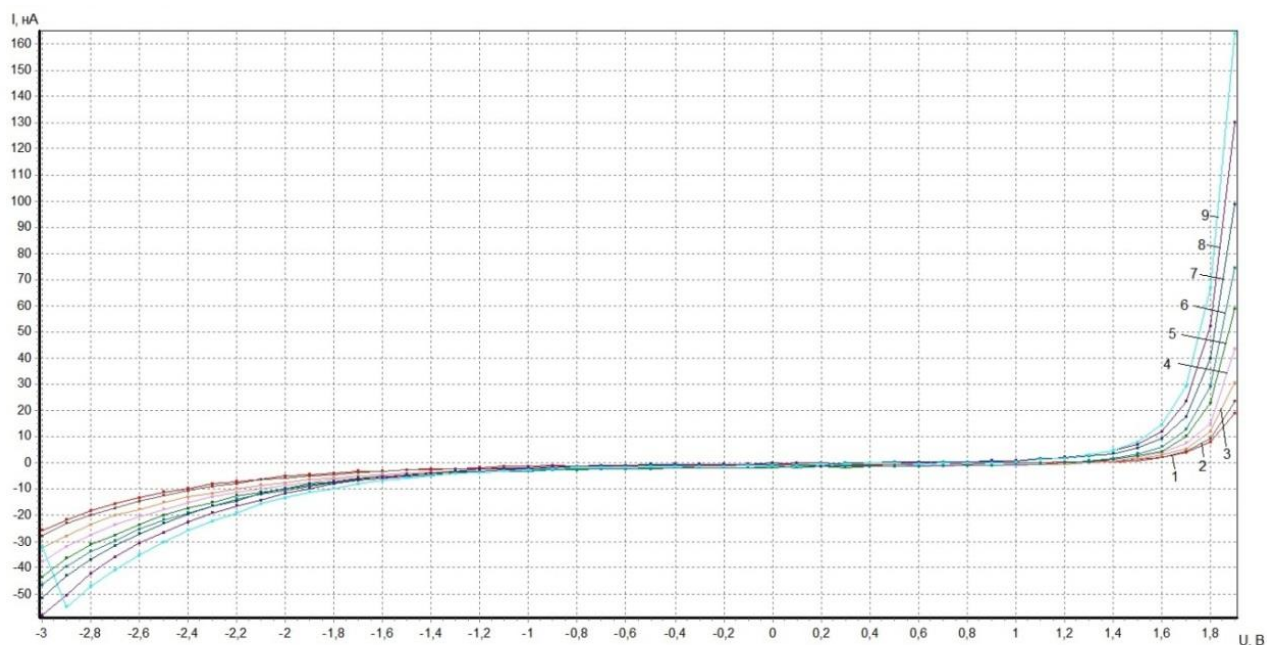


Рисунок 2.7 - ВАХ в зависимости от температуры. 1 – ВАХ при $T = 25^{\circ}\text{C}$; 2 – ВАХ при $T = 30^{\circ}\text{C}$; 3 – ВАХ при $T = 40^{\circ}\text{C}$; 4 – ВАХ при $T = 50^{\circ}\text{C}$; 5 – ВАХ при $T = 60^{\circ}\text{C}$; 6 – ВАХ при $T = 70^{\circ}\text{C}$; 7 – ВАХ при $T = 80^{\circ}\text{C}$; 8 – ВАХ при $T = 90^{\circ}\text{C}$; 9 – ВАХ при $T = 100^{\circ}\text{C}$

На рисунке 2.8 представлены типичные вольт-фарадные характеристики того же источника при различных температурах.

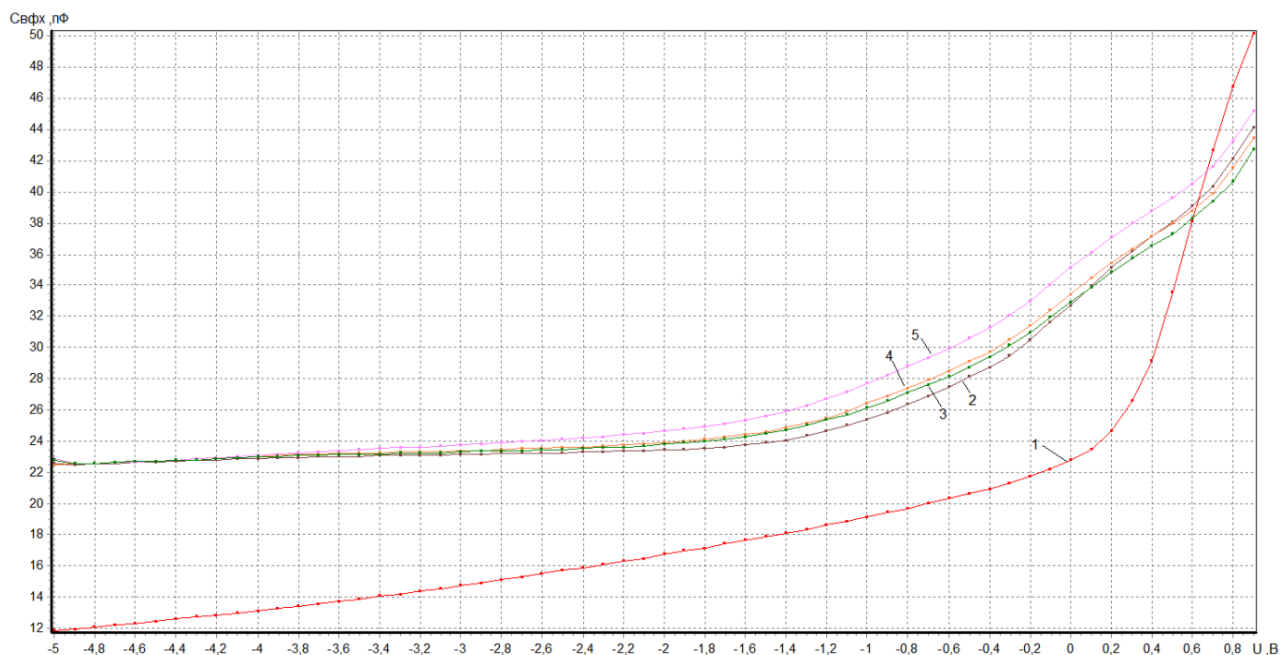


Рисунок 2.8 - Вольт - фарадные характеристики экспериментальных образцов.

Вольт-фарадные характеристики использовались при анализе процессов деградации полупроводниковых источников света после испытаний.

2.2.2 Измерение теплового сопротивления полупроводниковых источников света

Для исследования тепловых характеристик полупроводниковых источников света использовалась установка УТС разработанная на кафедре РЭТЭМ ТУСУР в рамках выполнения работ по постановлению правительства РФ №218. Установка предназначена для измерения теплового сопротивления р-п переход – внешняя среда светодиодов в корпусах типа 5050. УТС является автоматическим прибором, состоящим из электронного блока, измерительной ячейки, преобразователя интерфейса RS485/RS232 (далее буфер) и компьютерной программы.

Основные технические характеристики установки приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 -Основные технические характеристики

Наименование характеристики	Значение величины
Величина греющего тока, мА	от 5 до 1500
Величина измерительного тока, мА	2,1
Диапазон измерения напряжения на р-n-переходе (при греющем токе), В	от 0,5 до 20
Диапазон измерения напряжения на р-n-переходе (при измерительном токе), В	от 0 до 4,9
Диапазон измерения температуры, °С	от 0 до 150
Потребляемая мощность, Вт, не более	100
Габаритные размеры, мм, не более	
- электронного блока	230×155×240
- измерительной ячейки	190×150×160
- буфера	140×35×125

Внешний вид установки представлен на рисунке 2.9.

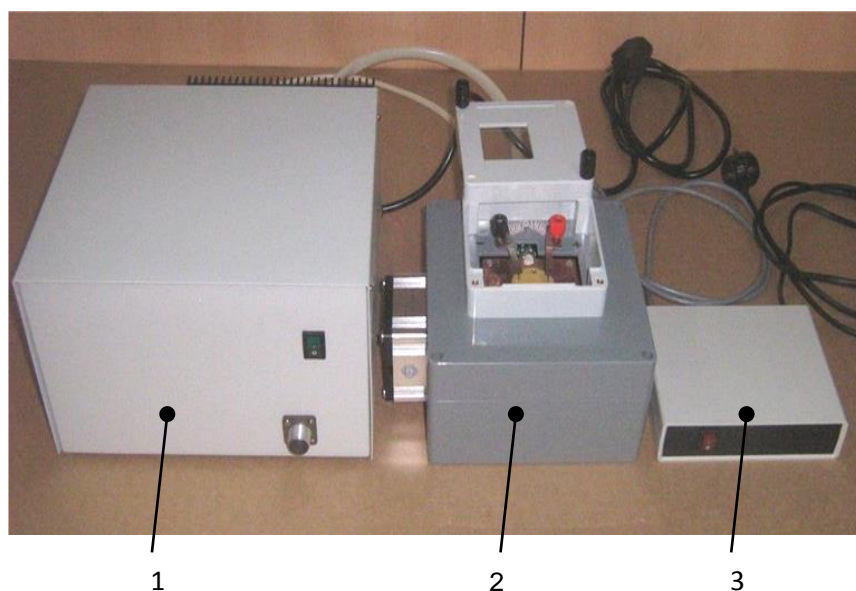


Рисунок 2.9 - Установка для измерения теплового сопротивления.

1 – электронный блок, 2 – измерительная ячейка, 3 – буфер

Установка состоит из электронного блока, измерительной ячейки и буфера для связи с компьютером. Электронный блок осуществляет следующие функции:

- формирование и выдача в измерительную ячейку греющего и измерительного токов;
- измерение напряжения на р-п переходе при греющем и измерительном токе;
- измерение температуры рабочего столика измерительной ячейки;
- управление нагревом рабочего столика;
- управление вентилятором обдува радиатора, на котором установлен рабочий столик.

Структурная схема установки измерения теплового сопротивления светодиодов представлена на рисунке 2.10.

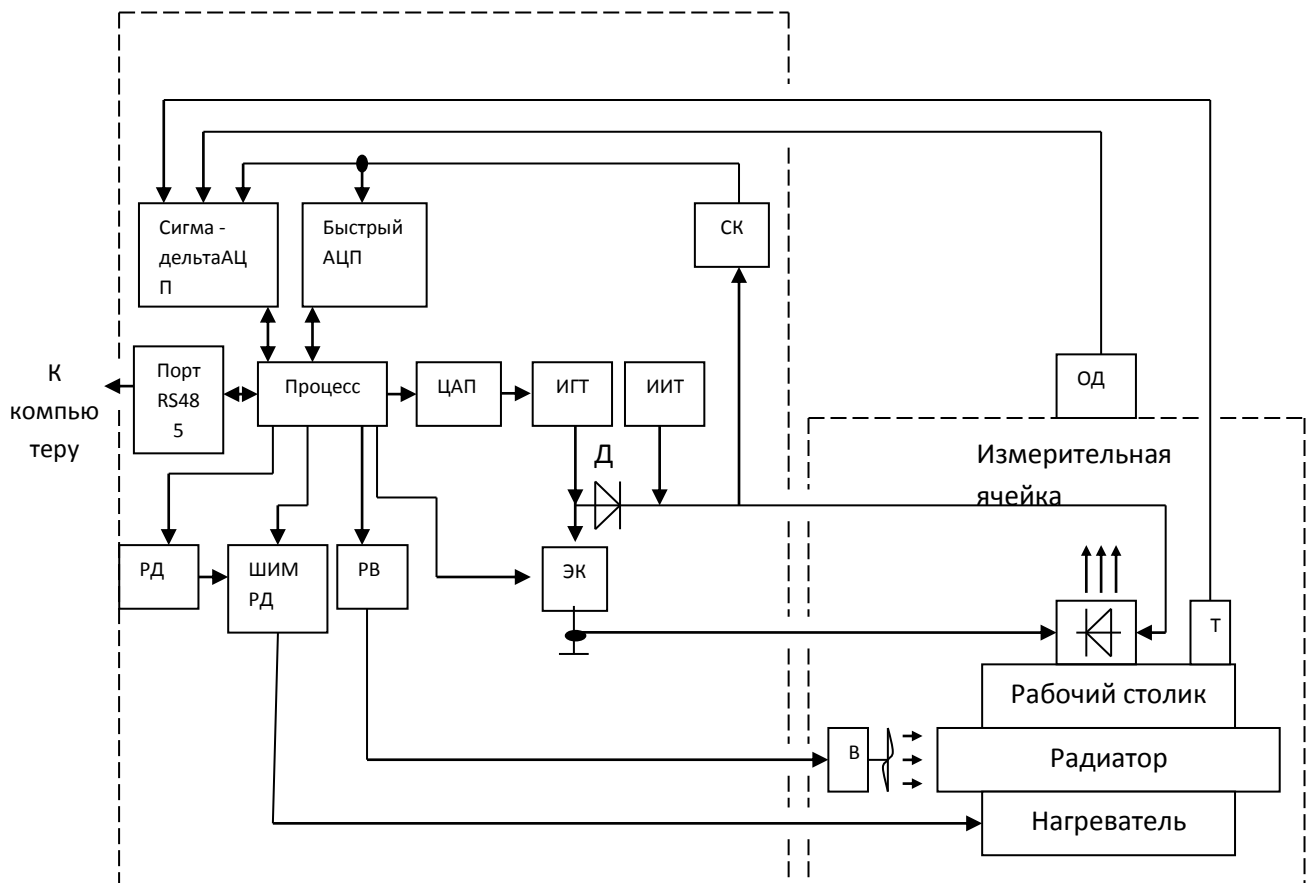


Рисунок 2.10 - Структурная схема установки измерения теплового сопротивления светодиодов

где, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; СК – согласующие каскады; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ИГТ – источник греющего тока; ИИТ – источник измерительного тока; ОД – оптический датчик; ДШ – диод Шоттки; РД – реле диапазонов; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; РВ – реле вентилятора; В – вентилятор; Т – термометр.

Измерение теплового сопротивления осуществляется следующим образом:

1. Электронный блок включает вентилятор, подает на исследуемый светодиод заданный греющий ток ($I_{Г}$) и осуществляет постоянное измерение температуры рабочего столика. При установке постоянной температуры на рабочем столике осуществляется измерение напряжения на светодиоде. В компьютере отражается измеренная температура рабочего столика (T_1) и напряжение при греющем токе ($U_{Г}$).

2. Электронный блок производит переключение с режима греющего тока на измерительный. Время переключения менее 100 наносекунд. Через 1 микросекунду, с интервалом 1 микросекунда, производится 5 измерений напряжения на светодиоде. Предполагая экспоненциальный закон остывания p-n перехода, экстраполируется напряжение к $U(\tau_3=0)$.

3. Через светодиод подается измерительный ток. Выключается вентилятор и включается нагрев столика. При нагреве измеряется напряжение на светодиоде. При $U=U(\tau_3=0)$ измеряется и передается в компьютер температура рабочего столика (T_2).

4. Тепловое сопротивление определяется по формуле:

$$R_T = (T_2 - T_1) / (I_{Г} * U_{Г} - P_{И}), \quad (2.1)$$

где R_T – тепловое сопротивление p-n-переход – внешняя среда; $P_{И}$ – мощность излучения светодиода. Среднеарифметическое из 10 запомненных температур передается в компьютер (t_p). Компьютер выдает на экран монитора следующие значения:

- температура p-n – перехода (t_p);
- перегрев ($t_p - t_0$);
- тепловое сопротивление R_T .

Погрешность измерений теплового сопротивления не превышает $\pm 10\%$.

2.2.3 Методика измерения спектральных характеристик

Для исследования спектральных характеристик и цветовой температуры полупроводниковых источников света использовали волоконные спектрометры типа USB2000 и Avantes [68]. С возможностью компьютерной обработки результатов измерений и с последующим расчетом цветовой температуры и индекса цветопередачи.

Спектральный диапазон измерений от 190 нм до 900 нм с разрешением по спектру порядка 1 нм. Схема измерений спектрометром USB2000 представлена на рисунке 2.11.

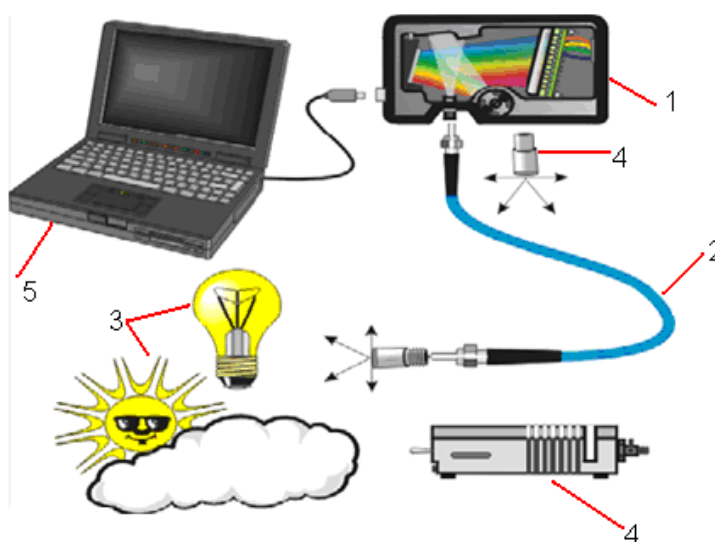


Рисунок 2.11 - Схема для измерения спектра излучения источника света: 1 – спектрометр USB2000; 2 – световоды; 3 – эталонные источники света; 4 – полупроводниковые источники света; 5 – компьютер

Для более точных измерений использовался спектральный комплекс Avantes с охлаждаемым фотоприемником (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 - Общий вид системы для исследования спектральных и цветовых характеристик светодиодов на основе блока Avantes

2.2.4 Измерение мощности и внешнего квантового выхода излучения

Для исследований мощности излучения используется специальное устройство, разработки ОАО НИИПП (Томск) с интегрирующей сферой и фотодиодом ФД-24К. Для проведения исследований необходимо вставить источник в приемное устройство и подключить его к источнику питания постоянного тока. Внешний вид установки приведен на рисунке 2.13. Структурная схема установки – рисунок 2.14.



Рисунок 2.13 - Внешний вид установки измерения мощности излучения источников света

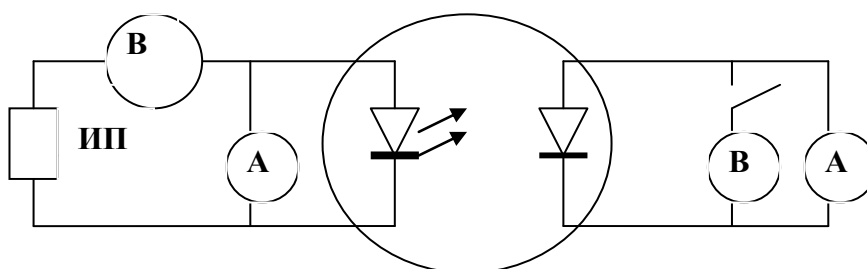


Рисунок 2.14 - Структурная схема установки

В данной работе для измерения абсолютной мощности источников света используется градуированный кремниевый фотодиод типа ФД-24К с большой рабочей поверхностью. Если фотодиод, имеющий дифференциальное

сопротивление r_{ϕ} , замкнуть на внешнее сопротивление $R \ll r_{\phi}$, то ток короткого замыкания $I_{кз}$ в цепи определяется только внутренними свойствами диода [65].

Чувствительность фотодиода можно также характеризовать отношением $I_{кз}$ к мощности падающего излучения (размерность А/Вт или мкА/мкВт). Максимальная чувствительность фотодиода ФД-24К $S_M = 0,54$ А/Вт. Внешний квантовый выход η определяется как отношение интегрального по всему спектру числа излученных квантов Φ , выходящих во внешнюю среду по всем углам, к числу электронов, пересекающих p-n переход в единицу времени.

$$\eta = \frac{\Phi q}{I} = \frac{\eta_{\text{опт}} \Phi q}{I} = \eta_{\text{опт}} \eta, \quad (2.2)$$

Мощность излучения измеряют с помощью фотодиода ФД-24К, регистрируя ток короткого замыкания с помощью микроамперметра. Электрическая мощность на фотодиоде равна $P = I_{кз} U_{хх}$. Таким образом, мощность излучения светодиода определится как,

$$P_{\text{изл}} = I_{кз} U_{хх} K^{-1}, \quad (2.3)$$

где K – коэффициент собирания, для данного устройства равен 0,05.

2.2.5 Гонио-фотометрический метод измерения величины светового потока, диаграммы направленности и координат цветности источников света

Метод основан на пошаговой фиксации значений силы света при повороте источника на известный угол на каждом шаге. Для этих целей используются приборы: гониометр с достаточным угловым разрешением и фотометрическая головка с известным коэффициентом преобразования. При этом выполняются измерения пространственного распределения силы света, по которому рассчитывается световой поток [66-68].

Диапазон углового сканирования должен охватывать весь телесный угол, в котором испытываемый источник испускает свет. Расстояние между фотометром и калибруемым изделием должно быть не менее 300 мм. При измерении

пространственного распределения силы света $I_{(\theta,\varphi)}$ полный световой поток определяется из формулы [67]:

$$\Phi = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (2.4)$$

В полярных координатах (θ – угол от нормали к плоскости излучателя, φ – угол в плоскости излучателя) задается диаграмма направленности силы света I_v [лм]= $I_v(\theta)$. Диаграмма обладает круговой симметрией по углу φ , т.е.

$$I_v(\varphi) = \text{const.}$$

Световой поток

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v(\Omega) * d\Omega = \iint_{\theta,\varphi} I_v(\theta, \varphi) * \sin(\theta) * d\theta * d\varphi, \quad (2.5)$$

Интегрируя по углу φ , получим искомую формулу:

$$\Phi_v = 2 * \pi * \int_{\theta} I_v(\theta) * \sin(\theta) * d\theta, \quad (2.6)$$

Из гониометрических измерений возможно найти мощность излучения, используя значение светового потока и спектр плотности мощности излучения $P_{e\lambda}(\lambda) \left[\frac{\text{отн.ед.}}{\text{нм}} \right]$. В абсолютных единицах спектр плотности мощности излучения имеет вид:

$$P_{e\lambda}^0 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{нм}} \right] = K * P_{e\lambda}[\text{отн. ед./нм}], \quad (2.7)$$

где K – коэффициент пропорциональности. Соответственно световой поток

$$\Phi_v[\text{лм}] = 683 * \int_{380}^{750} V(\lambda) * P_{e\lambda}^0(\lambda) * d\lambda = 683 * \int_{380}^{750} V(\lambda) * K * P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda = K * 683 * \int_{380}^{750} V(\lambda) * P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda, \quad (2.8)$$

Мощность излучения

$$P[\text{Вт}] = \int_{380}^{750} P_{e\lambda}^0(\lambda) * d\lambda = \int_{380}^{750} K * P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda = K * \int_{380}^{750} P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda, \quad (2.9)$$

Люмен-эквивалент излучения - отношение светового потока белого света к его мощности

$$\text{ЛЭ} \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] = \frac{\Phi_v[\text{лм}]}{P[\text{Вт}]}, \quad (2.10)$$

$$\text{ЛЭ} = (K * 683 * \int_{380}^{750} V(\lambda) * P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda) / (K * \int_{380}^{750} P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda), \quad (2.11)$$

Таким образом, определяется мощность излучения:

$$P[\text{Вт}] = \frac{\Phi_v[\text{лм}]}{\text{ЛЭ}[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}]}, \quad (2.12)$$

$$\text{ЛЭ} = 683 * \int_{380}^{750} V(\lambda) * P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda / \int_{380}^{750} P_{e\lambda}(\lambda) * d\lambda, \quad (2.13)$$

Из спектрального распределения интенсивности излучения, определяются цветовые характеристики. Каждый цветовой оттенок, характеризующийся спектральной плотностью мощности излучения $P_{e\lambda}(\lambda)$, можно выразить набором трех параметров [67-71]:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.14)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.15)$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2.16)$$

где X, Y, Z - значения трёх основных цветов, соответствующих энергиям возбуждения каждой из составляющих трех основных цветов (красного, зеленого и синего), необходимых для получения излучения белого цвета. Значения X, Y, Z указывают на количество красного, зеленого и синего цвета в спектре $P_{e\lambda}(\lambda)$. На практике удобнее использовать координаты цветности (x, y) , которые рассчитываются по формулам:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (2.17)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad (2.18)$$

Отсюда видно, что значение координаты цветности определяет степень возбуждения одной из групп цветовых рецепторов, деленную на нормированное суммарное возбуждение $(X+Y+Z)$. Значение координаты z вычисляется при помощи аналогичного выражения [66-68]:

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y, \quad (2.19)$$

2.3 Оборудование для испытаний на надежность и долговечность

Для проведения испытаний изделий электронной техники и материалов на воздействие пониженных и повышенных температур под электрической

нагрузкой в соответствии с требованиями военных стандартов: ГОСТ 20.57.406-81, ГОСТ РВ20.57.416-8, а также отечественных и международных стандартов: МЭК 88-2-2-74 (ГОСТ 28200-89) 747-11, ГОСТ 20.57.406-81, ОСТ 11 0730В-83 используют специальные Камеры (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 - Камера КТХ-0,08-01 [72]

Камера обладает следующими характеристиками [72]:

- диапазон температуры внутри камеры - 60 - +155°C;
- колебания температуры по объему камеры $\pm 2^\circ\text{C}$;
- полезный объем камеры - 80 дм³.

Камера обеспечивает [72]:

- задание и контроль режимов испытаний со ступенчатым или циклическим изменением режимов;
- формирование и индикацию режимов и результатов функционирования;
- выдачу результатов измерения параметров и справочную информацию аварийного и фактического состояния испытаний.

Для ввода в пространство рабочей камеры измерительных приборов, сигнальных и питающих проводов, на левой стенке камеры расположено проходное отверстие. В камере обеспечивается возможность проведения испытаний по самостоятельно задаваемым пользователем программам. Управление охладителем и электронагревателем осуществляет электронный

температурный контроллер. В качестве датчиков температуры используются термоэлектрические преобразователи. Так же для испытаний использовалось стандартное оборудование ОАО НИИПП: испытательные стенды, источники питания, контактные устройства.

2.4 Методы испытаний на надежность и долговечность

2.4.1 Рекомендации по проведению испытаний

При испытаниях и измерениях электрических параметров источников света необходимо использовать теплоотвод, обеспечивающий температуру корпуса источника света в соответствии с режимом испытаний. Площадь поверхности теплоотвода должна быть не менее 8 см^2 на 1 Вт мощности потребляемой источником. Измерение постоянного прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ проводят по ГОСТ 25024.3 в режимах и условиях, указанных в технических условиях. Погрешность измерения постоянного прямого напряжения не более $\pm 5 \%$ с вероятностью 0,95. Определение цветовой температуры светодиода производят с помощью спектрокалориметра ТКА-ВД. Погрешность измерения – $\pm 10 \%$. Цветовая температура источника должна соответствовать значениям, установленным в технических условиях. Отклонение измеренной цветовой температуры на величину погрешности измерения не является браковочным признаком. Определение координат группы цветности производят по ГОСТ 25024.7с помощью спектрокалориметра ТКА-ВД. Погрешность измерения координат группы цветности (x, y) – не более $\pm 0,01$. Отклонение измеренных значений координат группы цветности от норм на величину погрешности измерения не является браковочным признаком. Измерение светового потока Φ_v проводят с помощью фотометрического блока, выполненного на основе фотометрического шара. Измерение проводят с использованием контрольных светодиодов. Измерения могут проводиться, как при постоянном, так и при импульсном токе питания, что определяется быстродействием прибора (оборудования),

измеряющего фототок. Перед началом измерения светового потока Φ_v проводят градуировку фотометрического шара по трем контрольным светодиодам с цветовой температурой, отличающейся от цветовой температуры испытуемых светодиодов не более чем на величину ± 500 К. Доверительная граница погрешности результата измерения светового потока составляет ± 15 % при доверительной вероятности – 0,95. Испытания на безотказность проводят при температуре среды 85 ± 3 °С при рабочем токе. Погрешность поддержания электрического режима испытаний $\pm 5\%$. Контроль работоспособности светодиодов в процессе испытания проводят проверкой их светимости. Время выдержки после окончания испытания перед измерением параметров-критериев годности – не менее 1 ч [73-76].

Испытание на долговечность проводят в нормальных климатических условиях в течение 100 000 ч. Допускается проводить ускоренные испытания при температуре окружающей среды 85 °С с коэффициентом ускорения – $K=25$. Проверку работоспособности светодиодов проводят через каждые сутки контролем их светимости. После окончания испытаний светодиоды выдерживают в нормальных климатических условиях не менее 1 ч, проводят внешний осмотр и измеряют параметры-критерии годности [73,76].

2.4.2 Методы анализа отказов полупроводниковых источников света после ускоренных испытаний

Для анализа отказов в работе использовали методы электронной растровой, оптической и атомно-силовой микроскопии, рентгеноспектрального анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния. Регламент анализа отказов проводился в соответствии с ГОСТ Р 27.301.2011 [74].

2.5 Выводы

1. Для полной оценки работоспособности и надежности полупроводниковых источников света необходимы комплексные исследования электрических, оптических и теплофизических характеристик.
2. Предпочтение должно отдаваться апробированным и стандартизированным методам исследования.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА

Одним из важнейших параметров полупроводниковых светодиодов синего и белого света на основе нитрида галлия является температура активной области кристалла, которая, в значительной мере определяет величину светоотдачи, спектр излучения, а также эксплуатационную надежность и срок службы источников [1,2]. При условии соблюдения оптимального теплового режима, срок службы диодов может достигать более 100000 часов, нарушение же теплового режима (повышение температуры кристалла более 115...125°C) может привести к снижению срока службы более чем в 10 раз.

Поэтому, обычно, при эксплуатации полупроводниковых приборов стараются добиться минимально возможной температуры активной области кристалла; за основной параметр берут максимально-допустимую рабочую температуру. При ускоренных испытаниях важно поддержание такой температуры кристалла, которая обеспечивает требуемый коэффициент ускорения. Причем точность поддержания температуры во время всего периода испытаний, а это 500-2000 часов, должна быть не хуже, чем $\pm 2^\circ\text{C}$. В простейшем случае температура испытаний может быть задана температурой внешней среды или температурой радиатора, помещенного в испытательную камеру. Точное определение температуры активной области кристалла в процессе их эксплуатации и испытаний представляет собой технически сложную задачу при этом существует несколько проблем [26,77-81]:

1. источники света при эксплуатации и испытаниях находятся в составе различных устройств, содержащих другие тепловыделяющие элементы, такие как другие светодиоды, драйверы, стабилизаторы, нагрузочные резисторы, которые ограничивают возможности отвода тепла и приводят к дополнительному нагреву контролируемого объекта;
2. источники света эксплуатируются и испытываются в широком температурном диапазоне окружающей среды от -60 до 85°C , а все

теплофизические характеристики материалов, из которых выполнены элементы, входящие в состав устройства зависят от температуры;

3. в процессе эксплуатации и испытаний происходит уменьшение внешней квантовой эффективности источника, что приводит к увеличению тепловыделения в кристалле;
4. прямой ток исследуемых источников света, согласно ТУ, может изменяться в широких пределах от единиц мА до 700 мА, следовательно, как уже отмечалось в главе 1, при повышенных значениях тока происходит локализация его плотности по поверхности и объему кристалла, что приводит к появлению участков с высокой температурой.

Наиболее распространенными методами оценки температуры кристалла является её расчет с использованием измеренной величины теплового сопротивления р-п переход-корпус [77-81].

3.1 Расчет теплового сопротивления источника света

Внешний вид кристалла источника света представлена на рисунке 3.1. На рисунке 3.2. изображена структура кристалла.

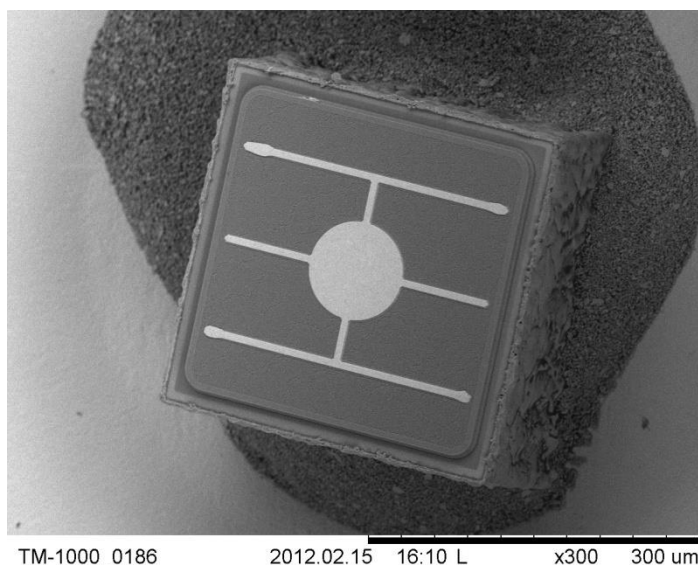


Рисунок 3.1 - Внешний вид кристалла источника света, соединенного с корпусом с помощью электро- и теплопроводящего клея

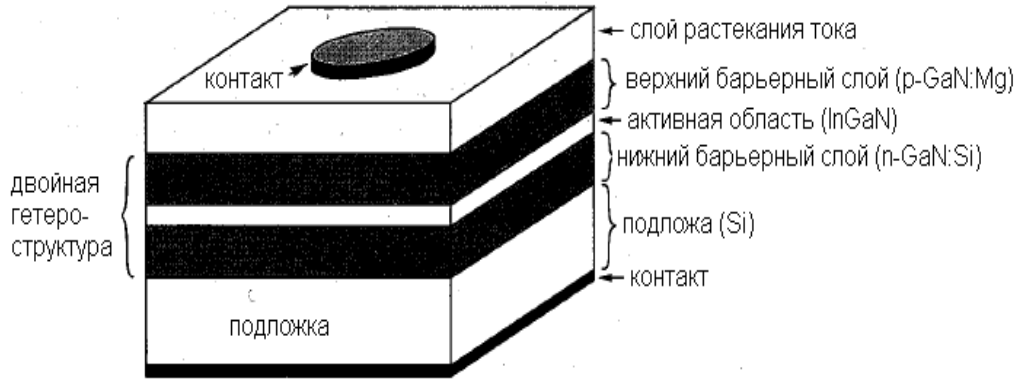


Рисунок 3.2 - Схема модели кристалла для теплового расчета

Кристалл, суммарной толщиной h (100 мкм) и с эффективным коэффициентом теплопроводности λ_0 одним торцом закреплен на металлическом основании корпуса типа 5050 с коэффициентом теплопроводности λ_1 . В объеме кристалла в области омического контакта имеющего вид круга радиусом a_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 τ в кристалле будет описываться уравнением теплопроводности Лапласа [82]:

$$\frac{d^2T(r,z)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r,z)}{dr} + \frac{d^2T(r,z)}{dz^2} = 0, \quad (3.1)$$

при граничных условиях:

$$\left. \frac{dT(r,z)}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{dT(r,z)}{dr} \right|_{r=a_0} = 0, \quad -\lambda_0 \frac{dT(r,0)}{dz} = q_0, \quad 0 < r < a_0, \\ -\lambda_0 \frac{dT(r,z)}{dz} = \lambda_1 \frac{dT(r,z)}{dz}, \quad z = h, \quad (3.2)$$

Решение этого уравнения для средне поверхностной температуры, полученное методом разделения переменных и последующего интегрирования, имеет вид:

$$T(r, 0) = q_0 \frac{1}{\lambda_0} \left\{ \frac{ha_0^2 \pi \lambda_0}{4r_0^2 \lambda_1} + \frac{ha_0^2}{r_0^2} + 4r_0 \sum_i J_i^2(\mu_k) \frac{a_0}{r_0 \mu_k J_0^2(\mu_k)} * \frac{\frac{h}{r} + 4\lambda / (\pi \mu_k t h (\frac{\mu_k h}{r_0}))}{h / (r_0 t h (\frac{\mu_k h}{r_0} + \frac{4\lambda_1}{\lambda_0 \pi}))} \right\}, \quad (3.3)$$

где μ_k – корни уравнения $J_1(\mu_k) = 0$;
 $J_0(\mu_k)$ и $J_1(\mu_k)$ – функции Бесселя.

Полученная формула учитывает эффект растекания тепла в объеме кристалла от активной области до высокотеплопроводной кремниевой подложки. Некоторую неопределенность вносит установление величины теплопроводности GaInN и легированного кремнием слоя n-GaN. Чистый GaN имеет высокое значение теплопроводности достигающей величины 130-150 Вт/мК, но его легирование приводит к резкому снижению этого значения до 30-40 Вт/мК.

Расчет по приведенным формулам позволяет оценить тепловое сопротивление и соответственно температуру кристалла. При рабочем токе 350 мА тепловое сопротивление кристалла будет равно 17 °С/Вт. Для практических расчетов формулу (3.3) возможно аппроксимировать выражением вида

$$R_T \approx \frac{1}{2\pi\lambda r_h} \arctan\left(\frac{2h}{r_h}\right), \quad (3.4)$$

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

С помощью аналогии между тепловым процессом и электрической цепью может быть рассмотрена передача тепла через другие элементы в виде нескольких сопротивлений, включаемых последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Структура электрической схемы должна соответствовать реально происходящим направлениям и процессам передачи тепла. При передаче тепла посредством теплопроводности сопротивление R_T зависит от физических свойств материала, через который проходит тепловой поток, и его геометрических размеров. Тепловое сопротивление вычисляют по формуле:

$$R_T = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (3.5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м °С);

δ — толщина материала, через который проходит тепловой поток, м;

S — поперечное сечение материала, м².

Значения коэффициента теплопроводности некоторых материалов, часто применяемых при отводе тепла от нагретых компонентов в электронике, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициентов теплопроводности

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ² С)
Алюминий	200
Кремний органика	0,2
GaN-GaInN	30
Токопроводящий клей (DIEMET)	60

Проведем оценку перепада температур в конструкции источника света, расположенного на испытательной плате (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Источник света КИПД154А в корпусе 5050 на испытательной плате

Кристалл приклеен к основанию корпуса. Корпус светодиода присоединяется к испытательной печатной плате, на которой располагаются и другие светодиоды. Для расчета составим схему, показанную на рисунке 3.4.

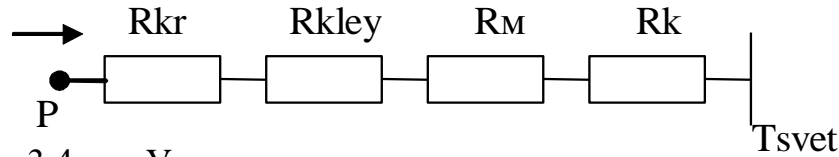


Рисунок 3.4 - Условная схема, соответствующая передаче тепла от кристалла: R_{kr} – тепловое сопротивление кристалла; R_{kley} – тепловое сопротивление токопроводящего клея, расположенного между кристаллом и основанием корпуса; R_m – тепловое сопротивление основания корпуса (катода); R_k – тепловое сопротивление корпуса.

В схеме не учитывается теплоотвод через проволочный вывод и люминофор.

Рассчитаем тепловое сопротивление клея:

Тепловое сопротивление клея рассчитываем по формуле

$$R = \frac{\delta_{KLEY}}{\lambda_{KLEY} \cdot S_{KLEY}} \cdot R_k = \frac{0,00003}{60 \cdot 9 \cdot 10^{-8}} \text{ } ^\circ\text{C} / B_T = 6,6 \text{ } ^\circ\text{C} / B_T., \quad (3.6)$$

где λ_{KLEY} - коэффициент теплопроводности клея ($60 B_T / (M \cdot ^\circ\text{C})$, таблица 3.1);

δ_{KLEY} - толщина клея (30 мкм);

S_{KLEY} - площадь клея, по которому проходит тепловой поток, равная площади кристалла ($9 \cdot 10^{-8} M^2$).

Тепловое сопротивление основания корпуса вычисляют по формуле

$$R_M = \frac{\delta_M}{\lambda_M \cdot S_M}, \quad (3.7)$$

где λ_M - коэффициент теплопроводности основания корпуса ($100 B_T / (M \cdot ^\circ\text{C})$, таблица 3.1);

δ_M - толщина основания (0,05мм);

S_M - площадь кристалла (0,09 мм²).

Подставим данные из таблицы (3.1) в формулу (3.7), получим:

$$R_M = \frac{0,00005}{100 \cdot 9 \cdot 10^{-8}} \text{ } ^\circ\text{C} / B_T = 5,5 \text{ } ^\circ\text{C} / B_T., \quad (3.8)$$

Определим тепловое сопротивление вносимое слоем клея, расположенного между корпусом и испытательной платой по формуле (3.6):

$$R_{KLEY} = \frac{30 \cdot 10^{-5}}{60 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт} = 0,6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{Вт}, \quad (3.9)$$

Таким образом, суммарное тепловое сопротивление активной область кристалла- испытательная плата равно $29,7^\circ\text{C}/\text{К}$.

Тепловое сопротивление испытательной платы, возможно рассчитать, используя простую модель: неограниченная пластина с локальным круговым источником тепла в центре; отвод тепла с поверхности пластины осуществляется за счет конвекции. Расчет подобной модели проведен Дутьневым Г.Н [80]. В таблице 3.2 представлены значения теплового сопротивления элементов модели.

Таблица 3.2 - Тепловое сопротивление элементов модели

Элемент тепловой модели	Тепловое сопротивление $^\circ\text{C}/\text{Вт}$
Кристалл	17
Клей	6,6
Основание корпуса	5,5
Клей	0,6
Плата из плакированного алюминия	2
Радиатор	1,5
Общее тепловое сопротивление	33,2

Из таблицы следует, что суммарное тепловое сопротивление $33,2^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Температура активной области кристалла, с учетом мощности излучения (40% от электрической мощности), светодиода при испытаниях при нормальных условиях $+25^\circ\text{C}$ и при прямом токе 60 мА составит $28,7^\circ\text{C}$, а при токе 350 мА 51°C . На рисунке 3.5 представлена расчетная зависимость температуры кристалла от источника света КИПД154А92 в зависимости прямого тока, для температуры корпуса $+25^\circ\text{C}$ и $+85^\circ\text{C}$.

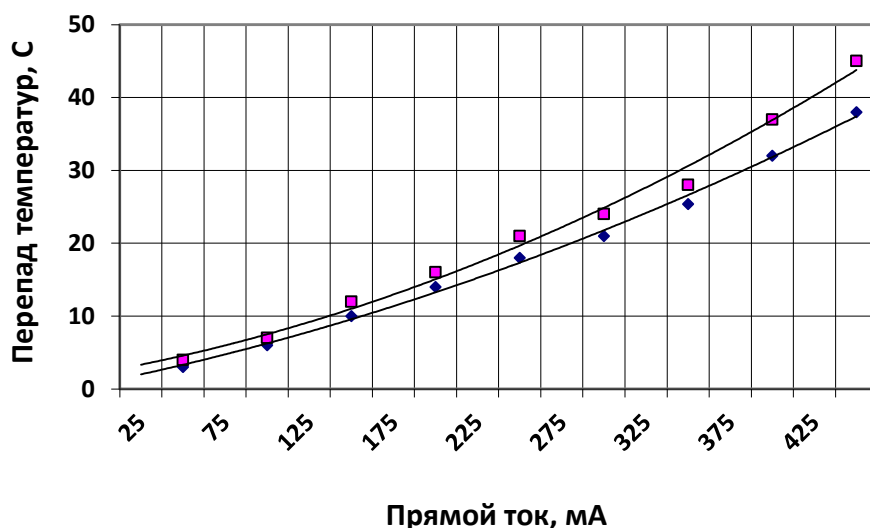


Рисунок 3.5 - Расчетная зависимость перепада температуры кристалл-корпус КИПД154А92 в корпусе 5050-1 в зависимости от прямого тока при температуре корпуса +25°C (нижний график) и +85°C (верхний график)

Таким образом, для расчета температуры кристалла необходимо знать точное значение теплового сопротивления: активная область кристалла-корпус (до места пайки), тепловое сопротивление печатной платы и тепловое сопротивление радиатора [83-85].

3.2 Измерение теплового сопротивления полупроводниковых источников света КИПД154А92 в корпусах типа 5050-1,2

Измерение теплового сопротивления переход-корпус проводилось на специально сконструированной для этой цели установке УТС, описание которой приведено в главе 2. Так как тепловое сопротивление R_{j-p} является важнейшим параметром источника света, то требуется его точное измерение. Для этих целей применяются различные методы, в основу которых положено косвенное измерение температуры активной области при фиксированном значении электрической мощности. В качестве термочувствительного параметра выбирают прямое падение напряжения, изменение длины волны максимума излучения,

полуширину спектра излучения, обратный ток и другие. Основными требованиями к выбранному термочувствительному параметру являются: его стабильность и воспроизводимость в диапазоне рабочих температур. Точность измерения теплового сопротивления R_{j-p} зависит не только от точности измерения температуры активной области, но и от точности задания температуры корпуса.

Отдельной проблемой для оценки теплового сопротивления полупроводниковых источников света является точное определение тепловой мощности выделяющейся в кристалле. Распространенное мнение, что в тепловую мощность превращается от 30 до 40 % потребляемой электрической мощности не всегда справедливо и требует экспериментальной проверки. В данной работе приводятся результаты, связанные с уточнением количества выделяющегося в кристалле тепловой мощности и её распределения по объему и поверхности полупроводниковой структуры. Перед измерением теплового сопротивления была проведена оценка выделяющейся в кристалле тепловой мощности. Электрическая мощность определялась, как произведение прямого тока на прямое падение напряжения. При этом необходимо учитывать их температурную зависимость (рисунок 3.6).

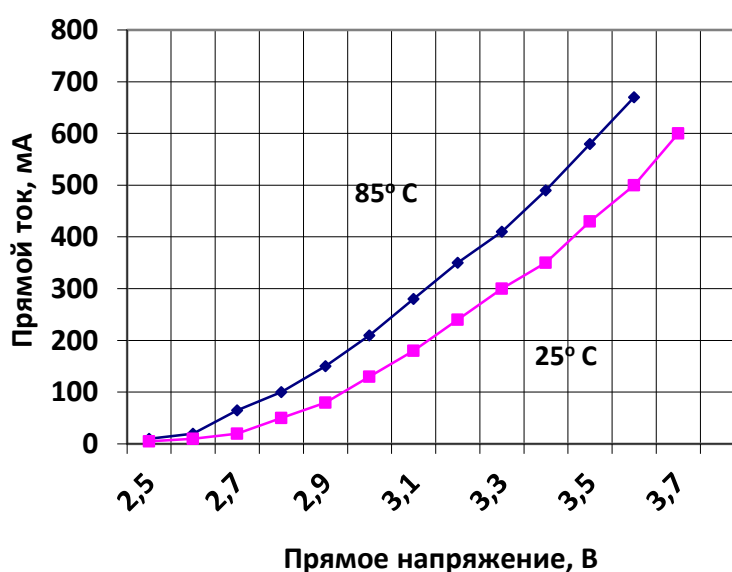


Рисунок 3.6 - Вольтамперные характеристики КИПД 154А при температуре корпуса 25°C и 85°C

Тепловая мощность определялась путем вычитания из электрической мощности оптического излучения прибора. Измерения полной мощности излучения проводились в интегрирующей сфере, по методике изложенной в главе 2. Для оценки величины поглощенной мощности в люминофорном покрытии, сначала измерялась мощность излучения светодиода без люминофорного покрытия, а затем того же диода, но с покрытием. Результаты измерений представлены в рисунке 3.7. Из результатов измерений следует, что мощность излучения исследуемых светодиодов без люминофора изменялась от 0,18 Вт при электрической мощности 0,25 Вт ($I_{пр} = 50$ мА), до 0,3 Вт при электрической мощности 1,25 Вт ($I_{пр} = 350$ мА). После нанесения люминофора на поверхность кристалла, мощность излучения уменьшалась на 15-20%, за счет потерь, как в самом люминофорном покрытии, так и за счет поглощения преобразованного излучения материалом и конструктивными элементами кристалла [86]. На рисунке 3.8 представлены результаты измерения температуры кристалла с помощью УТС. Зависимость 1 отражает зависимость температуры от величины рабочего тока для светодиода без люминофора, а зависимость 2 с нанесенным люминофором. Из зависимостей следует, что температура кристалла после нанесения люминофора увеличивается на 6К, что связано с дополнительным разогревом люминофора и ухудшением условий отвода тепла от кристалла из-за низкой теплопроводности кремний-органической связки люминофорного покрытия.

На рисунке 3.9 представлен график теплового сопротивления кристалл-корпус R_{j-p} исходя из анализа результатов представленных на рисунках 3.7 и 3.8.

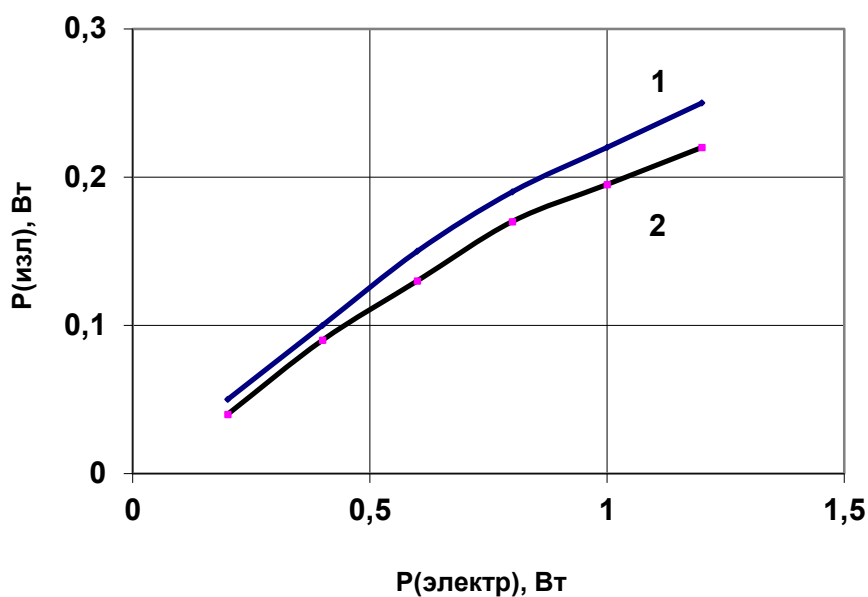


Рисунок 3.7 - Зависимость мощности излучения от подаваемой на КИПД 154 А92 электрической мощности, где 1- мощность излучения без люминофора; 2- мощность излучения с люминофором

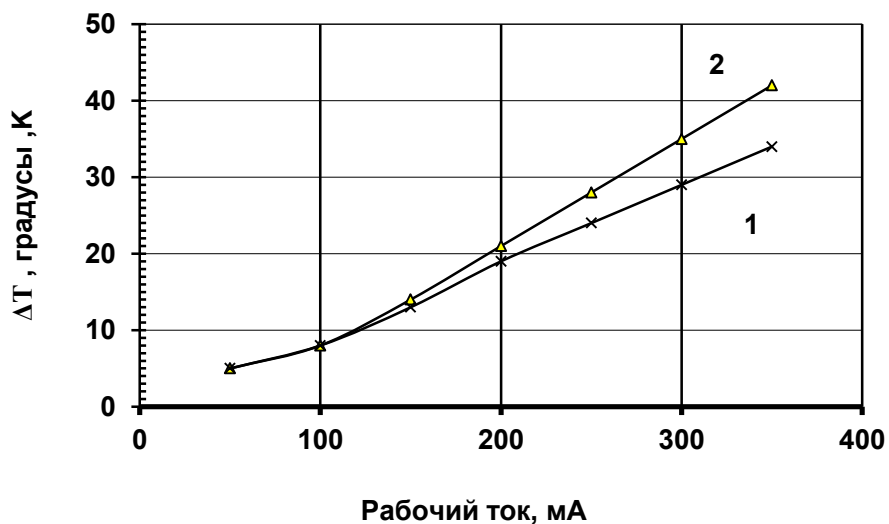


Рисунок 3.8 - Зависимость перепада температур ΔT активная область кристалла-окружающая среда от рабочего тока, где 1- диод без люминофора; 2- диод с люминофором. ($T_{\text{корпуса}}=45^{\circ}\text{C}$)

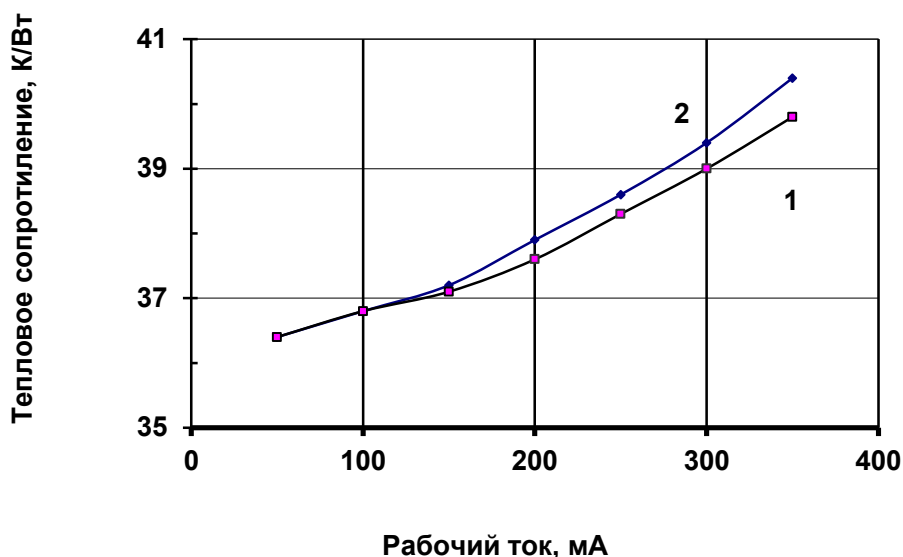


Рисунок 3.9 - Зависимость теплового сопротивления кристалл-корпус от рабочего тока, где 1- диод без люминофора; 2- диод с люминофором

Как следует из полученных результатов, величина определяемого теплового сопротивления не является постоянной для данного типа светодиодов, а зависит от величины рабочего тока. Причинами такой зависимости, вероятно, являются: локализация области тепловыделения, обусловленная неравномерностью распределения плотности тока в кристалле [85].

В таблице 3.3 представлены результаты измерений теплового сопротивления.

Таблица 3.3 - Результаты измерений теплового сопротивления

образец	T _{корп} , °C	I _г , мА	U _{сд} , В	P ₁ , Вт	T _{р-н} , °C	Rt(P ₁ -P ₂), °C/Вт	P _и , мВт	Rt(P ₁ -P _и), °C/Вт	Rt	
КИПД154 А92 Корпус К-2	27.24	100	3.36	0.34	31.89	14.23	84	18.40	13.81	
	28.35		3.36	0.34	32.89	13.95	83	17.97	13.53	
	30.52		3.35	0.33	35.37	14.96	83	19.30	14.51	
	32.82		3.34	0.33		13.89	83	17.94	13.48	
	34.32		3.33	0.33	38.79	13.84	83	17.89	13.43	
	35.68		3.32	0.33	40.34	14.44	83	18.67	14.00	
	36.85		3.32	0.33	41.55	14.63	82	18.85	14.19	
	37.88		3.31	0.33	42.36	13.94	82	17.96	13.52	
	27.27	150	3.53	0.53	34.81	14.50	132	18.95	14.23	
	32.45		3.50	0.53	39.79	14.23	131	18.59	13.96	
	28.71	200	3.66	0.73		14.81	182	19.44	14.61	
	36.23		3.62	0.72	46.76	14.76	180	19.37	14.55	
	КИПД 154А92 в корпусе 5050-1	27.01	100	3.319	0.332	35.32	25.82	82	33.26	25.04
		29.69		3.291	0.329	38.04	26.16		33.78	25.36
		29.66		3.290	0.329	38.19	26.73		34.52	25.91
29.69		3.290		0.329	38.06	26.24	33.90		25.45	
23.92		3.313		0.331	32.71	27.38	35.28		26.55	
29.69		3.287		0.329	38.63	28.05	36.24		27.20	
29.74		3.286		0.329	38.58	27.73	35.83		26.89	
29.56		3.287		0.329	38.48	27.97	36.13		27.12	
29.72		3.286		0.329	38.48	27.49	35.52		26.66	
29.74		3.286		0.329	38.42	27.25	35.21		26.42	
29.66		200	3.590	0.718	49.84	28.50	179	37.43	28.10	
29.69		350	3.687	0.922	56.33	29.21	230	38.50	28.90	

Продолжение таблицы 3.3

образец	T _{корп} , °C	I _г , мА	U _{сд} , В	P ₁ , Вт	T _{р-н} , °C	Rt(P ₁ -P ₂), °C/Вт	P _и , мВт	Rt(P ₁ -P _и), °C/Вт	Rt
КИПД15	29,8	150	3,5	0,31	60,5	47,2	130	61,75	46,4
4Г92 в корпусе 5050-2	25,2	200	3,7	0,74	75	66	185	87	49,6
	29,9	250	3,8	0,92	89	84	220	101	53,5

Как следует из результатов измерений, тепловое сопротивление источников света КИПД154А92 в корпусе 5050-1 почти в два раза выше, чем в корпусе 5050-2.

3.3 Измерение температуры перехода по длине волны максимума спектра излучения и полуширине спектра излучения

Использование в качестве термочувствительного параметра прямого падения напряжения может вносить существенные погрешности в определение точного значения температуры, так как основной вклад в величину падения напряжения могут давать омические контакты, а не сама активная часть кристалла. Кроме того, необходимость наличия электрического контакта создает труднопреодолимые проблемы при измерениях температуры источников света в процессе ускоренных испытаний. Поэтому при контроле температуры кристаллов источников света предпочтительными являются бесконтактные методы измерения, например, используя в качестве термозависимого параметра спектр излучения [1,2].

Известно, что форма спектра рекомбинационного излучения в полупроводниковом материале может быть описана выражением [1,2]:

$$I(h\nu) = B(h\nu - \Delta E_g)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.10)$$

где $I(h\nu)$ - интенсивность излучения; h - постоянная Планка; ν - частота колебаний фотонов; B – постоянная, которая рассчитывается по формуле [87]

$$B = \frac{2q^2 m_r^{3/2}}{nch^2 m_c}, \quad (3.11)$$

где m_c – эффективная плотность электронов; m_r – приведенная эффективная масса электрона и дырки; n - показатель преломления. Форма спектра (рис.3.10) зависит от температуры. Так интенсивность излучения изменяется по экспоненциальному закону [87]:

$$I(h\nu) \sim \sqrt{E - \Delta E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (3.12)$$

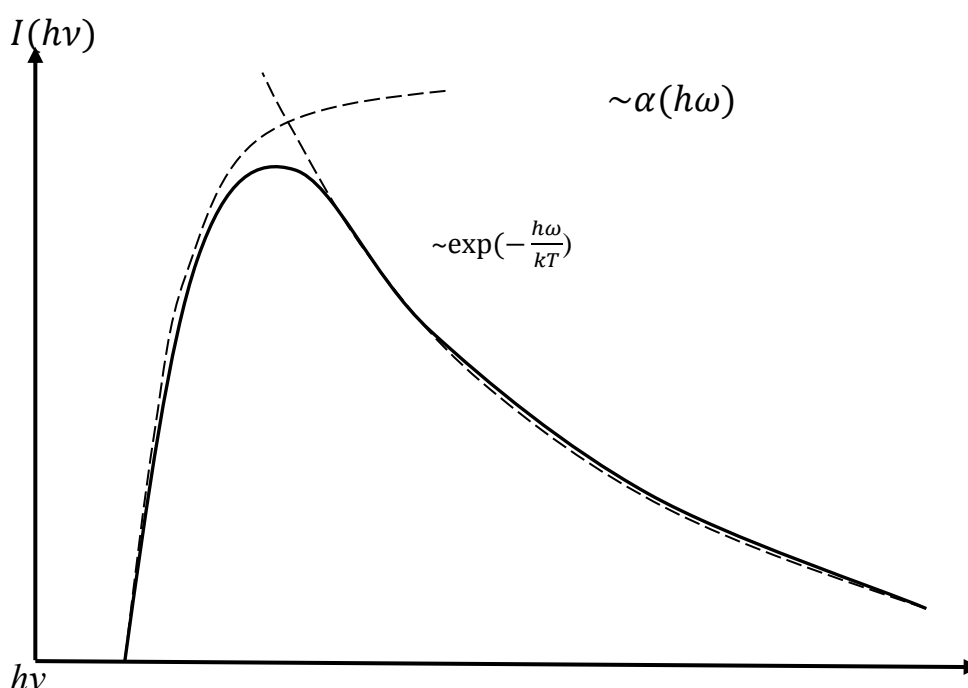


Рисунок 3.10 - Типичный спектр люминесценции полупроводникового материала

При увеличении температуры спектр излучения так же уширяется, а его максимум сдвигается в сторону низких энергий. Ширина спектра на уровне 0,5 от максимального значения, так же зависит от температуры и равна [87]:

$$\Delta E_{0,5} \approx 1,8kT \text{ или } \Delta \lambda_{0,5} \approx \frac{1,8 kT \lambda^2}{hc}, \quad (3.13)$$

Но подобная температурная зависимость справедлива только для гомоперехода. Для гетероструктуры GaN-GaInN со множественными квантовыми ямами зависимость формы спектра от температуры обусловлена изменением эффективной ширины запрещенной зоны ΔE_g^* , в простейшем случае определяемой как [86,88]:

$$\Delta E_g^* = \Delta E_g(\text{InGaN}) + E_{c1} + E_{v1} + \sum_i \Delta E_i, \quad (3.14)$$

где $\Delta E_g(\text{InGaN})$ – ширина запрещенной зоны InGaN; E_{c1} и E_{v1} – положения первых уровней размерного квантования для электронов и дырок в ямах; под знаком суммы содержатся другие виды вкладов в эффективную ширину зоны вследствие деформации пьезоэффектов, кулоновского взаимодействия электронов и дырок и другие. Все входящие в формулу параметры зависят от температуры, и следовательно дают свой вклад в форму и ширину спектра излучения.

Для гетероструктуры GaN-GaInN со множественными квантовыми ямами температурная зависимость полуширины линии излучения имеет следующий вид $\Delta E_{0.5} \approx 6,8kT$, причем уширение спектра происходит в основном в сторону меньших энергий (больших длин волн). Повышение температуры окружающей среды неоднозначно влияет на изменение величины внешнего квантового выхода. Так зависимость светового потока от температуры светодиода без люминофора может быть описана с помощью известной формулы[1]:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right), \quad (3.15)$$

где T_c характеристическая температура кристалла (для GaN $T_c=1600K$). Согласно экспериментальным данным температурный коэффициент для светового потока составляет порядка 1-1,5% на каждые 10°C перегрева.

При наличии люминофора температурная зависимость выхода люминесценции описывается формулой Мотта [89]:

$$\eta(T) = \frac{\eta_0}{1 + A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{kT}\right)}, \quad (3.16)$$

Где A - константа тушения; E_{α} - кажущаяся энергия активации тушения люминесценции; η_0 - квантовый выход люминесценции при комнатной температуре.

Температурная зависимость светового потока для светодиода с люминофором может иметь вид:

$$I(t) = I_{300} \exp\left(-\frac{T-300}{T_c}\right) \left(\frac{\eta_0}{1+A \exp\left(-\frac{E_{\alpha}}{kT}\right)}\right), \quad (3.17)$$

На рисунке 3.11 представлена температурная зависимость спектров излучения полупроводниковых источников белого света на основе гетероструктуры InGaN/GaN типа КИПД 154А92. Преобразование синего света кристалла в желто-красный производилось с помощью люминофора на основе смеси иттрий- и гадолиний-алюминиевого граната легированного церием типа ФЛЖ-7.

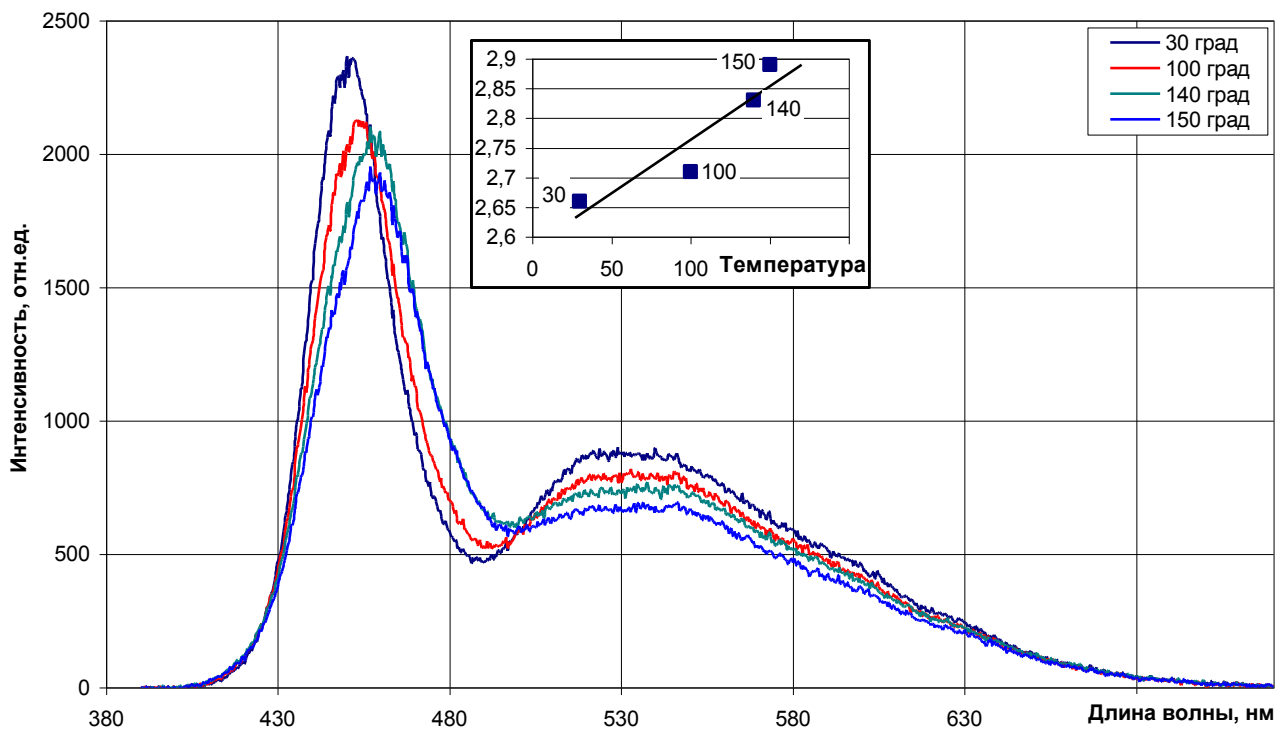


Рисунок 3.11 - Зависимость спектров излучения полупроводникового источника света; на вставке представлена температурная зависимость отношения максимумов спектров излучения кристалла, на длине волны 450-455 нм и люминофора на длине волны 530 нм [90]

Как следует из зависимостей, увеличение температуры приводит как к уменьшению интенсивности люминесценции, так и к сдвигу максимумов излучения в сторону более длинных волн. Причем с увеличением температуры изменение интенсивности люминесценции кристалла и люминофора происходит с различными скоростями, что связано с отличиями в энергиях активации температурного гашения люминесценции. Кроме того имеются некоторые различия и механизмах температурного гашения. Механизмы температурного гашения электролюминесценции в гетероструктурах InGaN/GaN подробно описаны в научно-технической литературе [1,2].

Следовательно, температурную зависимость полуширины спектра возможно использовать для контроля температуры активной области. Для этого необходимо провести калибровку спектра, проводя измерения при нескольких значениях температуры кристалла [90,91,94]. На практике это реализуется путем измерения в термостате в импульсном и непрерывном режимах при одном значении прямого тока. Очень важен импульсный режим измерений, исключающий процесс саморазогрева источника. Поэтому измерения проводят при длительности импульсов порядка 1 мкс и скважности не менее 1000. На рисунке 3.12 показаны зависимости полуширины спектра от температуры для импульсного тока для двух источников синего света, производства ОАО НИИПП (Россия) и фирмы SemiLed (Китай) в пластмассовом корпусе типа 5050 (без теплоотвода). Измерения проведены с помощью волоконного спектрометра типа USB2000.

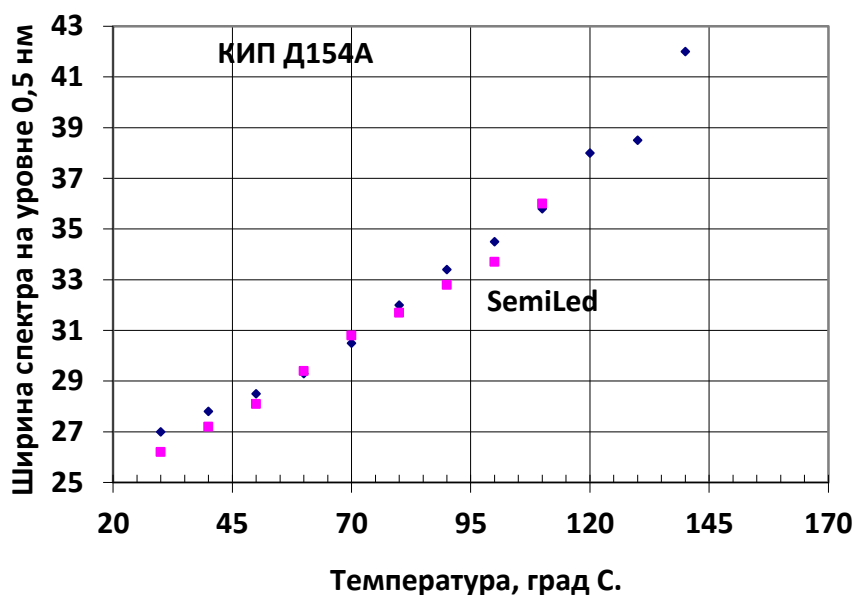


Рисунок 3.12 - Зависимость полуширины спектра на уровне 0,5 от температуры для двух типов источников света, при импульсном токе 350 мА

На рисунке 3.13 представлены измеренные зависимости перепада температур кристалл-корпус источников света КИПД154А92 и КИПД154Г92 при различных значениях рабочего тока.

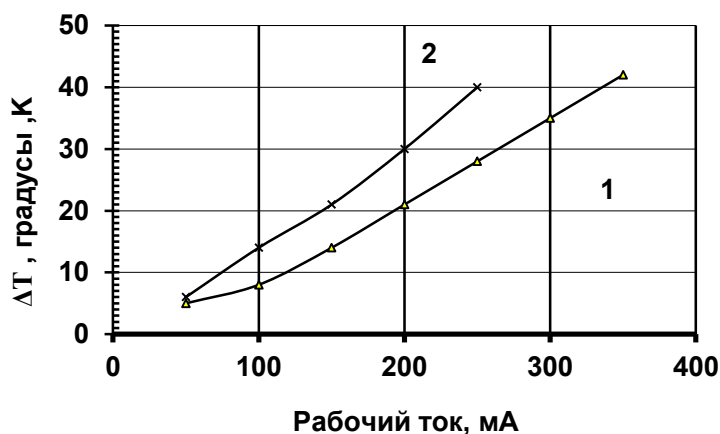


Рисунок 3.13 - Зависимость перепада температур ΔT активная область кристалла-окружающая среда от рабочего тока, где 1- КИПД 154А92 в корпусе 5050-1; 2- КИПД 154Г92 в корпусе 5050-2, ($T_{cp}=21^{\circ}C$)

Результаты, измерений длины волны в максимуме спектра излучения, при различных температурах приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Зависимость длины волны максимума спектра от температуры корпуса

	I=100мА							
T, °C	35	45	55	65	75	85	95	105
λ_{max} , нм	451,9	452,6	453,4	454	454,7	455,3	456,1	456,9

По полученным результатам построили калибровочную зависимость температуры от длины волны в максимуме $T = f(\lambda_{max})$, представленную на рисунке 3.14.

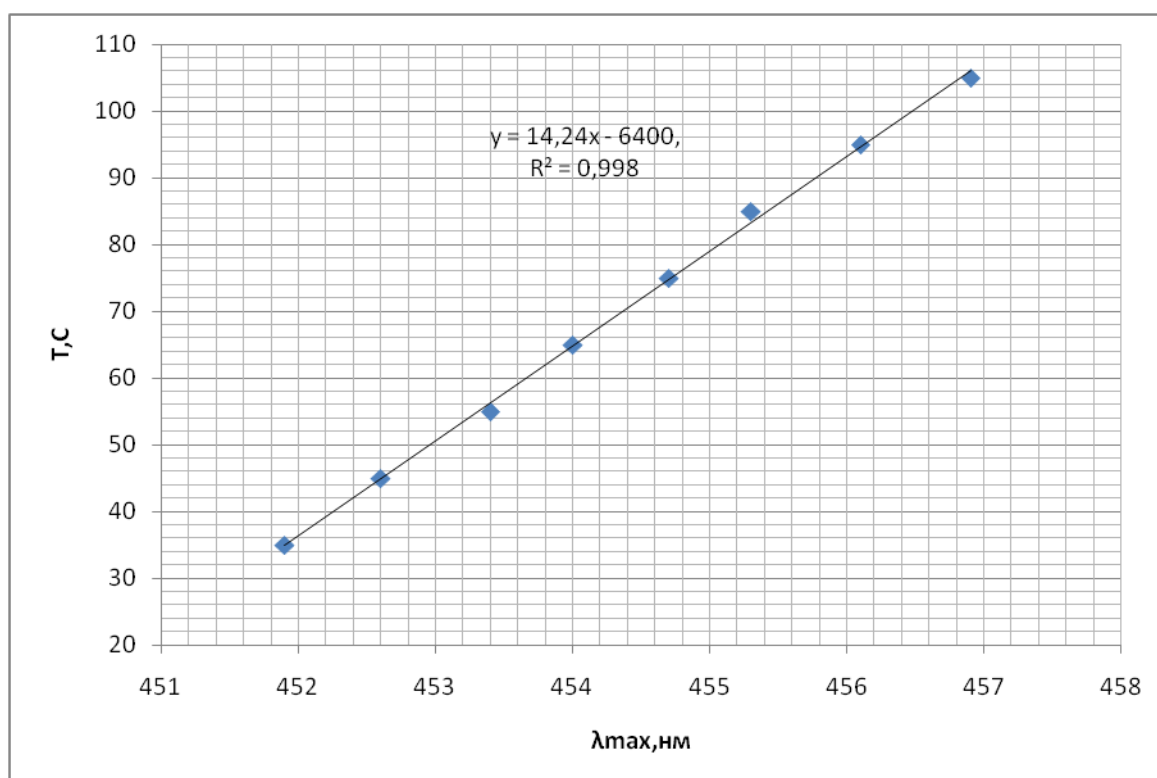


Рисунок 3.14 - Температурная зависимость длины волны в максимуме спектра излучения

После аппроксимации полученных экспериментальных точек получили линейную зависимость, описываемую уравнением:

$$T_{p-n} = 14,24 \cdot \lambda_{max} - 6400, \quad (3.18)$$

Таким образом, можно определить температуру р-п-перехода, зная зависимость представленную в формуле (3.18) и длину волны в максимуме спектра излучения.

3.4 Спектры излучения люминофоров

Для определения количества поглощенной люминофорным покрытием оптической мощности, и последующего определения количества, выделяющегося в нем тепла, были проведены исследования спектров поглощения и излучения в диапазоне рабочих длин волн и температур.

В работе исследовались два применяемых в производстве полупроводниковых источников света КИПД 154А92 люминофора: ФЛЖ-7 (ЗАО НПФ «Люминофор»), АWB-3 и FL.4255 (Китай). Для повышения точности измерений образцы полимерных покрытий различной толщины наносились на покрывное стекло(таблица 3.5)[90].

Таблица 3.5 – Исследуемые образцы люминофоров

Образец	Толщина, мкм
ФЛЖ-7-11 4-1	296
ФЛЖ-7-11 4-2	175
ФЛЖ-7-11 4-5	86
ФЛЖ-7-11 4-6	440
ФЛЖ-7-11 4-7	558
АWB-3	210

На рисунке 3.15 представлены спектры пропускания образцов люминофорного покрытия, толщина которых приведена в таблице 3.5.

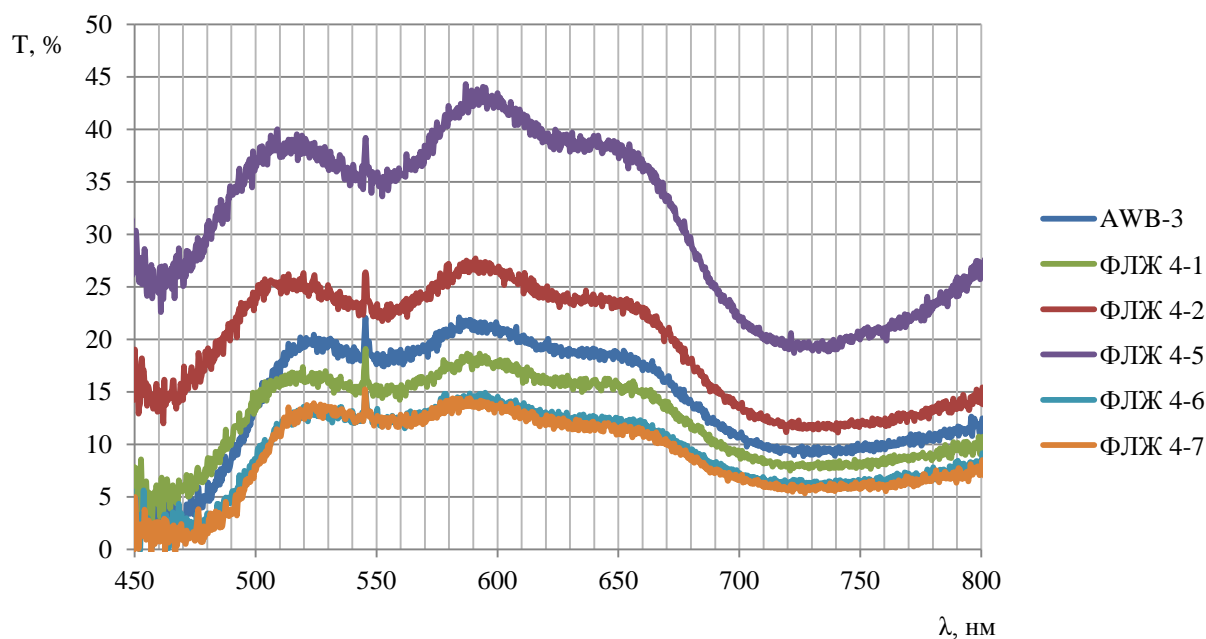


Рисунок 3.15 - Спектры пропускания люминофорного покрытия [90]

Поглощение люминофором излучения зависит от длины волны и достигает максимума при 440-470 нм. Типичное значение коэффициента поглощения при этой длине волны имеет величину 50^{-100}см^{-1} [92,93]. На рисунке 3.16 представлены полные спектры содержащие, как проходящее излучение длиной волны 455 нм, так и излучение люминофора с максимумом 550-560 нм. В спектре излучения ФЛЖ 4-1 отчетливо видны две части: широкий пик в области 450-500 нм – излучение синего света светодиода; и часть в области длин волн 500-650 нм – излучение люминофора. От соотношения этих частей зависит цветовая температура – важнейшая характеристика излучения. Люминофор имеет максимум в спектре люминесценции при 580-680 нм с полушириной полосы излучения 120-140 нм и при смешивании с излучением светодиода дает белый свет с цветовой температурой 4000-5000 К.

На этих же образцах были получены спектры излучения, возбуждаемых синим светом светодиода мощностью 1 Вт с длиной волны в максимуме 455 нм. Данные спектры содержат только излучение люминофора без излучения светодиода. Спектры люминесценции образцов при разной толщине люминофорного покрытия приведены на рисунке 3.17.

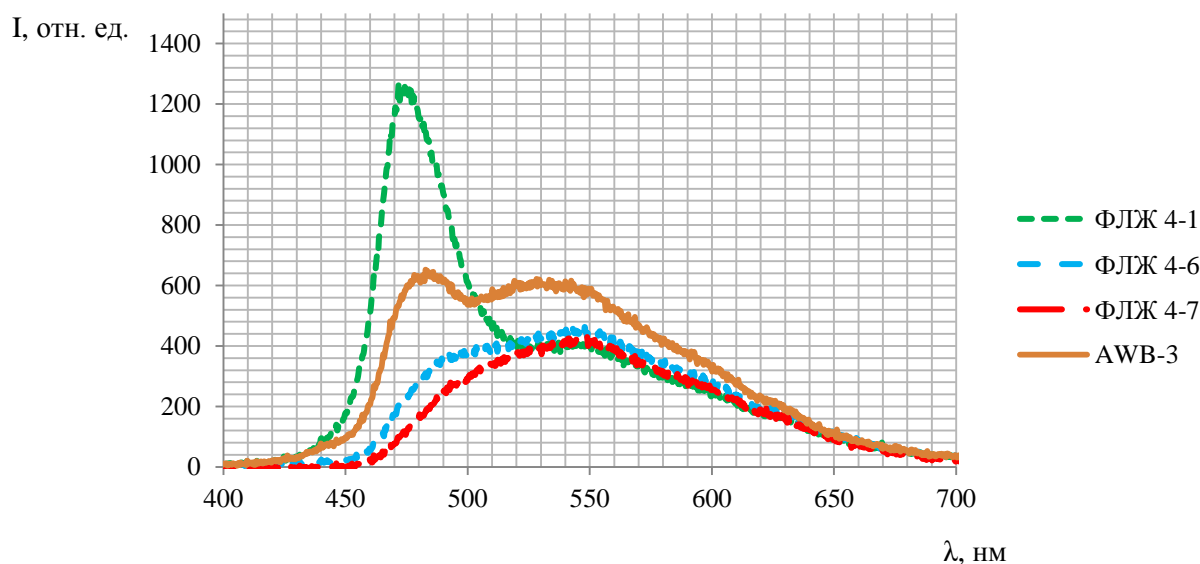


Рисунок 3.16 – Спектры излучения системы синий светодиод-люминофор

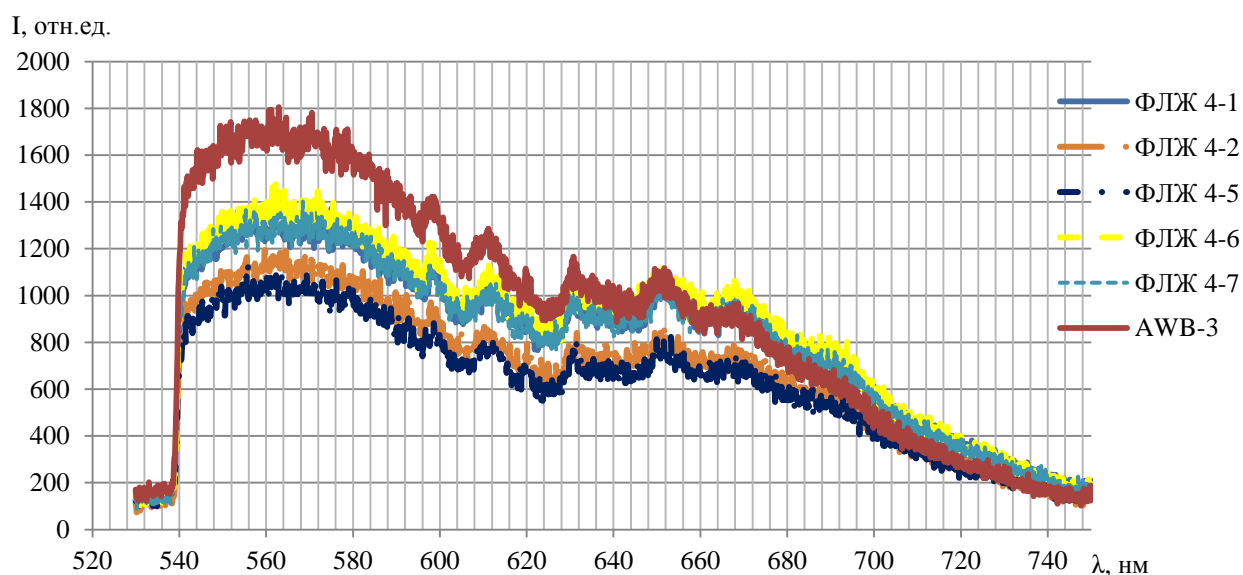


Рисунок 3.17 – Спектры излучения образцов, возбуждаемых светодиодом с длиной волны 455 нм

При увеличении толщины люминофорного покрытия наблюдается увеличение квантового выхода люминесценции, который достигает своего максимального значения в образце толщиной 440 мкм, а затем начинает снижаться [90,92-96].

Исследование спектров пропускания покрытий (рисунок 3.18) при разных температурах показало, что изменение температуры не оказывает существенного

влияния на поглощающую способность покрытия на длине волны 455 нм, тем не менее, квантовая эффективность люминофора (рисунок 3.19) при повышенных температурах существенно уменьшается. В результате чего происходит не только уменьшение суммарного светового потока, но и увеличение цветовой температуры за счет изменения соотношения синего и желто-красного цветов.

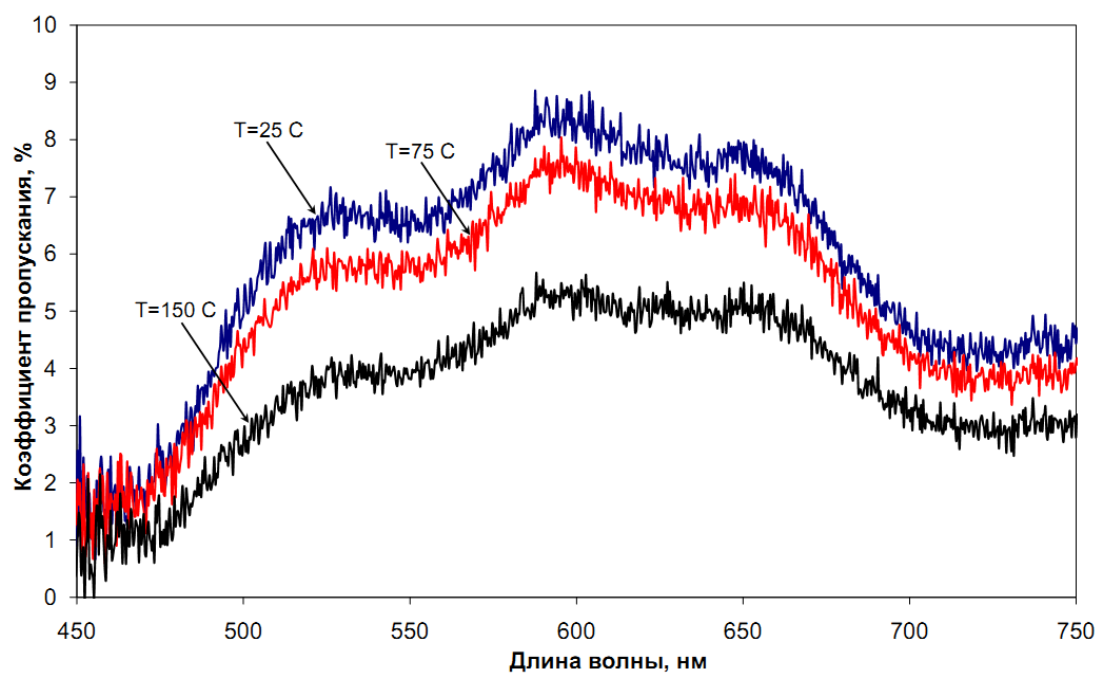


Рисунок 3.18 - Спектры пропускания люминофора ФЛЖ-7 (пластинка с люминофорным покрытием толщиной 246 мкм) при температуре 25°C, 75°C и 150 °C [90]

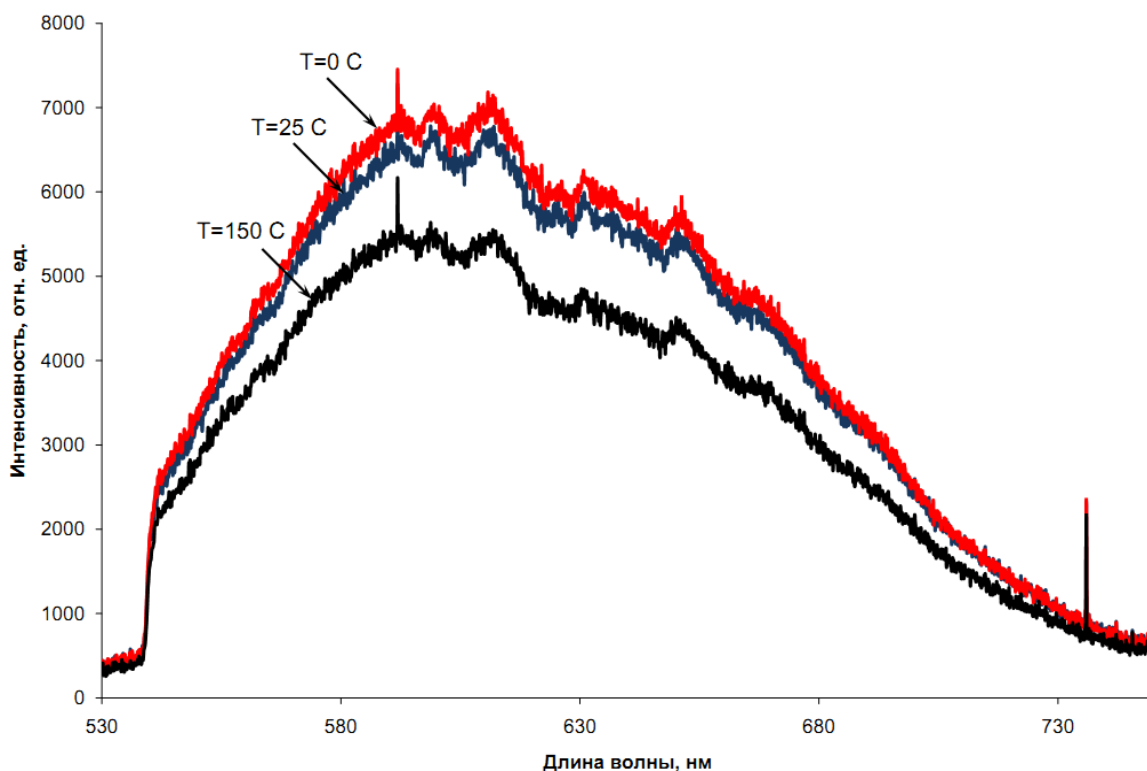


Рисунок 3.19 - Спектры возбуждения люминесценции люминофора ФЛЖ-7 светом с длиной волны 455 нм при температуре 0 °С, 25 °С и 150 °С [90]

Несмотря на высокую поглощающую способность люминофора в диапазоне длин волн 440-470 нм, выделяющаяся тепловая мощность не так велика, поскольку значительная часть поглощенной мощности переизлучается люминофором в диапазоне длин волн 470-700 нм. С целью оценки выделяющейся в покрытии тепловой мощности был проведен следующий эксперимент[97]:

1. с технологической линии брали светодиод КИПД 154А92 в корпусе 5050-1 без люминофорного покрытия и измеряли его мощность излучения;
2. на поверхность кристалла наносили люминофорное покрытие и вновь измерялась его мощность излучения;
3. предполагаем, что разность измеренных мощностей излучения соответствует тепловой мощности выделяющейся в покрытии.

На рисунке 3.20 представлены результаты этих измерений.

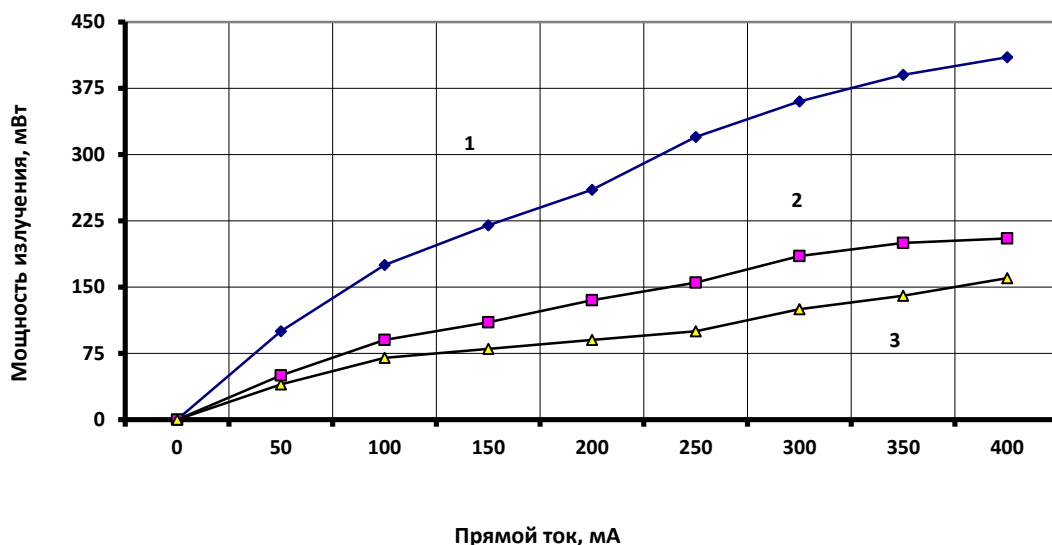


Рисунок 3.20 - Зависимость мощности излучения полупроводникового источника света КИПД 154А (цветовая температура 4200К) от прямого тока, при температуре корпуса +85 °С. 1-мощность излучения светодиода без люминофорного покрытия в диапазоне длин волн 440-470 нм; 2- Мощность излучения светодиода с люминофором в диапазоне длин волн 440-470 нм; 3- мощность излучения светодиода с люминофором в диапазоне длин волн 470-700 нм.

3.5 Гранулометрический состав люминофоров

Проведен анализ распределения размера зерна люминофоров ООО НПК «Люминофор». Полученные фотографии приведены на рисунках 3.21, 3.22.

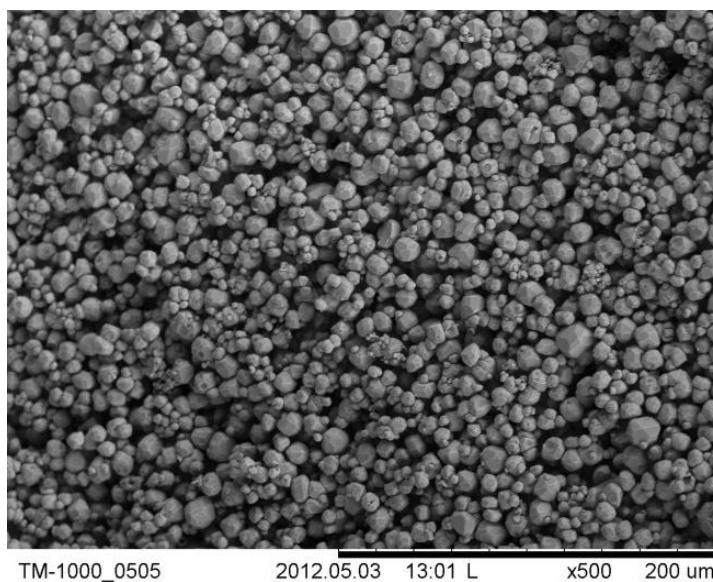


Рисунок 3.21 - Люминофор ФЛЗ-7

По полученной фотографии построена гистограмма распределения зерен по размеру, представленная на рисунке 3.23.

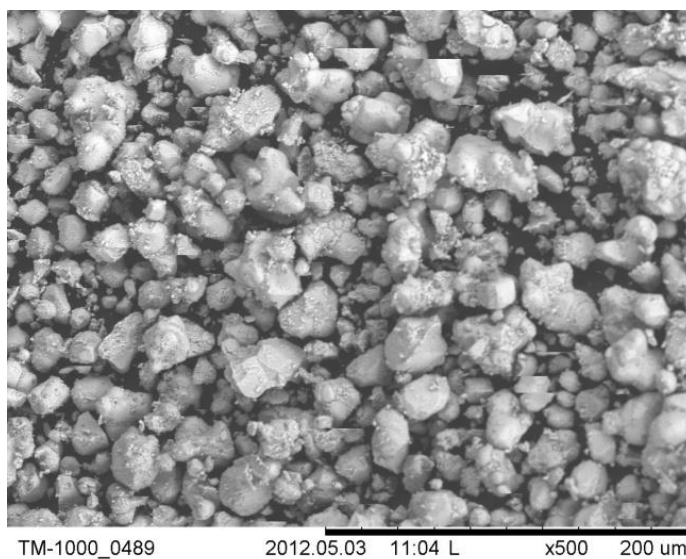


Рисунок 3.22 – Люминофор ФЛЗ-8

Гистограмма распределения зерен по размеру в люминофоре ФЛЗ-8 практически полностью повторяет распределение ФЛЗ-7.

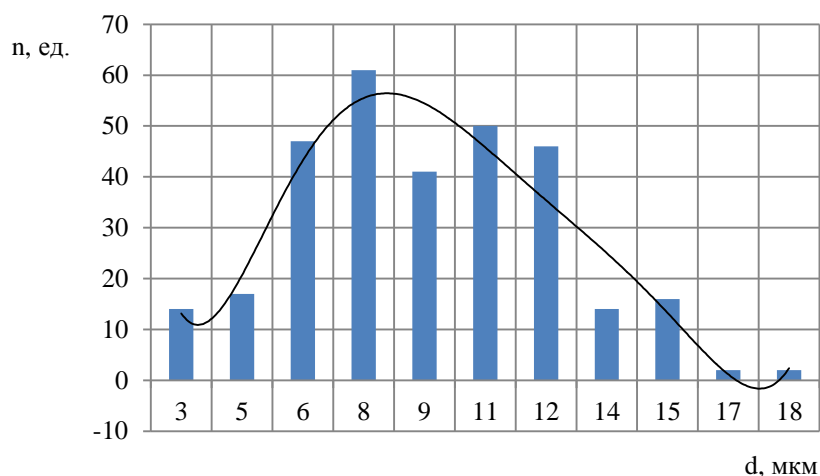


Рисунок 3.23 - Гистограмма распределения зерна люминофора ФЛЗ-7

Распределения зерен по размерам подчиняется нормальному закону, но не являются симметричными, то есть наиболее вероятный размер зерна не совпадает со средним размером. Средние размеры зерен, полученные из распределений, представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Данные, полученные из распределений зерен по размерам

Люминофор	Средний размер зерна, мкм	Люминофор	Средний размер зерна, мкм
FL.4255	8	LMY70C	5
LMS520B	16	SY450	12
LMS540B	13	«Смесь 1»	8
LMS560C	13	ФЛЗ-7	9
LMS570B	12	ФЛЖ-7-560	11
LMS575B	15	Северск	6
LMY60C	4	ФЛЗ-8	20
LMY65C	6	ФЛЗ-8(112)	18

Из таблицы можно заметить, что средний размер зерна лежит в диапазоне $4 \div 20$ мкм и соотносится с теоретическими данными из литературы. По

экспериментальным данным, зерна порошка люминофоров состоят из двух фракций.

Из-за седиментации (оседание или всплывание частиц дисперсной фазы (твёрдых крупинок, капелек жидкости, пузырьков газа) в жидкой или газообразной дисперсионной среде в гравитационном поле или поле центробежных сил) трудно осуществить равномерность распределения люминофора в покрытии. Это можно наблюдать на фотографии (рисунок 3.24).

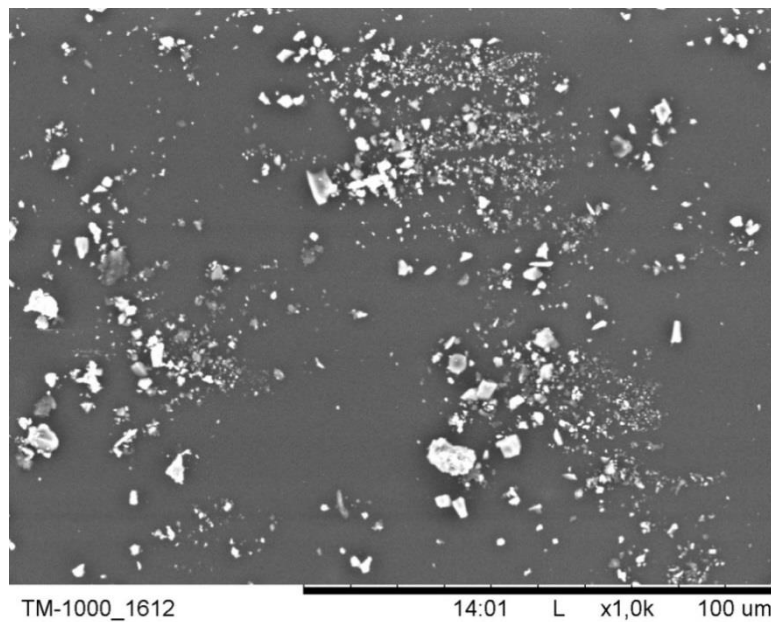


Рисунок 3.24 - Распределение люминофора AWB-3, растворенного в компаунде

Таким образом, для повышения эффективности и лучшего воспроизведения результатов необходимо использовать люминофор с зернами одного размера [90].

3.6 Тепловой режим люминофорного покрытия

На рисунке 3.25 представлены экспериментальные результаты измерений температуры кристалла и люминофорного покрытия при различных значениях прямого тока и при температуре корпуса 20 °С и 85 °С.

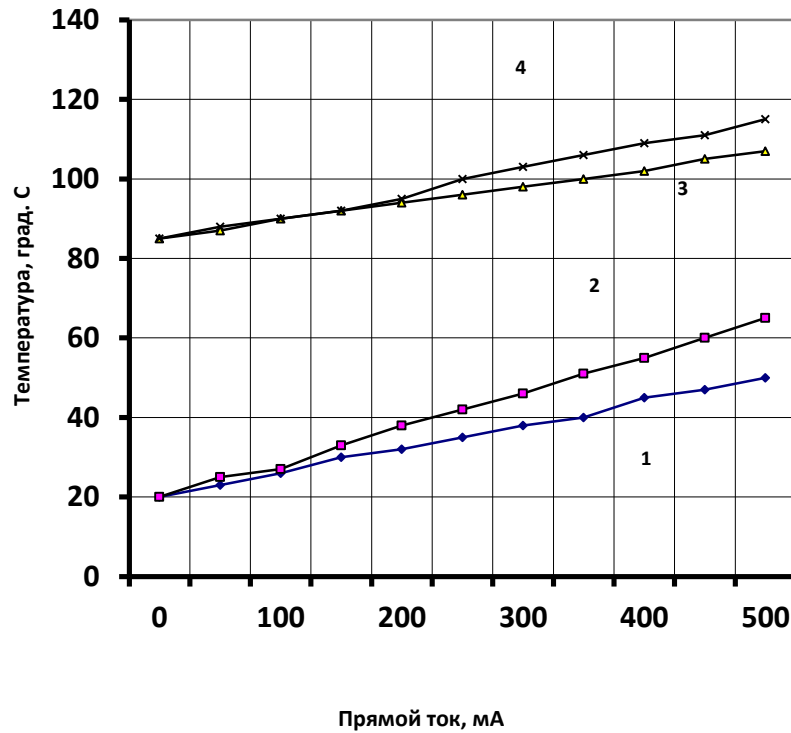


Рисунок 3.25 - Зависимость температуры кристалла (1,3) и температуры люминофорного покрытия (2,4) от прямого тока. 1,2 – для температуры корпуса +20 °С; 3,4 – для температуры корпуса +85°С

Из зависимостей следует, что 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.

На основе полученных экспериментальных результатов была проведена теоретическая оценка температуры покрытия, на примере модели представленной на рисунке 3.26

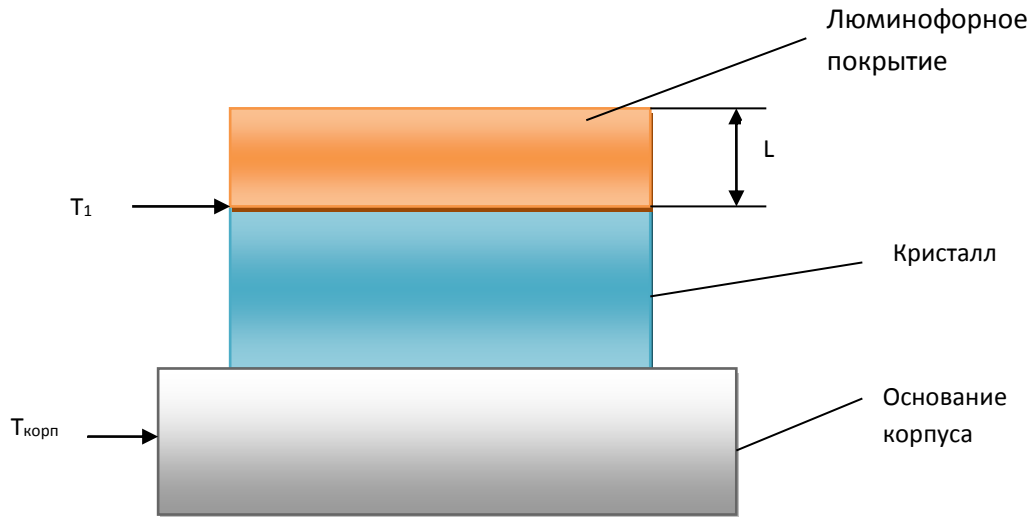


Рисунок 3.26 - Тепловая модель полупроводникового источника света

Оценку температуры люминофорного покрытия возможно провести, используя известное решение уравнения теплопроводности для плоской пластины с равномерно распределенным по её объёму источником тепла.

Примем, что поверхность люминофорного покрытия, контактирующая с кристаллом имеет постоянную температуру T_1 , а свободная поверхность, теплообмен с поверхности которой может осуществляться только конвекцией, фактически является теплоизолированной. Таким образом, если пренебречь конвективным теплоотводом с поверхности покрытия, то математически, установившееся температурное поле в момент времени τ в кристалле будет описываться уравнением теплопроводности Лапласа [98]:

$$\frac{d^2T(x)}{dx^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (3.19)$$

Где, плотность выделяющейся тепловой мощности излучения в единице объёма - q_v .

Первое граничное условие имеет простой вид: $T(0) = T_1$. Второе граничное условие, требующее чтобы поверхность при $x=L$, была теплоизолированной и следовательно, градиент температуры на ней равен нулю:

$$\left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0, \quad (3.20)$$

Решение этого уравнения известно [82, 98], распределение температуры по толщине покрытия подчиняется параболическому закону, при этом максимальная температура достигается на поверхности пластины при $x=L$.

$$\frac{T_{\text{макс}}}{T_1} = 1 + \frac{q_B L^2}{2\lambda T_1}, \quad (3.21)$$

Количество тепла, выделяемое в объеме люминофорного покрытия толщиной L с характерным размером в единицу времени, определяется выражением[99]:

$$q_B = \alpha L a^2 I_0 \exp(-\alpha L), \quad (3.22)$$

где α - коэффициент поглощения; I_0 – световой поток; радиус (характерный размер) люминофорного покрытия.

Оценим коэффициент теплопроводности люминофорного покрытия, состоящего из кремнийорганического компаунда и иттрий-алюминиевого граната легированного церием. Соотношение компонент по весу 90% кремнийорганики и 10% ИАГ (Ce). Переводя весовые отношения в объёмные получим, что объёмная доля компаунда $v_k=0,975$, а доля люминофора составит всего $v_f=0,0225$. Используем формулу Бургера [100] для теплопроводности смеси, состоящей из связки и сферических частиц:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{v_k \lambda_k + C v_f \lambda_f}{v_k + C v_f}, \quad (3.23)$$

В этой формуле, кроме объёмных долей, введены следующие обозначения: λ_k – теплопроводность компаунда (0,2 Вт/мК), λ_f - теплопроводность ИАГ (13 Вт/мК), $C = \lambda_k / \lambda_f = 0,015$. На рисунке 3.27 представлены результаты расчета.

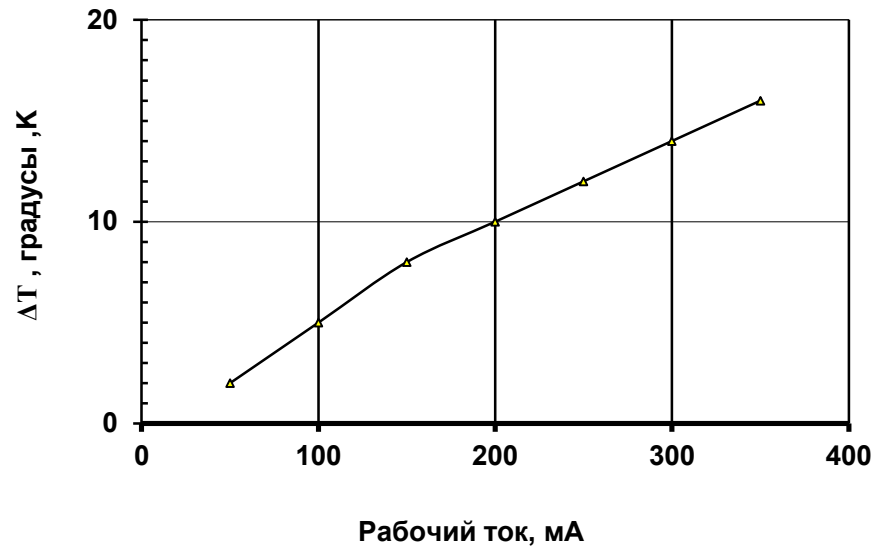


Рисунок 3.27 - Величина среднего перегрева люминофорного покрытия относительно поверхности кристалла в зависимости от прямого тока

3.7 Выводы

1. Количество тепла, выделяющееся в кристалле нелинейно зависит от потребляемой электрической мощности.
2. Тепловое сопротивление кристалла определяется не только геометрическими и теплофизическими характеристиками кристалла и корпуса, но и является функцией рабочего тока в кристалле.
3. При определении теплового сопротивления мощных проводниковых источников белого света необходимо учитывать долю выделяющегося в люминофорном покрытии тепла.
4. Максимальная температура в полупроводниковом источнике тока приходится на люминофорное покрытие.
5. Температура кристалла источника света нелинейно увеличивается при повышении температуры корпуса.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

4.1 Определение кажущейся энергии активации по результатам электротермотренировки при ступенчато возрастающей нагрузке

Известно, что повышение температуры и плотности электрического тока ускоряет процесс старения полупроводникового прибора. Роль механизмов отказов в этом процессе различна. Многие из них, в том числе и деградационные, связаны с физико-химическими реакциями [39-42].

Предположим, что яркость источника I света изменяется в соответствии с уравнением:

$$I = I_0 + At^n \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (4.1)$$

Значение этого параметра в момент отказа равно $0,7I$

$$0,7I = I_0 + At_{0,7}^n \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (4.2)$$

Логарифм времени до отказа:

$$\ln t_{0,7} = C + \frac{\Delta E}{nkT}, \quad (4.3)$$

Данная формула и есть основная зависимость наработки на отказ от температуры, т.е. $\ln t$ от $1/T$, где кажущаяся энергия активации равна $\Delta E/n$ или в n раз меньше энергии активации истинного механизма, вызывающего изменение параметра.[101,102] Таким образом, определение величины кажущейся энергии активации основных параметров полупроводникового излучающего диода является важнейшей операцией, предшествующей ускоренным испытаниям.

Основные методы определения кажущейся энергии активации известны и приведены в РД 11 0755-90 [103]. Методы определения энергии активации приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Методы определения энергия активации [103]

Метод	Описание
Метод 2-1	Определение энергии активации на основе параллельных испытаний выборок в различных режимах
Метод 2-2	Определение значения энергии активации по накопленным данным
Метод 2-3	Определение значения энергии активации по результатам испытаний со ступенчато возрастающей нагрузкой
Метод 2-4	Определение значения энергии активации по результатам электротермотренировки при ступенчато возрастающей нагрузке

Наибольшее распространение в производстве полупроводниковых светодиодов находят методы определения энергии активации:

- при ступенчатом увеличении температуры;
- при повышенной температуре при ступенчатом увеличении тока;
- комбинированные: при ступенчатом увеличении температуры и тока.

В данной работе применялись все три метода. Испытания проводили на случайной выборке в 10 штук из партии изделий объемом не менее 10000 штук. В случаях если результатов испытаний одной выборки полупроводниковых источников света было недостаточно для достоверной оценки значения энергии активации, то использовали результаты испытаний нескольких партий [104,105].

Испытания проводят в предельно допустимом электрическом режиме, установленном в технических требованиях для испытаний на безотказность под электрической нагрузкой при нормальных условиях и ступенчатом увеличении нагрузки. Параметры измеряют до и после 24-часовой выдержки на каждой ступени нагрузки. Испытания прекращают при получении 50 % отказов или при достижении пятикратной нагрузки. Для размещения испытуемых источников света и подвода к ним электрической нагрузки в камере тепла и холода использовались устройства, показанные на рисунках 4.1 и 4.2.

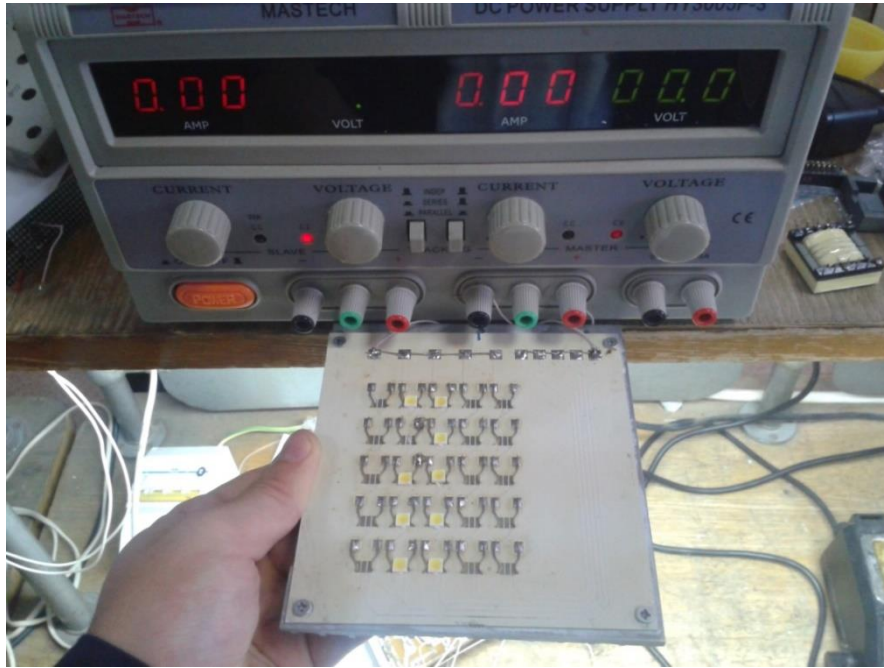


Рисунок 4.1 - Устройство для закрепления изделий на теплоотводе при ступенчатых испытаниях

Устройства представляют многослойную печатную плату из лакированного алюминия закрепленную на теплоотводящем радиаторе.



Рисунок 4.2 - Контактное устройство для ступенчатых испытаний

В таблице 4.2 приведены результаты испытаний при постоянной температуре корпуса и ступенчатом увеличении тока. Выдержка при каждом значении тока составляла 24 часа.

Таблица 4.2 - Испытания полупроводниковых источников света типа КИПД 154Г92 при ступенчато-возрастающей нагрузке

До испытаний										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.95	2.95	3.1	2.94	2.95	2.95	2.96	3.11	3.31
Ф, Лм	22.08	22.02	21.87	21.07	21.97	21.94	21.87	22.56	21.04	21.18
После 1-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.92	3.09	2.95	3.1	2.94	2.95	2.95	2.96	2.98	2.96
Ф, Лм	22.11	21.25	21.7	21.04	21.95	22.03	21.86	22.64	21.68	21.85
После 2-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 66 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.95	2.96	3.1	2.95	2.95	2.95	3.12	2.99	2.96
Ф, Лм	20.29	21.39	21.51	20.94	21.88	22.04	21.93	21.91	21.64	21.93
После 3-ей ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 72 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.95	2.96	3.1	2.94	2.95	2.95	2.96	2.96	2.95
Ф, Лм	20.79	21.71	21.31	20.54	21.74	21.89	21.86	22.57	21.54	21.83
После 4-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 78 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.95	2.95	2.96	2.95	2.95	2.95	2.96	2.96	2.95
Ф, Лм	20.77	21.85	20.59	21.2	21.55	21.39	21.69	22.58	21.31	21.55
После 5-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 84 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.94	2.95	2.95	2.94	2.94	2.94	2.96	2.95	2.95
Ф, Лм	20.98	21.91	21.31	21.46	21.51	21.81	21.5	22.63	21.22	21.31
После 7-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 96 \text{ mA}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	3.08	2.95	2.95	2.94	2.95	2.95	2.96	2.96	2.95

Ф, Лм	21.07	20.36	20.59	20.56	21.8	21.7	21.29	22.53	20.59	21.39
После 8-ой ступени ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $I = 102 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.94	2.95	2.95	2.94	2.94	2.95	2.96	2.96	2.95
Ф, Лм	21	20.63	20.53	19.28	21.10	20.86	21.22	22.41	20.14	21.48
После 9-ой ступени ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $I = 112 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	2.95	2.94	2.95	2.95	2.94	2.94	2.95	2.96	2.96	3.1
Ф, Лм	20.91	20.45	19.97	18.68	21.02	21.28	21.11	21.92	19.82	19.76
После 10-ой ступени ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $I = 160 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3.1	3.08	2.95	2.95	2.94	2.94	3.08	3.47	2.96	3.09
Ф, Лм	19.02	18.86	18.76	17.74	19.65	20.18	19.05	17.94	20.59	18.82
После 10-ой ступени ($T = 100^{\circ}\text{C}$, $I = 200 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3.09	2.94	2.95	3.08	3.46	2.96	3.21	-	4.59	4.38
Ф, Лм	18.78	15.53	17.38	11.2	17.23	10.24	17.24	-	0	9.49

Испытания проводились до появления полных отказов по одному из основных параметров светодиодов. Как следует из результатов испытаний, это произошло на 10-ой ступени. Кроме основных параметров СД, на каждой ступени, спектральным методом, контролировалась температура активной области кристалла. Результаты измерений представлены на рисунке 4.3.

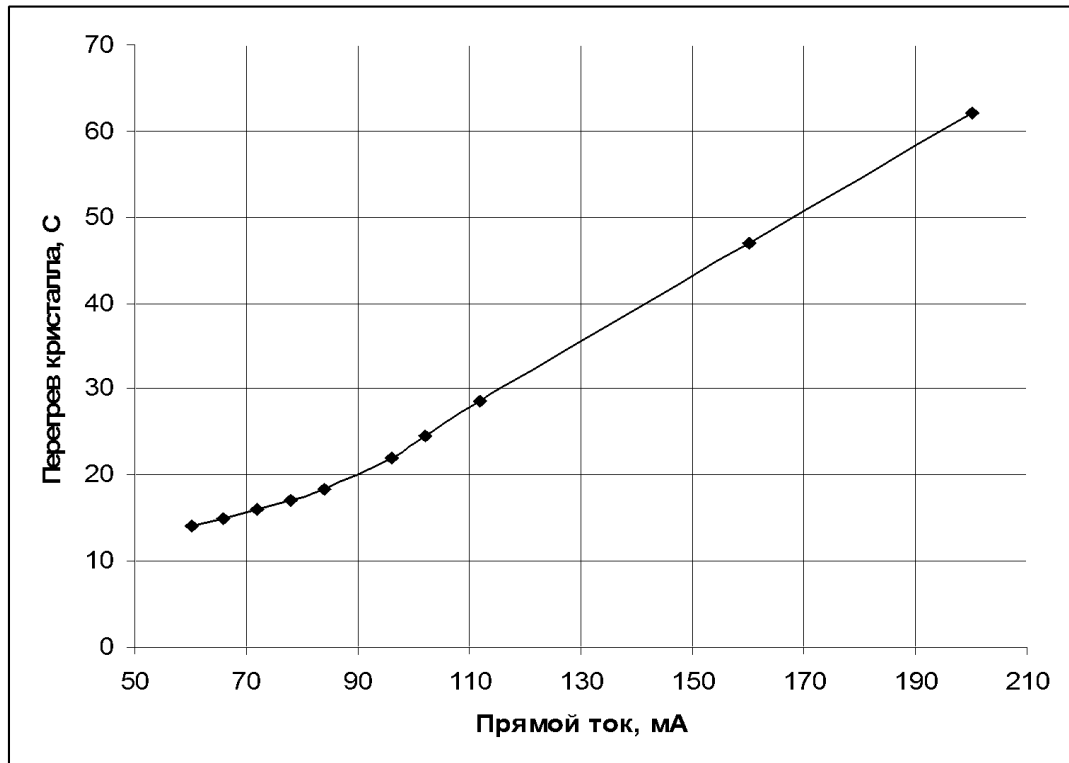


Рисунок 4.3 - Зависимость температуры кристалла источника света от прямого тока; точками на кривой отмечена температура на каждой ступени [104,105]

Из зависимости следует, что температура кристалла на 10 ступени испытаний достигла 162 °C, в то время как при номинальном значении прямого тока 60 mA на первой ступени температура имела величину 99 °C.

На рисунке 4.4: Изменениепрямого падения напряжения, светового потока, цветовой температуры по результатам испытаний.

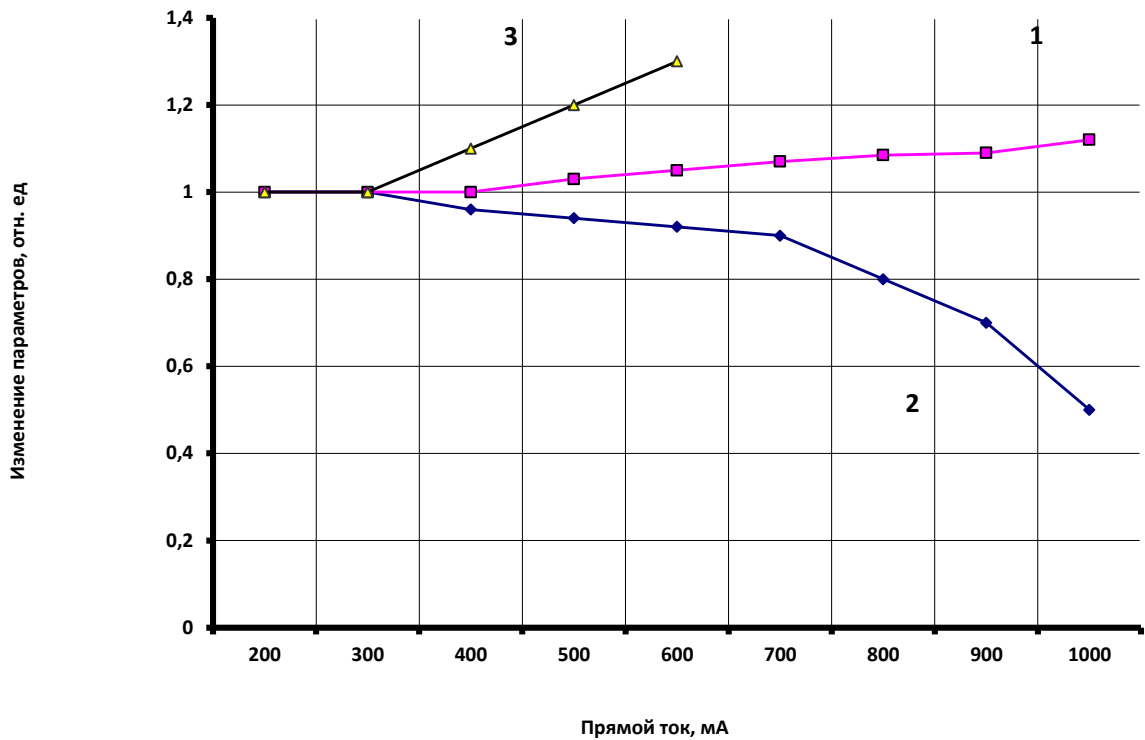


Рисунок 4.4 - Изменение параметров источника света при ступенчатых токовых испытаниях при температуре корпуса +85 °С. 1- прямое падение напряжения; 2-световой поток; 3- цветовая температура

В таблице 4.3 приведены результаты испытаний светодиодов при ступенчато-возрастающей температуре.

Таблица 4.3 - Испытания полупроводниковых источников света типа КИПД 154Г92 при ступенчато-возрастающей температуре

До испытаний										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
Ф, Лм	20,83	20,42	20,82	20,89	20,92	20,34	20,49	20,96	20,55	19,98
После 1-ой ступени ($T = 85^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,1	3,11	3,09	3,1	3,1	3,09	3,09	3,1	3,1	3,09
Ф, Лм	21	20,5	20,8	20,9	21	20,5	20,5	21	20,5	20
После 2-ой ступени ($T = 150^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Ф, Лм	20,29	21,39	21,51	20,94	21,88	22,04	21,93	21,91	21,64	21,93
После 3-ей ступени ($T = 175^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,11	3,1	3,09	3,1	3,1	3,12	3,1	3,1	3,12	3,1
Ф, Лм	19,22	18,97	19,27	19,51	19,47	18,69	18,92	19,27	18,91	18,28
После 4-ой ступени ($T = 200^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,17	3,11	3,11	3,11	3,11	3,19	3,12	3,12	3,13	3,17
Ф, Лм	15,68	15,47	15,56	16,01	15,67	15	15	15,39	15	15,2
После 5-ой ступени ($T = 225^{\circ}\text{C}$, $I = 60 \text{ мА}$)										
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Упр,В	3,19	3,17	3,12	3,12	3,14	-	3,19	3,16	3,18	3,25
Ф, Лм	10,2	9,8	9,5	9,4	9,2	-	9,4	9,5	8,1	8

На рисунке 4.5: Изменение прямого падения напряжения, светового потока, цветовой температуры по результатам испытаний.

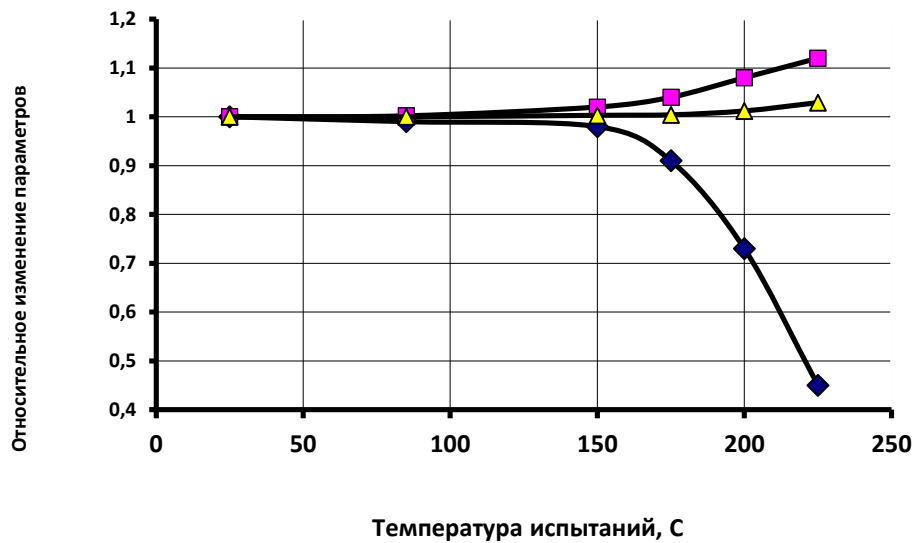


Рисунок 4.5 - Изменение параметров полупроводникового источника света при ступенчатых температурных испытаниях при прямом токе 350 мА; 1- прямое падение напряжения; 2- световой поток; 3- цветовая температура

Кажущуюся энергию активации возможно определить из результатов испытаний, построив зависимость $\ln(\Phi/\Phi_0)=f(1/T)$, а затем вычислить тангенс угла наклона этой зависимости. В полупроводниковом источнике света каждый параметр имеет свою кажущуюся энергию активации, поэтому необходимо построить несколько подобных зависимостей.

Полученные значения кажущейся энергии активации для основных параметров источников света КИПД 154А92, по результатам ступенчатых испытаний приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Кажущаяся энергия активации для основных параметров полупроводниковых источников света КИПД154А92

Параметр	Кажущаяся энергия активации, эВ	
	Электрическая нагрузка	Тепловая нагрузка
Световой поток	0,7-0,73	0,6-0,65
Прямое напряжение	1,1-1,3	1-1,1
Обратный ток, при $U_{обр}=30В$	0,1-0,12	0,12-0,14
Цветовая температура	0,9-1,0	1,0-1,2

4.2 Ускоренные испытания полупроводниковых источников света

Одной из важнейших характеристик полупроводниковых источников света является его долговечность. Средний срок службы должен быть не менее 100 000 часов, а осветительных систем на их основе не менее 35 000 часов. Критерием отказа изделия является снижение силы света на 30% или их полный выход из строя ввиду разрушения, кроме того, для оценки долговечности могут быть использованы изменения и других параметров, например, вольтамперной характеристики или цветовой температуры[18,20,21,22,106,107,108]. При такой высокой предполагаемой долговечности натурные испытания становятся не рентабельными, 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.

В настоящее время для прогнозирования долговечности изделий полупроводниковой электроники остается практически единственный способ – проведение ускоренных испытаний в условиях более высоких нагрузок, при этом процесс старения ускоряется, а деградация параметров происходит так же, как и в обычном режиме работы. 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 [106-108].

Практика эксплуатации и опыт ускоренных испытаний показали, что зависимость долговечности от температуры описывается логарифмически нормальным распределением с возрастающей функцией интенсивности отказов.

Вопрос надежности полупроводниковых источников света является важнейшим для дальнейшего расширения их производства и применения. Одну из основных ролей в вопросе надежности источников света играет деградация параметров кристалла. Кроме того, для источников белого цвета важным вопросом является деградация люминофора и системы кристалл-люминофор в целом. Это и определяет выбор трех основных проблем и соответствующих им направлений исследований:

1. необходимость определения предельных характеристик источников света;
2. необходимость изучения деградации излучающих структур;
3. необходимость изучения деградации люминофора.

Целью таких исследований является изучение механизмов и закономерностей процессов деградации полупроводниковых гетероструктур в процессе эксплуатации. И наиболее важным результатом этих исследований должна быть разработка математических моделей деградации с учетом всех составляющих энергии активации.

Важной самостоятельной задачей является оценка фактической надежности, т.е. установление количественных показателей надежности для готовых изделий. На всех этапах развития оптоэлектроники основным методом экспериментальной

оценки надежности являлись натурные испытания готовых изделий. При этом оценка надежности состоит в проведении испытаний и последующей статистической обработке результатов испытаний (отказов) для определения количественных показателей надежности.

По мере совершенствования изделий, натурные испытания на надежность становятся недостаточно эффективными, а зачастую и нецелесообразными. Возникают трудности не только экономического, но чисто технического характера, т.к. затрудняется анализ причин отказов. Современное производство достигло такого уровня развития, когда надежность полупроводниковых источников света в процессе эксплуатации характеризуется интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ч}^{-1}$. При таком уровне надежности для испытаний практически невозможно сформировать объем выборки, обеспечивающий накопление статистически достоверной информации о числе отказов в течение приемлемого времени натуральных испытаний. Необходимой составной частью методов оценки надежности СД является анализ отказов, результаты которого являются эффективным средством повышения уровня производственной и эксплуатационной надежности.

Требования к надежности – ГОСТ 11630:

Наработка источника света на отказ $t_n - 100\ 000$ ч. Средний световой поток Φ_v после 100 000 часов работы – 30% от значения при приемке и поставке. Групповой показатель безотказности – интенсивность отказов λ при испытании в течение наработки в режимах и условиях допустимых ТУ при доверительной вероятности $P_x = 0,6$ должен быть не более 10^{-7} 1/ч.

98 – процентный срок сохраняемости светодиода – 15 лет.

Ускоренные испытания проводили при повышенной температуре корпуса $+85^\circ\text{C}$, как при номинальном токе, так и при его удвоенной величине. В процессе испытаний периодически, через 240 часов (10 суток) контролировалась температура кристалла с помощью, разработанного метода [94,95]. Также каждые 240 часов испытания прерывались для контроля основных параметров

светодиодов, при температуре корпуса $+45^{\circ}\text{C}$. Это значение температуры корпуса является базовым при оценке коэффициента ускорения и времени испытаний.

Для расчета коэффициента форсирования (K_y) руководствовались формулой [103]:

$$K_y = \frac{T_y^H}{T_y^{\Phi}} = \left(\frac{J_{\Phi}}{J_{\text{НОМ}}} \right)^m \cdot \exp \frac{\Delta E}{K} \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_{\Phi}} \right), \quad (4.4)$$

где T_y^H – гамма процентная наработка до отказа, установленная в технических требованиях, ч.; T_y^{Φ} – время испытаний при повышенной температуре окружающей среды, ч.; $J_{\text{НОМ}}$, θ_H – ток потребления и температура p-n перехода для номинального электрического режима, установленного в ТТ и номинальной температуры корпуса (радиатора); J_{Φ} , θ_{Φ} – ток потребления (A) и температура p-n перехода для электрического режима и повышенной температуры корпуса (радиатора), принятых для режима ускоренных испытаний.

Ток потребления излучателей является величиной постоянной как при нормальной температуре окружающей среды, так и при повышенной.

Исходя из вышесказанного, выражение (1) примет вид:

$$K_{\Phi} = \exp \frac{\Delta E}{K} \left(\frac{1}{\theta_H} - \frac{1}{\theta_{\Phi}} \right), \quad (4.5)$$

где ΔE – значение энергии активации, определяется экспериментально.

θ_H и θ_{Φ} задаются техническими требованиями (45°C и 85°C , соответственно).

На рисунке 4.6 представлен внешний вид устройств, используемых для испытаний: кольца из плакированного алюминия, закрепленные на теплоотводящем радиаторе, которые, размещаются в термокамере. Электропитание подводится индивидуально к каждому изделию, а температура колец контролируется термопарами. На рисунке 4.7 показан сегмент кольца с распаянными на нем испытуемыми источниками света, при такой конструкции считаем, что температура кольца не отличается от температуры основания корпуса.



Рисунок 4.6 - Внешний вид устройств для ускоренных испытаний, размещенных в термокамере

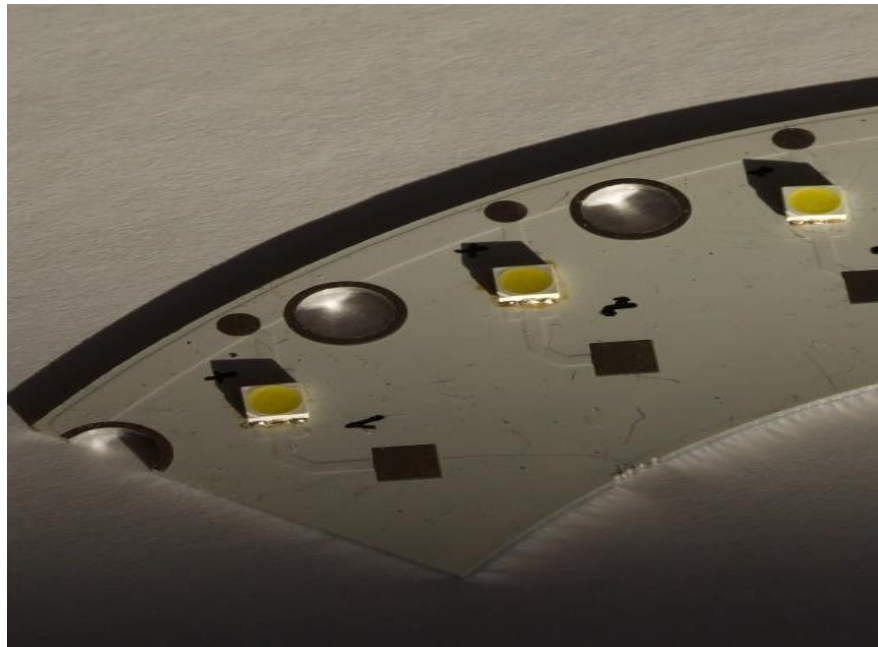


Рисунок 4.7 - Пример расположения источников света в корпусе 5050-1на кольцевом теплоотводе

Необходимая температура кольца во время испытаний обеспечивается термостабилизированным теплоотводом с поверхностью не менее 8 см² на 1 Вт мощности, потребляемой светодиодами. Электрическая схема включения светодиодов при проведении испытаний приведена на рисунке 4.8.

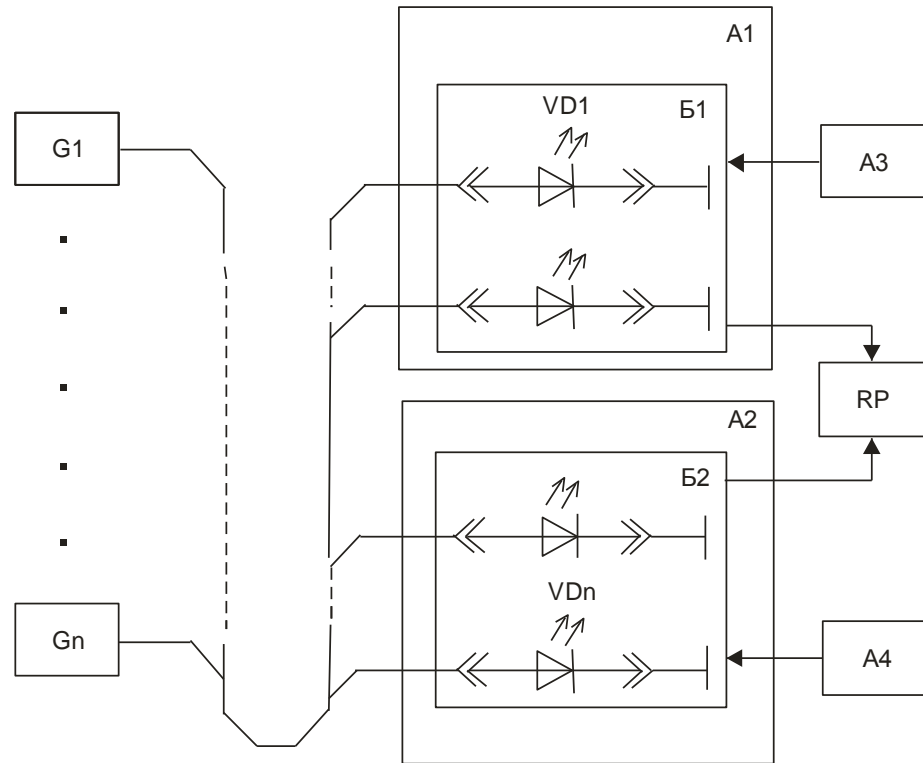


Рисунок 4.8 - Электрическая схема включения источников света при испытаниях: A1, A2 –термостат; A3, A4 – регулятор температуры теплоотвода; B1, B2 – теплоотвод; RP – измеритель температуры (МИТ 8.10); G1–Gn – стабилизаторы тока; VD1–VDn – испытуемые изделия

Результаты ускоренных испытаний КИПД154А92 и КИПД154Г92 представлены на рисунках 4.9 и 4.10. Как следует из графического материала, в процессе испытаний наблюдается уменьшение светового потока изделий и увеличение прямого падения напряжения и цветовой температуры. Как было показано в разделе 4.1, эти изменения обусловлены физико-химическими процессами, с различной кажущейся энергией активации. Важнейшим из этих процессов, является изменение светового потока. Из проведенных испытаний следует, что уменьшение светового потока при ускоренных испытаниях можно

приближенно аппроксимировать экспонентой и описать экспоненциальным законом деградации в виде [109]:

$$\Phi(t) = \Phi(0) \exp(-at), \quad (4.6)$$

где $\Phi(0)$, $\Phi(t)$ – световой поток до и после испытаний; t – время испытаний, ч; a – коэффициент деградации, для данной партии изделий КИПД154А92 имеющий величину $2,55 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

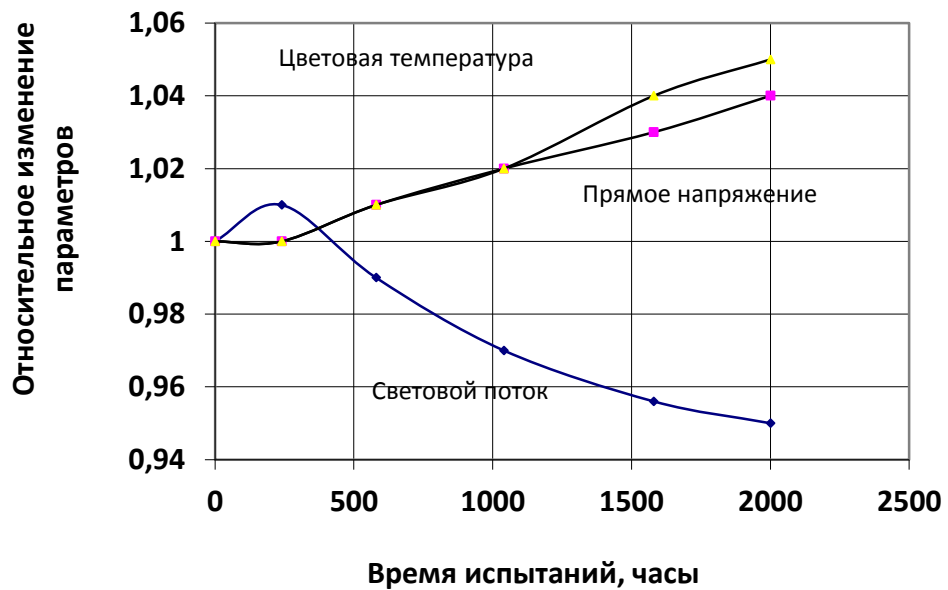


Рисунок 4.9 - Изменение параметров источника света КИПД154А92 в процессе испытаний при токе 350 мА и температуре корпуса 85°С

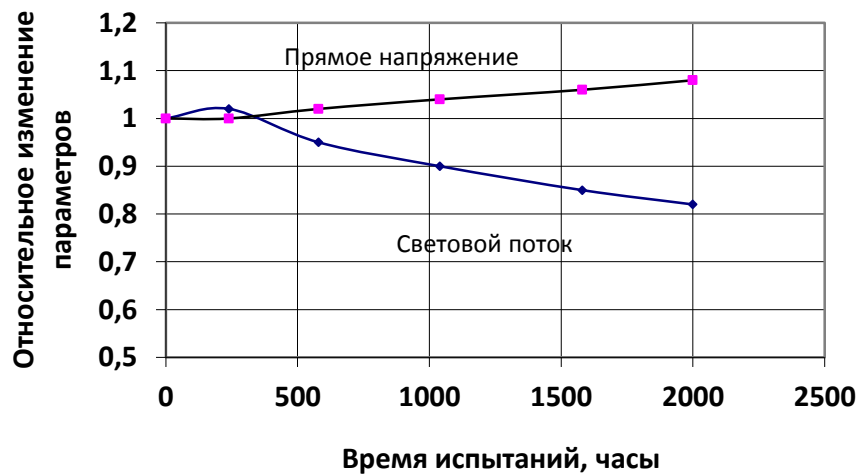


Рисунок 4.10 - Изменение параметров источника света КИПД154Г92 в корпусе 5050-2 в процессе испытаний при температуре корпуса 85°С

Одновременно со снижением светового потока при испытаниях наблюдалось увеличение цветовой температуры светодиода на 15-20%, что связано, на наш взгляд, с деградиационными процессами в люминофорном покрытии [90]. Эти изменения легко фиксируются с помощью оптического микроскопа.

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на результаты ускоренных испытаний, является рост температуры кристалла в процессе испытаний. Рост температуры обусловлен, как уменьшением внутренней и внешней квантовой эффективности светодиода, так и увеличением падения напряжения при постоянном токе испытаний. Таким образом, происходит увеличение выделяющейся в кристалле тепловой мощности за время испытаний в 2000 часов на 10-15%, что приводит, соответственно, к повышению температуры кристалла в конце испытаний. На рисунке 4.11 представлены результаты измерений температуры кристалла светодиодов в процессе ускоренных испытаний.

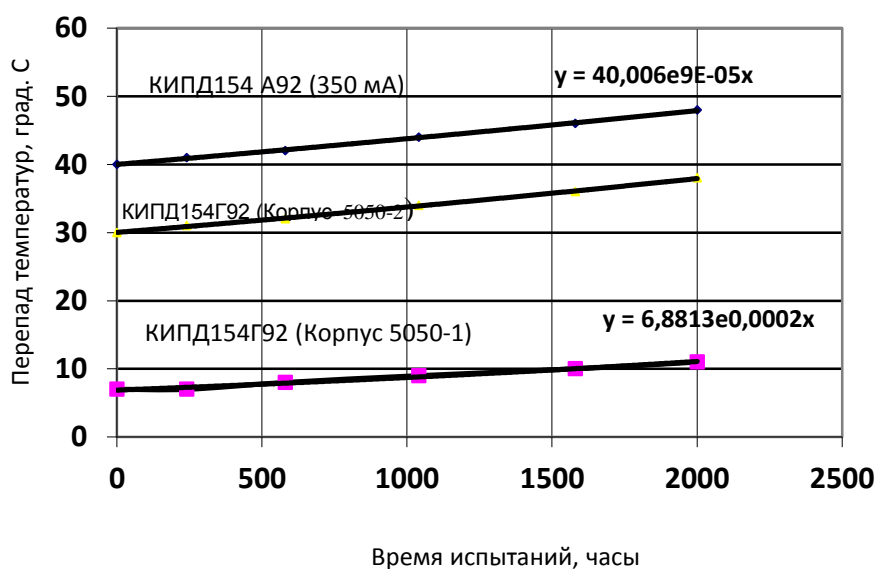


Рисунок 4.11 - Изменение перепада температур кристалл-корпус в процессе ускоренных испытаний

Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэффициент ускорения не является величиной постоянной, а увеличивается в 1,2-1,7 раза к концу испытаний.

4.3 Характерные виды отказов полупроводниковых источников света типа КИПД154А при ускоренных испытаниях

Четкое определение основного вида отказа полупроводникового источника света является наиболее критическим местом при ускоренных испытаниях. Общепринятым критерием постепенного отказа источника является падение выходной световой потока 30% от исходной величины. Но существуют еще некоторые механизмы внезапных отказов, которые также могут инициировать выход из строя светодиодов по причине резкого изменения величины прямого тока или спектра свечения.

Основным источником внезапных отказов полупроводниковых источников света является нарушение электрического контакта. Причинами обрывов электрических цепей являются недостаточная прочность сварных соединений в местах контактов разнородных материалов, химическое, электрическое, механическое разрушение металлических тонкопленочных проводников, дефекты сборки микросхем. В таблице 4.5 приведена статистика отказов полупроводниковых источников света типа КИПД-154А при ускоренных испытаниях, проводимых в 2011-2015 годах.

Таблица 4.5 - Виды отказов полупроводниковых источников света при ускоренных испытаниях

Вид отказа	Доля отказов, %	Энергия активации, эВ
Снижение светового потока на 30%	71	0,65-0,75
Увеличение прямого напряжения	15	0,8-1,1
Обрыв	4	0,35
Короткое замыкание	7	0,3
Цветовая температура	3	1-1,2

Короткие замыкания в электрических цепях обусловлены, в основном, дефектами фотолитографии, возникновением каналов с инверсной электропроводностью, дефектами кристаллической решетки полупроводникового кристалла, дефектами сборки. Подобные отказы имеют место, как в источниках белого света, так и синего, без люминофорного покрытия. На рисунке 4.12, представлен характерный отказ источников света, для наглядности, без люминофора - обрыв золотой проволоки.

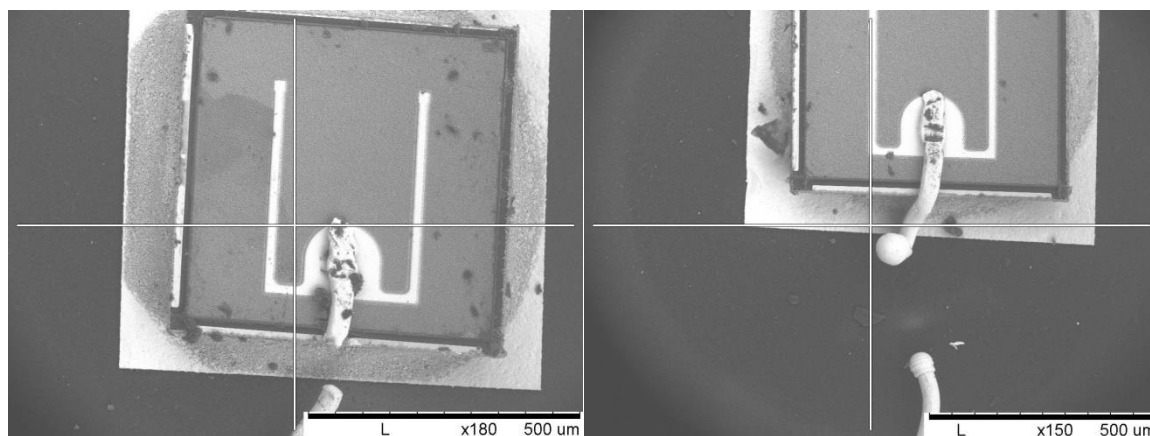


Рисунок 4.12 - Обрыв золотой проволоки (слева), её оплавление (справа) вследствие превышения тока

Следующий вид отказов – это увеличение сопротивления электродов.

Деградация электродов в светодиодах в основном имеет место на электроде р-области. Основная причина деградации электрода заключается в диффузии

металла во внутреннюю область, так называемая периферийная диффузия полупроводника. Диффузия усиливается с увеличением инжектированного тока и температуры. К сожалению, выбрать подходящий материал для омического контакта к р-области светодиодов InGaN/GaN довольно сложно из-за большой ширины запрещенной зоны GaNp-типа. Электрод должен обладать меньшим коэффициентом взаимной диффузии составляющих, инженеры иногда применяют барьерный слой для подавления эффектов электромиграции. Электроды из некоторых материалов, таких как прозрачный проводящий оксид индия-олова (ITO), или отражающих металлов (серебро) подвержены таким проблемам как электромиграция и термическая нестабильность.

Этот вид отказов представлен на рисунке 4.13.

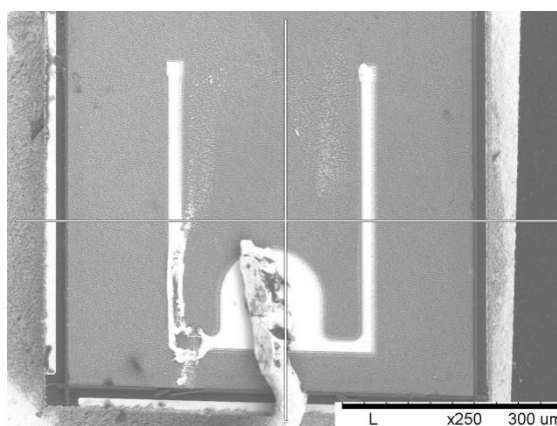


Рисунок 4.13 - Деградация омического контакта светодиода

Тепловая деградация из-за неоптимального теплоотвода доминирует в источниках света в первые 10 000 часов работы, или же в первые 100 часов при ускоренных испытаниях. Значительная выделяемая тепловая мощность требует тщательного монтажа кристалла в корпус и корпуса на радиатор, с помощью припоя или теплопроводящего клея. Если поры в припое создают условия для недостаточного отвода тепла, возникающие горячие точки приводят тепловой деградации и отказу типа «короткого замыкания» (Рисунок 4.14).

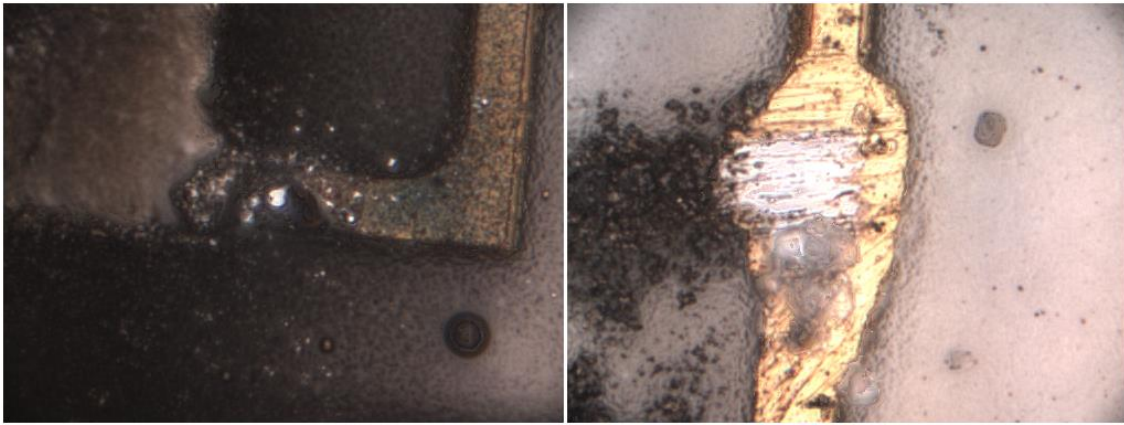


Рисунок 4.14 - Выгорание части омического контакта в изделиях типа КИПД 154А92 вследствие нарушения теплового режима

В начальной стадии освоения производства источников света наблюдалось появление отказов, вследствие пробоя р-перехода под контактной площадкой, в месте термокомпрессионной приварки золотой проволоки. (Рисунок 4.15) На наш взгляд этот тип отказов обусловлен неоптимальным выбором режимов термокомпрессионной сварки: давления и температуры. В результате чего в подконтактной области, за счет высокого давления создавались высокие механические напряжения, приводящие к появлению микротрещин.

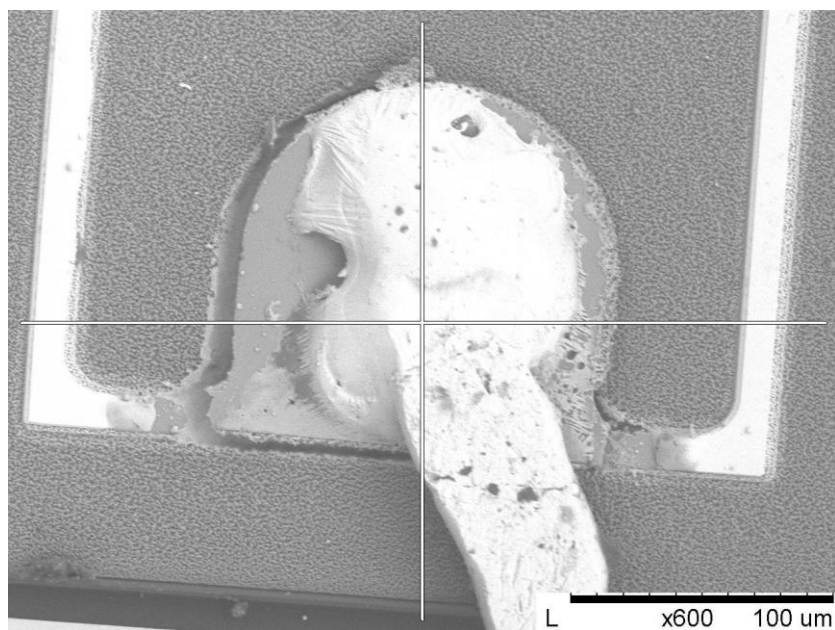


Рисунок 4.15 - Пробой p-области кристалла под контактной площадкой

Основными причинами параметрических отказов источников света, выражающихся в большинстве случаев в изменении величины светового потока и прямого падения напряжения на р-п переходе, являются физико-химические процессы внутри кристалла. С точки зрения физических причин эти отказы условно делятся на три категории:

1. объемные, связанные с явлениями в полупроводниковом кристалле;
2. поверхностные, обусловленные явлениями на границе раздела кристалл-люминофорное покрытие;
3. объемные, связанные с процессами в люминофорном покрытии.

Излучение света в светодиоде происходит в результате рекомбинации инжектированных носителей в активной области. Зарождение и рост дислокаций, также как преципитация узловых атомов, приводит к деградации внутренней части этой области. Эти процессы могут осуществляться только при наличии дефекта кристаллической структуры; высокая плотность инжектированного тока, разогрев из-за инжектированного тока и тока утечки, а также испускаемый свет ускоряют развитие дефекта. Выбор материала из которого изготовлен светодиод имеет значение, так как система AlGaAs/GaAs гораздо более чувствительна к этому механизму отказа, чем система InGaAs (P)/InP.

Система InGaN/GaN (для светодиодов голубого и зеленого излучения) нечувствительна к данному виду дефектов. В активных областях могут встречаться простые р-п переходы, встроенные гетероструктуры и множественные квантовые ямы. На границах раздела таких структур неизбежны изменения химического состава или даже параметров решетки. При высоком уровне инжекции химические компоненты могут мигрировать путем электромиграции в другие области. Структурные изменения порождают кристаллические дефекты наподобие дислокаций и точечных дефектов, которые ведут себя как неизлучающие центры, препятствующие естественной излучающей рекомбинации и в результате генерирующие дополнительное тепло внутри активного слоя. Заметная деградация вольт-амперной характеристики начинается

в первые 100 часов работы. Предполагается что это связано с диффузионным перераспределением примесей в активной области структуры под действием прямого тока проходящего через кристалл. В некоторых случаях, в области микротоков 10^{-4} – 10^{-3} А происходило снижение интенсивности излучения, что вероятно обусловлено ростом доли безизлучательной рекомбинации.

Одной из причин отказов излучающих диодов является деградация люминофора на основе иттрий алюминиевого граната легированного церием. Причин снижения квантовой эффективности несколько:

Первая причина связана с тушением люминесценции за счет диффузии кислорода в кристаллическую решетку граната.

Люминофоры применяемые в производстве СД белого свечения представляют собой жёлтые, зелёные и оранжевые порошки, состоящие непосредственно из кристаллов диаметром $\sim 6 - 9$ мкм алюмо-иттриевого граната $((Y_{1-a}Gd_a)_3(Al_{1-b}Ga_b)_5O_{12}, Ce^{3+} (YAG))$, и силикатные люминофоры на основе $SrCaSiN$. Люминофоры стойкие к температурному воздействию до $1280^{\circ}C$, но могут окисляться и впитывать влагу.

Вторая причина связана с перераспределением кристаллической фазы по толщине люминесцентного покрытия на основе кремний-органического компаунда. Это приводит к уменьшению квантовой эффективности, к нарушению соотношения цветов и нарушению угловой диаграммы направленности излучения.

При длительной работе светодиодов залитых эластичным компаундом или гелем возможно осаждение кристаллов люминофора на полупроводниковый кристалл, что приводит к изменению цветовых характеристик источника. Также возможно выгорание частиц люминофора и с их осаждением на поверхность кристалла, что приводит к изменению значения цветовой температуры. В первом случае снижается количество переизлучающих частиц, возрастает цветовая температура, снижается световой поток. Во втором случае повышается плотность частиц на поверхности кристалла и излучение синего цвета проходит через люминесцентный компаунд существенно меньше, снижается спектральная

составляющая синего излучения относительно спектральной составляющей жёлтой (люминофора), происходит переотражение излучения в чип, возрастает значение цветовой температуры, снижается значение светового потока.

На рисунке 4.16 приведена фотография деградации люминофорного покрытия.

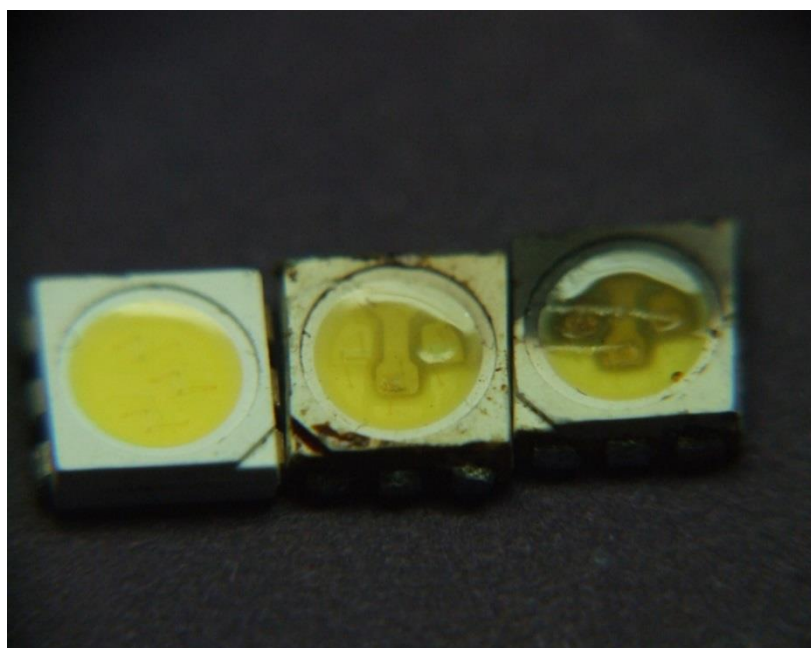


Рисунок 4.16 - Изменение структуры люминофорного покрытия при ступенчатых испытаниях

Электронно-микроскопические исследования показали, что при термообработке в структуре люминофорного покрытия появляются различного типа дендритные образования (рисунки 4.17), которые могут привести к снижению его квантовой эффективности [90].

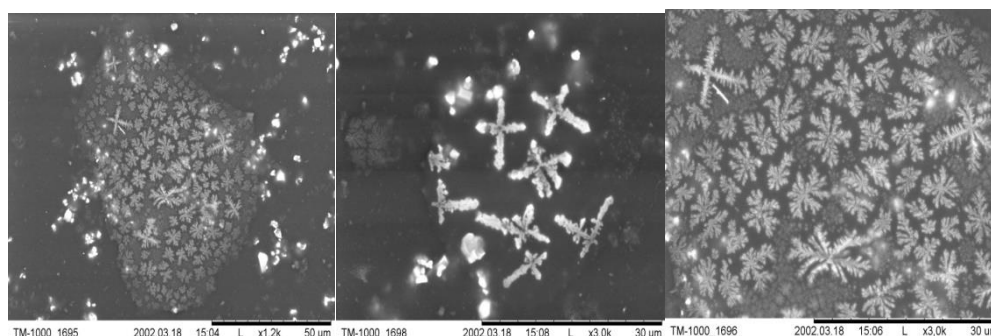


Рисунок 4.17 - Изменение структуры люминофорного покрытия на основе ФЛЖ-7 после термической обработки при 140 °С

4.4 Прогноз долговечности полупроводниковых источников света на основе результатов ускоренных испытаний в течении 1000 – 2000 часов

Оценка времени наработки на отказ и γ -ресурса полупроводниковых светодиодов по результатам ускоренных испытаний за фиксированное время представляет сложную техническую задачу [109,110]. Для корректной интерпретации результатов испытаний и последующего их переноса на реальные условия эксплуатации, нужно точно знать коэффициент ускорения, и кроме того, примерный ход изменения параметров в период времени более времени испытаний в 1000-2000 часов.

Проведенный анализ изделий показал, что снижение светотдачи источников света происходит, в основном, после 6 тыс. часов эксплуатации в нормальных условиях, и не существует надежных и непротиворечивых способов предсказания поведения светодиодов после прохождения этого рубежа. Чтобы при экстраполяции ослабления светового выхода получить достоверные статистические данные для реальных условий, не всегда достаточно информации, полученной в ходе тестирования за время менее 6 тыс. часов, поэтому время испытаний приходится увеличивать до 20-30 тыс. часов. В мировой практике принято решение при проведении экстраполяции ухудшения светового выхода исключать данные, полученные в начале эксплуатации устройства, поскольку они формируют на кривой «горб», вызванный некоторым увеличением светотдачи в начале работы и последующим ее естественным снижением (рисунок 4.18) [111]. Это позволяет получить более корректное представление кривой ухудшения светотдачи. Используя концепцию стандарта LM-80 и предложения технического комитета TM-21, нами была проведена пессимистическая оценка долговечности светодиодов, то есть времени, когда световой поток диода снизится на 30%.

В основе методики положена экспоненциальная экстраполяция зависимости светового потока светодиода от времени при фиксированной температуре испытаний [109,110]:

$$\Phi(t) = B \exp(-\alpha t), \quad (4.7)$$

где $\Phi(t)$ – световой поток; t - текущее время испытаний; α – скорость изменения светового потока; B – предэкспоненциальный множитель.

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{k_B T_s}\right), \quad (4.8)$$

где E_α - кажущаяся энергия активации; A -постоянная; k_B - постоянная Больцмана; T_s – температура испытаний.

Время (L_{70}), при котором световой поток светодиода снижается на 30%, определяется по формуле:

$$L_{70} = \frac{\ln(100 \times \frac{B_0}{p})}{\alpha}, \quad (4.9)$$

где B_0 – величина максимального значения светового потока в процессе испытаний, относительные единицы; p - заданный процент от исходной световой отдачи, в данном случае $p=70\%$. На рисунке 4.18 Представлены два варианта экстраполяции результатов ускоренных испытаний КИПД154А92 при температуре корпуса $+85^\circ\text{C}$. Первый вариант экстраполяции по данным испытаний в течении 1000 часов. Второй вариант экстраполяции по данным полученным в течении испытаний от 1000 часов до 2000 часов.

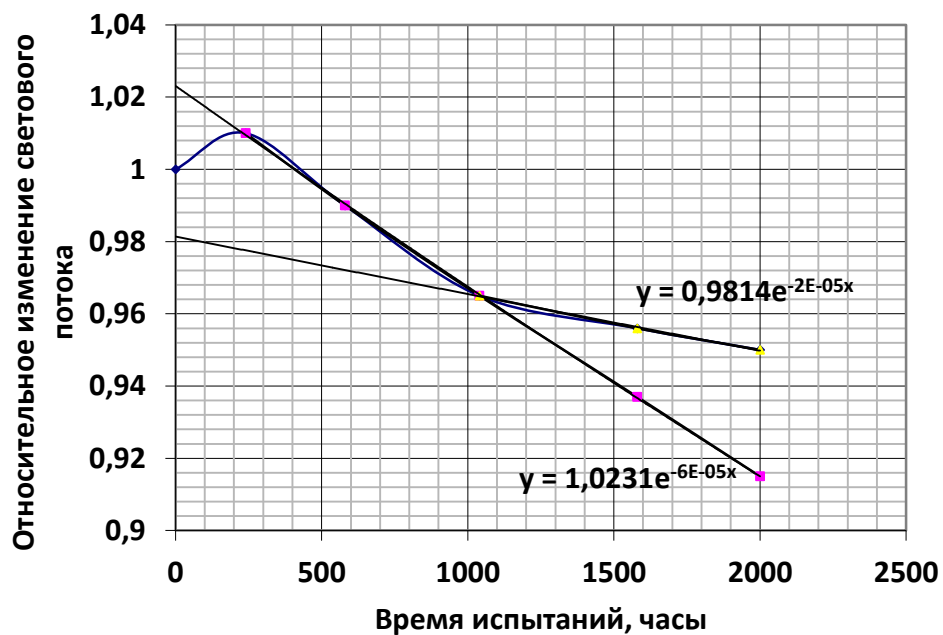


Рисунок 4.18 - Пример экстраполяции результатов ускоренных испытаний источника света КИПД154А92 в корпусе 5050-1

Как следует из зависимостей, экстраполяция данных полученных при испытаниях от 1000 часов до 2000 часов дает более достоверные значения. Расчет по методике LM-80 дает следующие значения долговечности:

- 1) при температуре корпуса +85°C медианный срок службы 18800 часов;
- 2) при температуре корпуса +45°C с медианный срок службы 305000 часов;
- 3) при гамма-процентной наработке до отказа $\gamma=90\%$ срок службы светодиода составит 30000 часов.

На рисунке 4.19 представлены результаты ускоренных испытаний светодиодов КИПД154А92 в пластмассовом корпусе 5050-2. Из результатов следует, что долговечность светодиода в большей мере зависит от температуры кристалла, а не температуры корпуса. Температура кристалла в корпусе 5050-2 на 30-40°C выше, чем в корпусе 5050-1, что приводит к резкому увеличению скорости деградации.

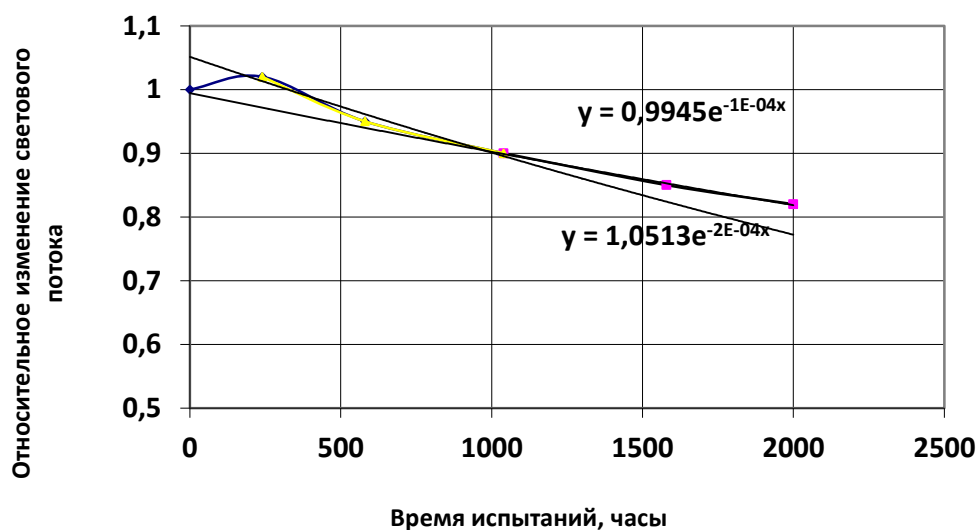


Рисунок 4.19 - Изменение параметров источника света КИПД154Г92 в корпусе 5050-2 в процессе испытаний при температуре корпуса 85°C

Рассчитанный по методике LM-80 медианный срок службы при +85°C составит порядка 5000 часов, а при +45°C около 200000 часов, что недостаточно для обеспечения надежной работы светодиода.

Выводы по главе 4.

1. Методами ступенчатых испытаний, при повышенных тепловых и электрических нагрузках, определена кажущаяся энергия активации процессов деградации полупроводниковых источников света.
2. Проведен анализ основных типов отказов при ускоренных испытаниях.
3. По результатам ускоренных испытаний, с использованием рекомендаций LM-80, проведена оценка среднего срока службы полупроводниковых источников света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный теоретический и экспериментальный анализ теплового режима полупроводниковых источников света 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 источнике света 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 полупроводниковых источников света при температуре корпуса +85 °С в течении

2000 часов, с использованием рекомендаций ТК-21, возможно определить средний срок службы, который составляет порядка 300000 часов.

5. Результаты работы использованы в ТУСУР и АО НИИПП при выполнении х/д 37/10 по постановлению правительства РФ №218. Совместно с АО НИИПП обсуждается возможность изготовления разработанной установки для контроля качества светодиодов в условиях серийного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича - 2-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Берг Ф. Светодиоды/ Ф. Берг, П. Дин / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. - М.: Мир, 1979. – 686 с.
3. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л.М. Коган. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 210 с.
4. ILLUMINATOR. BEST OF THE BEST 2008: Альманах. – М.:Центр Светодизайна Illuminator, 2008. - вып. 1. – 160 с.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, в 2-х книгах/ С. Зи. - М.: Мир, 1984. – 456 с.
6. Нойкин Ю.М. Физические основы оптической связи / Ю.М. Нойкин, П.В. Махно // Электронное учебное пособие. - Ростов-на-Дону. – 2011. – 4.1.4.
7. Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов / С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – №5. – С. 176 – 185.
8. Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? / С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. - 2005. - №7. – С. 16 – 24.
9. Особенности конструирования мощных белых светодиодов / В.С. Абрамов, С.Г. Никифоров, В.П. Сушков, А.В. Шишов // Светодиоды и лазеры. - 2003. - № 1–2.
10. Рожанский И.В. Анализ причин падения эффективности электролюминесценции светодиодных гетроструктур AlGaInN при большой плотности тока накачки / И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм. - ФТП. - 2006. - Т. 40. - Вып. 7. - С. 861 — 867.
11. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами / М.Л. Бадгутдинов, Е.В. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. - 2006. - №6(40). - С.758 – 763.

12. Миранович В. Мощные светодиоды: Особенности применения, проблемы и методы решения / Миранович В., Филоненко И. // Электронные компоненты. – 2007. - №6. – С.45-49.
13. Закгейм А.Л. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Р. Мизиров // ФТП – 2010. - Т. 44. - вып. 3. – С.390-396.
14. Светодиоды „теплого“ белого свечения на основе $p-n$ -гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами из иттрий-гадолиниевых гранатов / Н.П. Социн, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, С.С. Широков, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 2009 - том 43. - вып. 5. – С.700-707.
15. Модульная многофункциональная оптоволоконная спектрометрическая система / А.И.Андреев, С.В.Мухин, В.В.Некрасов, В.А.Никитенко, А.В.Пауткина. - под ред. проф., д.ф.-м.н. Никитенко В.А. и доцента, к.ф.-м.н. Некрасова В.В. – Москва, 2008. – 365 с.
16. Влияние джоулева разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов / А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер // ФТП – 2006. – Т.40. – вып.5. – С.621- 627.
17. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов (часть1)/ С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. - 2005. - №(9-10). - С.48-54. // Температура в жизни и работе светодиодов (Часть 2) // Компоненты и технологии. - 2006. - №1. - С.18-23.
18. Temperature and current dependences of electroluminescence from InGaN/ GaN multiple quantum wells / Lee Jiunn-Chyi, Wu Ya-Fen, Wang Yi-Ping, NeeTzer-En //J. Cryst. Growth. - 2008. – Т.310; #23. – С.5143 – 5146.
19. Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. - №2(28) – С. 51-53.

20. Ходаков А.М. Математическое моделирование теплоэлектрических процессов в структурах полупроводниковых изделий с дефектами. Автореферат дисс. к.ф.-м.н., Ульяновск, УТУ, 2010.
21. Сергеев В.А. Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaN/GaN мощных светодиодов / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т.44. - №2. – С.230-234.
22. Сергеев В.А. Нелинейная тепловая модель гетеропереходного светодиода / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т.46. - №5. - С.691-694.
23. Никифоров С.Г. Исследование параметров семейства светодиодов CreeXLamp/ С.Г. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2006. - №11. – С.1-8.
24. Полещук А. Дegrаdация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полещук // Компоненты и технологии. – 2008. - №2. - С.30-35.
25. Патент US 7052180 В2 Прибор для определения температуры перехода СИД, 30.05.2006.
26. Мальцев А. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивлению р-п-переход – корпус / А. Мальцев, И. Мальцев // Полупроводниковая светотехника. - 2010. - №2. - С.40-41.
27. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел / А.Н. Магунов. - М.: Физматлит, 2002. – 224с.
28. Температурные измерения. Справочник. Под редакцией О.А. Герашенко.- Киев.: Наукова думка, 1989.
29. Патент US 2009/0306912 А1 Метод измерения температуры перехода СИД, 10.12.2009.
30. Патент US 2008/0205482 А1 Метод и испытательное оборудование для светодиодов и лазерных диодов, 28.08.2008.
31. Патент RU 2473149 С1 Способ определения температуры активной области светодиода, 23.11.2011.

32. Горюнов Н.Н. Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов / Н.Н. Горюнов. - М.: Энергия, 1972. - 155 с.
33. Данилин Н.С. Неразрушающий контроль в радиоэлектронике / Н.С. Данилин, Ю.А. Банников, В.П. Улитенко. - М.: Знание, 1974. – 63 с.
34. Лидский Э. Современный подход к оценке надежности изделий электронной техники / Э. Лидский, О. Мироненко, А. Гусев // Компоненты и технология. - 2000. - № 3. - С.58-63.
35. Некоторые закономерности деградации синих светодиодов на основе InGaN/GaN / Е.Д. Васильева, А.Л. Закгейм, Ф.М. Снегов, А.Е. Черняков, Н.М. Шмидт, Е.Б. Якимов // Светотехника. - 2007. - № 5.
36. Закономерности деградации светодиодов / И.М. Викулин, В.И. Ирха, Б.В. Коробицын, В.Э. Горбачев // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. - 2004. - №2. - С.55-56.
37. Гончарова Ю.С. Просветляющие и отражающие наноразмерные покрытия для полупроводниковых источников света / Ю.С. Гончарова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2000. – Т.2. – №.2. – С.203-205.
38. Полищук А.П. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А.П. Полищук, А.В. Туркин // Компоненты и технологии. - 2008. - №79. - С. 25-28.
39. Федухин А.В. К вопросу о постоянстве кажущейся энергии активации изделий электронной техники / А.В. Федухин // Математические машины и системы. – 2004. –№ 1. – С. 183–187.
40. Федухин А.В. Контрольные испытания СВТ на надежность в форсированных режимах / А.В. Федухин // Математические машины и системы. – 2002. – № 1. – С. 134–140.
41. Федухин А.В. Автомодельность форсированных испытаний на надежность / А.В. Федухин // Математические машины и системы. – 2002. – № 2. – С.184–192.

42. Федухин А.В. Ускоренные определительные испытания в форсированных режимах / А.В. Федухин // Математические машины и системы. – 2002. – № 3. – С.148–154.
43. РД 11 0755-90. Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. - РНИИ «Электронстандарт», 1990.
44. ОСТ 11.336.938-83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
45. РМ 11 0008-84. Изделия электронной техники. Методы ускоренных испытаний на долговечность и гамма-процентный ресурс. Общие требования.
46. Смирнов С.В. Методы исследования надежности наногетероструктурных монокристаллических интегральных схем: Учебное пособие / С.В. Смирнов. – Томск: ТУСУР, 2010. - 95с.
47. Строгонов А. Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний / А. Строгонов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. - №.3. – С.90-96.
48. Lall P. Tutorial: Temperature as an input to microelectronics-reliability models / P. Lall // IEEE Trans. Reliab. - 1996. - Vol.45. - N 1. - P. 3-9.
49. Bugno P. Characterization and reliability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress / P. Bugno. - Anno Academico, 2010. – P.105.
50. РД 11 0755-90. Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. - РНИИ «Электронстандарт», 1990.
51. Bowles J. B. A survey of reliability prediction procedures for microelectronics devices / J. B. Bowles // IEEE Trans. Reliab. – 1992. – Vol. 41. – № 1. – P. 2–12.
52. Гост 27.410-87. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. Изд. Стандартов, 1987.
53. Годовицын И.В. Срокслужбысветодиодов. Причиныотказов. / И.В. Годовицын // Московский Государственный Институт Электронной Техники. - 2007.

54. Paolo Bugno. Characterization and reability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress / Bugno Paolo. – AnnoAcademica, 2009/2010. – 123 с.
55. High – temperature degradation of GaN LEDs related to passivation / Matteo Meneghini, Lorenzo-Roberto Trevisanello, Ulrich Zehnder, Thomas Zahner, Uwe Strauss, GaudenzioMeneghesso, Enrico Zanoni. // IEEE Trans. Electron Devices. – 2006. – Т.53;№12. – P.2981-2987.
56. Bowles J. B. A survey of reliability prediction procedures for microelectronics devices / J. B. Bowles // IEEE Trans. Reliab. - 1992. - Vol.41. -N.1. - P.2-12.
57. Градобоев А.В., Деградация параметров гетероструктурAlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами/ А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов//Вопросы атомной энергетики. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013 - вып.2. -С.64-66.
58. LallP. Tutorial: Temperatureasaninputtomicroelectronics-reliabilitymodels / P. Lall // IEEETrans. Reliab. - 1996. - Vol.45. - N 1. - P. 3-9.
59. Стриха В.И. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике / В.И. Стриха, Е.В. Бузанаева. - М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
60. Выбор светильника на светодиодах [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://archive-by.com/page/3055074/2013-10-21/http://cortem.by/cortemqfm000r08u80032s.html>.
61. Преимущества светодиодных светильников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://exd.ru/cortemqfm000r08u80032s.html>.
62. Продукции SeoulSemiconductor: Каталог. – 2014.
63. Светодиоды КИПД154: прайс-лист ОАО НИИПП / TmL. - 2011.
64. Давыдов В.Н. Автоматизированный комплекс для исследования полупроводниковых структур / В.Н. Давыдов, Н.Г. Зайцев // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т.309. - №8. – С.42-46.
65. Заутер Г. Фотометрия светодиодов / Г. Заутер, М. Линдемманн, А. Шперлинг, О. Оно // Светотехника. - 2004. - № 3.

66. Круглов О. В. Измерение светового потока светодиодов / О.В. Круглов, В.Н. Кузьмин, К.А. Томский // Светотехника. - 2009. - № 3.
67. ГОСТ Р 8.749-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2014.
68. Кузьмин В. Приборы для измерения оптических характеристик светодиодов / В. Кузьмин, В. Антонов // Полупроводниковая светотехника. – 2010. - №3. – С.26 – 30.
69. Measurement of LEDs: Technical report. - CIE127-1997. ISBN 3900734844.
70. Никифоров С.Г. Фотометрический метод исследования полупроводниковых гетероструктур / С.Г. Никифоров // Заводская лаборатория. – 2010. - Т.76. - №1. – С.28 - 33.
71. Основы физической фотометрии: рекомендации международной комиссии по освещению // МКО. - 2009. - №8-2.
72. Камера КТХ-0,08-01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elstandart.spb.ru/Core/300/ktx.htm.
73. MIL-HDBK-202: Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts. – 2002.
74. ГОСТ Р 27.301.2011 Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. - М.: Стандартинформ, 2013.
75. ОСТ 11.336.938-83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
76. РМ 11.0008-84. Изделия электронной техники. Методы ускоренных испытаний на долговечность и гамма-процентный ресурс. Общие требования.
77. Shan O. Analysis of thermal properties of GaInN high-emitting diodes / O. Shan, Q. Dai, S. Chhajed, J. Cho, F. Schubert // J. of Applied Physics. – 2010. – P.108.
78. Коржнева Т.Г. Эффективность систем совмещенного освещения с позиции энергобаланса помещения / Т. Г. Коржнева, А. Т. Овчаров* // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием в

рамках III Всероссийского светотехнического форума с международным участием. - 2015. - С.17-22.

79. Зеленов Г. Измерение температуры р-п-переходов / Г. Зеленов // Современная электроника. - 2007. - №2. - С.38-39.

80. Дульнев Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов - М.: Радио и связь, 1990. - 312с.

81. Ежов В. Стандартизация и расчет тепловых характеристик мощных светодиодов / В. Ежов // Светотехника и электроника. – 2009. -№6. - С.42-48.

82. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел. / Г. Карслоу, Д. Егер - М.: Наука, 1964.

83. Луценко Е. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов / Е. Луценко // Полупроводниковая светотехника. - 2011. – № 2. – С.26 – 29.

84. Дохтуров В.В. Контроль теплового режима кристаллов в светодиодных лампах / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. - №5.

85. Дохтуров В.В. Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов, Ю.С. Гончарова // Полупроводниковая светотехника. – 2013. - Т.3. - №23. – С.18-19.

86. Бадгутдинов М.Л. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами / М.Л. Бадгутдинов, Е.В. Коробов, Ф.А. Лукьянов // Физика и техника полупроводников. - 2006. - №6(40). - С.758-763.

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

88. Мощные светодиоды белого свечения для освещения / М.Л. Бадгутдинов, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.П. Социн, А.Э. Юнович // Светотехника. - 2006. - №3. - С.36-40.
89. Кюри Д. Люминесценция кристаллов / Д. Кюри. - М.: ИЛ, 1961. - 199с.
90. Смирнов С.В. Температурная зависимость спектров излучения светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия и его твердых растворов / С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. - 2011. - №2 (24). – Ч.2. - С.55-58.
91. Тепловой режим светодиодов в сигнальных лампах синего и белого света / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов, Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова //Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 5–6. - С. 37–39.
92. Сокульская Н.Н. Исследование системы $Y_3Al_5O_{12}$ для СИД «белого» цвета / Н.Н. Сокульская // Тезисы докладов Восьмой всероссийской межвузовской науч.-технич. конференции студентов и аспирантов. - Зеленоград, 2001.- 54с.
93. Фотолюминесценция в гранатах Y_3Al_5 / Н.Н. Сокульская, В.А. Воробьев, О.В. Цюрупа, А.Ф. Голота // Исследования, синтез и технология люминофоров: сборник научных трудов ЗАО НПФ «Люминофор». - Ставрополь, 2001. - №44. – С.172-176.
94. Гончарова Ю.С. Устройство для измерения температуры полупроводниковых источников света в осветительных устройствах / Ю.С. Гончарова, Е.В. Саврук, С.В. Смирнов // Патент РФ на полезную модель, № 116693.
95. Гончарова Ю.С. Способ бесконтактного определения неравномерности температурного поля в полупроводниковых источниках света / Ю.С. Гончарова, Е.В. Саврук, С.В. Смирнов // Патент 2538070 РФ, МПК G01 R31/265 G01 K 7/00.
96. Исследование фотометрических характеристик, механизмов деградации и спектральных характеристик люминофоров полупроводниковых излучающих диодов / О.Л. Роденко, В.А. Гушин, П.Е. Сим, А.В. Мошкина // Материалы

докладов Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2011.- С.108-113.

97. Саврук Е.В. Температурная зависимость квантового выхода люминофоров для полупроводниковых источников света / Е.В. Саврук, Ю.С. Гончарова // Материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 2. - С.219-220.

98. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф.Крейт, У. Блэк. - М.: Мир, 1983. - 512с.

99. Гусев В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. - М.: Наука, 1991. - 304с.

100. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. - Л.: Энергия, 1974. - 264с.

101. Лидский Э. Современный подход к оценке надежности изделий электронной техники / Э. Лидский, О. Мироненко, А. Гусев // Компоненты и технология. - 2000. - № 3. - С.58-63.

102. OKI. Silicon Solution Company. Hand Book for Quality/Reliability. Issue. - 2004.

103. РД 11 0755-90. Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. РНИИ «Электронстандарт», 1990.

104. Дохтуров В.В. Временная и тепловая стабильность параметров полупроводниковых источников света при ускоренных испытаниях / В.В. Дохтуров, С.В. Смирнов // Полупроводниковая светотехника. - 2014. - Т.6. - № 32. - С.42-44.

105. Гончарова Ю.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов, В.С. Солдаткин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. - №2(28). - С.51-53.

106. Горюнов Н. Н. Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранении / Н. Н.Горюнов. - М.: Энергия, 1970. -102 с.

107. Зеленов Г. Измерение температуры р-п-переходов / Г. Зеленов // Современная электроника. - 2007. - №2. - С.38-39.
108. Абрамов В.С. Метод измерения температуры р-п перехода светодиодов / В.С. Абрамов, В.П. Сумков, Н.И. Сырко // Светодиоды и лазеры. - 2002.- №1-2. - С.35-37.
109. IES LM-80-08. Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LEDLight Sources. Illuminating Engineering Society of North America, 2008.
110. IES LM-79-08. Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. Illuminating Engineering Society of North America, 2008.
111. Bugno P. Characterization and reability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress / P. Bugno // AnnoAcademica. - 2009/2010.