

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

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)**

УТВЕРЖДАЮ

Декан РКФ

\_\_\_\_\_ Д.В. Озеркин

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2017 г.

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие

Зав. кафедрой РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2017 г.

Томск 2017

Туев В.И. Современные проблемы светодиодных технологий и светотехнических устройств: учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 136 с.

Учебное пособие предназначено для магистрантов и бакалавров всех направлений подготовки.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Список литературы к введению .....	6
1 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ.....	8
1.1 Светодиодные структуры GaN/(AlGaIn)/InGaIn/GaN.....	8
1.2 Технология получения гетероструктур .....	9
1.3 Экспериментальная МОСГФЭ - установка AIXTRON 2400 G3 HT .....	11
1.4 Экспериментальное исследование гетероструктур.....	13
1.4.1 Рентгеновская дифрактометрия структур .....	15
1.4.2 Спектры фотолюминесценции структур.....	18
1.4.3 Спектры электролюминесценции структур.....	21
1.4.4 Сравнение результатов измерений спектров ФЛ на разных установках.....	25
1.4.5 Температурные спектры ФЛ структур .....	26
Список литературы к разделу 1 .....	28
2 СВЕТОДИОДЫ .....	29
2.1 Типы корпусов .....	29
2.2 Люминофоры .....	32
3 НАДЕЖНОСТЬ СВЕТОДИОДОВ.....	37
3.1 Анализ основных механизмов деградации светодиодов.....	37
3.2 Нарушение электрического контакта .....	39
3.3 Деградация активной области светодиодов.....	40
3.4 Деградация электродов .....	41
3.5 Термическая деградация .....	42
3.6 Электростатический разряд и электрическая перегрузка.....	42
3.7 Термическая усталость и короткое замыкание.....	43
3.8 Деградация люминофора .....	44
Список литературы к разделу 3.....	51
4 ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОДИОДОВ .....	52
4.1 Отвод тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC.....	52
4.1.2 Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода.....	54
4.1.3 Модель теплового сопротивления для нескольких светодиодов на одном носителе.....	55
4.1.4 Требования к характеристикам .....	55
4.2 Рекомендуемые типы дизайна печатных плат.....	56
4.2.1 Тип I. Односторонняя печатная плата FR4 с/без дополнительной медной площадки.....	56
4.2.2 Тип II. Двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями.....	57
4.2.3 Тип III. Печатная плата с внутренним металлическим слоем.....	58
4.2.4 Рекомендуемые формы контактных площадок и посадочных мест для пайки .....	60
4.3 Анализ теплового влияния различных конструкций печатных плат .....	60
4.3.1 Сравнение пустых отверстий и отверстий, залитых припоем .....	62
4.3.2 Сочетания увеличения поверхности и количества отверстий .....	64
4.4 Регулирование температурных режимов с использованием внешних охлаждающих устройств .....	67
4.4.1 Выбор радиатора.....	68
4.4.2 Применение радиаторов .....	69
4.4.3 Реализация теплоотвода в светодиодной технике.....	71
4.4.4 Применение теплопроводящих паст.....	73
4.4.5 Применение теплопроводящих клеев.....	74

4.4.6	Применение теплопроводящих компаундов.....	75
4.4.7	Применение теплопроводящих подложек .....	76
4.4.8	Определение требований к характеристикам радиатора.....	78
4.5	Методы измерения температуры р-п-перехода .....	79
4.5.1	Пример вычисления .....	79
	Список литературы к разделу 4.....	80
5.	<b>ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ</b> .....	82
5.1	Органические светоизлучающие структуры в составе дисплея .....	83
5.1.1	Обоснование выбора конструкции макетов и экспериментальных образцов.....	83
5.2	Материалы для органических светоизлучающих диодов .....	85
5.2.1	Катодные материалы на основе лантаноидов.....	89
5.2.2	Модификация поверхности анода ИТО халькогенами .....	89
5.2.3	Электролюминесцентные материалы для органических светоизлучающих структур .....	92
5.2.4	Материалы для полимерных светоизлучающих диодов (PLED-materials).....	97
5.2.5	Печатные технологии изготовления ОСИД.....	102
5.2.6	Управление элементами ОСИД - дисплея .....	105
5.3	Технология изготовления ОСИД методом принтерной печати.....	107
	Список литературы к разделу 5.....	112
6.	<b>СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА</b> .....	115
6.1	Аналитический обзор светодиодных ламп .....	115
6.1.1	Лампы на единичных светоизлучающих диодах .....	117
6.1.2	Лампы с излучающими элементами ленточной структуры .....	118
6.1.3	Сравнительные характеристики ламп с излучающими элементами ленточной структуры .....	119
6.1.4	Излучающие элементы ленточной структуры.....	123
6.2	Устройства питания светодиодных ламп .....	125
6.3	Методы теплового анализа светодиодных ламп .....	129
6.3.1	Аналитический (теплофизический) метод.....	129
6.3.2	Графический (экспериментальный) метод.....	130
6.3.3	Метод поэтапного моделирования .....	132
6.3.4	Метод конечных разностей (МКР) .....	132
6.3.5	Метод конечных элементов (МКЭ) .....	133
	Список литературы к разделу 6.....	135

## ВВЕДЕНИЕ

До двадцати процентов всей вырабатываемой на Земном шаре электрической энергии тратится на цели освещения. Посмотрите на рис. В.1 как выглядит Земля с борта космического аппарата ночью [В.1]. Отчетливо видны ярко освещенные улицы и дороги крупных городов России, стран Европы, Азии, Северной Америки. Задача уменьшения затрат электрической энергии на освещение чрезвычайно актуальна.



Рисунок В.1. Вид на поверхность Земного шара ночью

В части энергосбережения для целей освещения знаменательным оказался 2011 год. Важность момента заключается в том, что именно в 2011 году появившиеся сравнительно недавно твердотельные источники света на основе гетеросистемы InGaN/GaN превзошли по значению параметра световой отдачи (количество света на единицу потребляемой электрической мощности) все использовавшиеся до этого времени электрические источники света: лампы накаливания, галогенные лампы, люминесцентные, натриевые и другие источники света.

В настоящем учебном пособии приведены некоторые результаты проведенных в 2010-2016 гг научно-исследовательских, опытно-конструкторско-технологических работ и прикладных научных исследований в рамках Федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», а также по постановлению Правительства №218: НИОКТР «Разработка высокоэффективных и надёжных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства»;

«Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания», «Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати». Работы выполнялись НИИ Светодиодных технологий и кафедрой Радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР в сотрудничестве с национальным исследовательским томским государственным университетом (разделы 1, 5) [В.2 - В.4], АО «НИИ Полупроводниковых Приборов» (г.Томск) (раздел 5), кафедрой Физической Электроники (раздел 3) и студенческим конструкторским бюро «Смена» (разделы 4,5), с обществом с ограниченной ответственностью «Руслед» - Томский ламповый завод (раздел 6) [В.5].

Пособие может быть полезно для студентов технических направления подготовки уровня магистратуры и бакалавриата.

#### Список литературы к введению.

В.1 Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://picslife.ru/kosmos/ogni-pochnoy-zemli-iz-kosmosa-chnyiy-mramor-2012.html>. Режим доступа – свободный. Дата обращения 29.01.2017 г.

В.2 Туев В.И., Малютин Н.Д. и др. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / Под ред. профессора Н.Д. Малютина. – Томск: Томск. Гос. ун-т систем упр. И радиоэлектроники, 2015. – 70 с. ISBN 978-5-86889-706-1.

В.3 Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства: отчет по 1 этапу ОКР. В 2 т. – Том 2. Светотехническое устройство / Туев В.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 350 с. – Инв. №24.02/01-2010.

В.4 Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати: отчет по 1 этапу ОКР «Органика». В 2 т. – Том 1. ЕГВА.467848.001 ПЗ / Туев В.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 113 с. – Инв. №26.01/01-2013.

В.5 Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания: отчет по этапу 1 «Выбор направления исследований» ПНИ по Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2014 г. № 14.577.21.0061 / Туев В.И. – Томск: Томский государственный

университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 149 с. – Номер  
госрегистрации 114100640084. – Инв. № 24.01/01-15.

# 1 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

## 1.1 Светодиодные структуры GaN/(AlGaN)/InGaN/GaN

Одной из наиболее эффективных полупроводниковых нитридных гетероструктур, пригодных для создания светодиода (СД), является гетеросистема  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , в которой область  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  исполняет роль квантовой ямы, а GaN – энергетического барьера. На основе данной структуры принципиально возможно создание эффективных СД в области длин волн излучения 0.8 эВ - 3.5 эВ (рисунок 1.1).

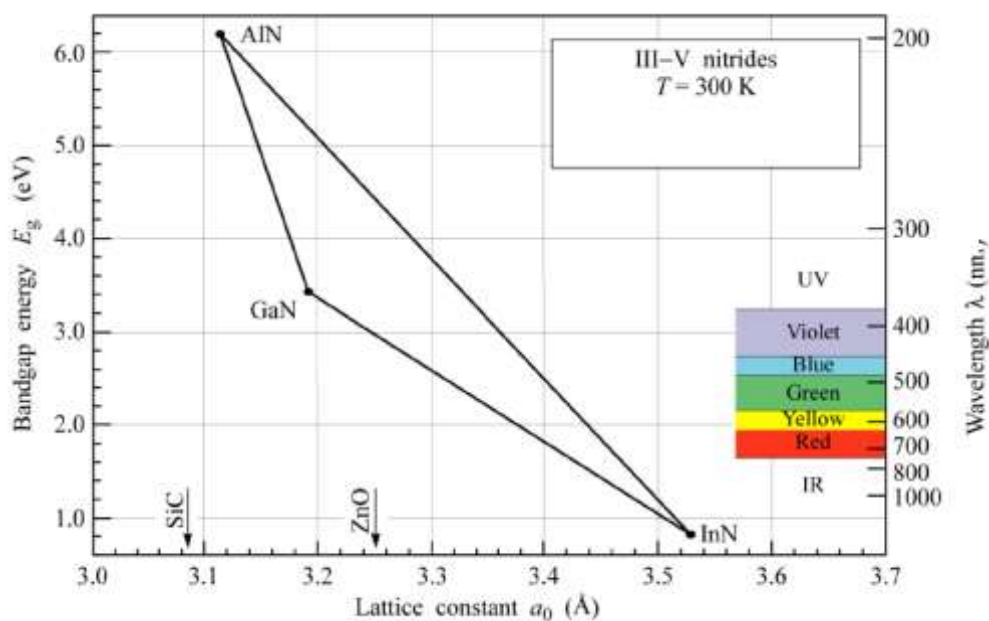


Рисунок 1.1 – Зависимость ширины запрещённой зоны твердых растворов InGaN, AlGaN и AlInN от постоянных решетки при 300 К [1.1]

Большой вклад в развитие технологии выращивания GaN был сделан Накамурой и его группой, которые разработали систему выращивания GaN методом металлоорганической газофазной эпитаксии, МОСГФЭ (Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) или по-другому Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE)) [1.2]. В 1993-1994-х годах они продемонстрировали первые светодиоды, голубого и зелёного свечения на основе двойной гетероструктуры InGaN/GaN, КПД которых достигал 10 %. В настоящее время СД на основе InGaN/GaN являются основными светодиодами синего и зелёного свечения. Кроме того, гетеросистема InGaN/GaN также подходит для создания светодиодов белого свечения, которое может быть получено путём смешения основных цветов - синего, зеленого и красного (технология RGB), или использованием синего



светодиода, покрытого люминофором, или ультрафиолетового светодиода, покрытого несколькими слоями люминофоров.

## 1.2 Технология получения гетероструктур

В настоящее время применительно к полупроводниковым нитридам разработаны практически все основные эпитаксиальные технологии, включая молекулярно-лучевую эпитаксию, МЛЭ (Molecular Beam Epitaxy (MBE)), хлорид - гидридную газофазную эпитаксию, ХГФЭ (Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)), газофазную эпитаксию из металлоорганических соединений, МОСГФЭ (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, МОСVD). Все данные технологии являются производными от технологии газотранспортной эпитаксии, ГФЭ (Vapor Phase Epitaxy (VPE)). Сравнительный анализ особенностей данных технологий дан в таблице 1.1, где число знаков «+» отражает преимущество рассматриваемой характеристики для данного технологического метода.

Таблица 1.1 Сравнение характеристик основных эпитаксиальных методов

Характеристика	ХГФЭ	МЛЭ	МОСГФЭ
Низкая скорость роста	+	+++	++
Резкость гетерограницы	+	+++	++
Однородность по подложке	+	++	+++
Производительность	++	+	+++
Стоимость оборудования	+++	+	++
Всего «+»	8	10	12

При эпитаксиальном выращивание двойных гетероструктур и гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) необходима низкая скорость роста для получения сверхтонких слоёв в несколько постоянных решетки. Метод ХГФЭ непригоден для получения квантово - размерных гетероструктур из-за высокой скорости роста (десятки мкм/час), но активно используется при выращивании толстых пленок, пригодных для использования в качестве подложек. Методы МЛЭ и МОСГФЭ являются основными методами получения квантово - размерных нитридных гетероструктур. Так при помощи метода МЛЭ возможно выращивание тонких слоев вплоть до моноатомной толщины [1.3], поскольку скорость роста нитридов при этом составляет от 1 моноатомного слоя в секунду до порядка 1 мкм/час, что позволяет контролировать толщину и фазовый состав каждого эпитаксиального слоя. Однако низкая производительность, дороговизна данного метода и

более высокая дефектность ростовых структур вследствие относительно низких температур роста при МЛЭ технологии ограничивает ее промышленное использование. Преимуществом метода МОСГФЭ является возможность варьировать скорость роста в широких пределах (0,1...3 мкм/час), что важно при выращивании приборных структур с существенно отличающимися значениями толщины слоёв и возможность загружать большое число подложек. В методе МОСГФЭ эпитаксиальное выращивание производится при пониженном давлении, но не меньше чем 100 мбар, и температурах не выше 1200 °С. Оборудование для данного метода обладает умеренной стоимостью и высокой производительностью, поэтому в настоящее время метод МОСГФЭ является основным промышленным методом выращивания светоизлучающих нитридных структур.

Общей проблемой всех эпитаксиальных технологий, которая затрудняет получение высококачественных нитридных гетероструктур, является отсутствие согласованных по решетке и термически совместимых материалов для подложек. Усилия, прилагаемые для получения объемных монокристаллов соединений  $A^{III}N$ , не привели пока к созданию технологии производства доступных по цене подложек большой площади. Самой распространенной подложкой для эпитаксии нитридных соединений в настоящее время является сапфир, реже карбид кремния (SiC), еще реже используются кремний, ZnO и другие материалы. Свойства гетероструктур, связанные с отличием решеток и тепловой совместимостью структуры пленка/подложка, включают тип кристаллической структуры, химический состав материала, реактивность, электрические свойства важные для определения пригодности материала в качестве подложки. Подложки определяют ориентацию пленки, полярность и морфологию ее поверхности, деформации и концентрации собственных дефектов в рабочих структурах. Латеральное рассогласование постоянных решеток для нитридов III-N в отношении инородных подложек приводит к высокой плотности дислокаций несоответствия, до  $10^8$ - $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Несоответствие коэффициентов теплового расширения между эпитаксиальной полупроводниковой пленкой и подложкой индуцирует механические напряжения, которые могут вызвать трещины в пленке, особенно для толстых пленок при охлаждении от температур их осаждения. Высокая плотность дефектов в нитридных структурах снижает внутреннюю квантовую эффективность СД, увеличивает пороговый ток в лазерах, вызывает обратные токи утечки в переходах, снижает подвижность носителей заряда и теплопроводность, что отрицательно сказывается на достижении предельных характеристик соответствующих приборов. Таким образом, для реализации полного приборного потенциала нитридов необходимы подложки, способные поддерживать эпитаксиальные слои высокого качества. Для этого проводятся соответствующие подготовки поверхности подложек,

такие как азотирование, осаждение низкотемпературного зародышевого слоя AlN, GaN или AlGaN, селективная эпитаксия с последующим латеральным эпитаксиальным наращиванием материала и другие. Всё это в определенной степени позволяет уменьшить плотность дислокаций, снизить механические напряжения и улучшить качество нитридных пленок.

Наиболее обнадеживающие промышленные результаты получены на подложках сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и карбида кремния (SiC). Разница в постоянных решеток между GaN и сапфировой подложкой при 300 К составляет 13,8 % для плоскости (0001). Несоответствие параметров решетки GaN и подложки карбида кремния 6H-SiC при 300 К составляет 3,4 %. Несмотря на то, что несоответствие параметров решеток в случае эпитаксии на сапфировой подложке значительно больше в сравнении с подложкой SiC, для роста СД структур на основе нитридов III-N чаще всего используют сапфировые подложки, так как сапфир обладает высоким кристаллическим совершенством, прозрачен в видимом и ультрафиолетовом диапазон длин волн, позволяет получать подложки большого диаметра и обладает существенно меньшей стоимостью по сравнению с другими типами подложек.

### **1.3 Экспериментальная МОСГФЭ - установка AIXTRON 2400 G3 HT**

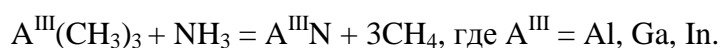
Эксперименты по выращиванию нитридных светодиодных структур проводились на оборудовании ООО «Сигм Плюс» (г. Москва) в установке фирмы AIXTRON – AIX 2400G3 HT методом МОСГФЭ. Основные узлы установки включают: газовую систему, реактор с системой нагрева, вакуумную систему. Предназначением газовой схемы является доставка реагентов в реактор, где происходит их взаимодействие и осаждение на подложке. С помощью газовой системы переносятся газообразные соединения и газ-носитель – водород или азот. Газовая схема организована таким образом, что для обоих газовых потоков предусмотрены два возможных пути распространения: в реактор или в «байпас». Прежде чем направить газовую смесь в реактор, она некоторое время поступает в «байпас», не попадая в реактор. Такая операция выполняется для того, чтобы при переключении потоков между «байпасом» и реактором, в реактор поступала установившаяся газовая смесь постоянного состава.

Реактор в установке AIX 2400 G3 HT горизонтальный планетарного типа (Planetary Reactor). В реакторе располагается круглый графитовый подложкодержатель, на который

укладываются до 11 «сателлитов» по периметру, в каждый из которых помещается двухдюймовая подложка. Подложкодержатель и «сателлиты» вращаются, притом в разных направлениях, для поддержания однородности состава растущего эпитаксиального слоя по площади подложки. Под подложкодержателем расположена система высокочастотного нагрева, с помощью которой контролируется температура подложек во время роста. Газовые потоки поступают в реактор перпендикулярно подложкодержателю в его центре, затем распространяются во все стороны, и выводятся по периметру реактора. Рост эпитаксиальных нитридных плёнок в методе МОСГФЭ осуществляется при давлениях в газовом потоке ниже атмосферного, обычно в диапазоне давлений 100...600 мбар. Для поддержания пониженного давления в реакторе предусмотрена вакуумная система.

В основе метода МОСГФЭ технологии лежит химическая реакция взаимодействия паров металлоорганических соединений (МОС) элементов III группы с газообразным гидридом азота - аммиаком  $\text{NH}_3$ , которая осуществляется на поверхности подложки, куда реагенты доставляются в потоке газа-носителя [1.2, 1.4]. Рост нитридных соединений GaN представляет сложный физико-химический процесс, состоящий из последовательности элементарных реакций на поверхности: адсорбции – десорбции газовых компонентов, диссоциации аммиака на радикалы, рекомбинации радикалов, встраивания атомов растущего материала и азота в решеточные узлы кристаллической решетки. В качестве источников МОС – реагентов используется триметилалюминий  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ , триметилиндий  $\text{In}(\text{CH}_3)_3$ , триметилгаллий  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ , триэтилгаллий  $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ . В обычных условиях эти соединения представляют собой легкоиспаряющиеся токсичные и легко воспламеняющиеся на воздухе смеси, что требует специальных мер безопасности при работе с ними. МОС – реагенты помещаются в термостатированный испаритель. Температуры испарения для источников составляют около 17 °С, кроме источника для триметилгаллия, для которого температура испарения близка к 0 °С. Пары МОС переносятся в реактор потоком газа-носителя - водорода или азота. Молекулярный азот инертен по отношению к процессам, протекающим в реакторе во время выращивания плёнок методом МОСГФЭ. Молекулярный водород, напротив, оказывает существенное влияние как на химические превращения в процессе осаждения реагентов, так и на скорость роста и, следовательно, на структуру и свойства растущего полупроводникового слоя.

Процесс образования нитридов группы III-N в методе МОСГФЭ может быть описан суммарной реакцией следующего типа:



Поскольку термическая стабильность аммиака достаточно велика, то при росте температура подложки может превышать 850 °С. В качестве легирующих химических примесей для получения плёнки р-типа проводимости используется бисциклопентодиенил магния  $Mg(C_5H_5)_2$ , а для получения плёнки n-типа проводимости – моносилан  $SiH_4$ .

## 1.4 Экспериментальное исследование гетероструктур

Эпитаксиальный рост нитридных структур проводился на сапфировой подложке ( $Al_2O_3$ ) с ориентацией (0001), диаметром 2 дюйма и толщиной 430 мкм. Использование сапфировых подложек определяется их невысокой стоимостью, наличием пластин большого диаметра, их высоким структурным совершенством и термостабильностью. Расчетная разница в постоянных решеток между базальными плоскостями сапфира и GaN составляет около 34%. При эпитаксии GaN на  $Al_2O_3(0001)$  происходит разворот пленки на 30° относительно подложки таким образом, что  $(0001)_{AlN} \parallel (0001)_{Al_2O_3}$ ,  $[01-10]_{AlN} \parallel [-12-10]_{Al_2O_3}$  и  $[-12-10]_{AlN} \parallel [-1100]_{Al_2O_3}$  [1.5]. В этом случае разница в постоянных решетки подложки и пленки составляет 13,2%. Из-за значительного несоответствия постоянных решеток и термических коэффициентов линейного расширения пленки и подложки, слои GaN, выращенные прямо на сапфире, получают низкого качества. Так ширина пика рентгеновских кривых качания таких слоев достигает 600 угл. сек, а концентрация электронов за счет образования собственных дефектов, предположительно вакансий азота, превышает  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В спектрах люминесценции таких пленок доминирует так называемая "желтая" (дефектная) полоса с максимумом длины волны излучения в области 2.2 эВ. Поэтому предэпитаксиальной подготовкой сапфировой подложки является наращивание на подложку при низких температурах, вблизи 500 °С, зародышевого аморфного слоя GaN толщиной около 20 нм, который в процессе нагрева до 1175 °С – рекристаллизуется и трансформируется из двумерного слоя в островки (домены) GaN. Затем проводится эпитаксиальное зарастивание островков нитридом галлия до тех пор, пока островковый рост не переходит в двумерный. Переход от островкового к двумерному росту наблюдался *in situ*, с помощью оборудования фирмы LayTec – EpiCurve TT. Операция нанесения низкотемпературного слоя и его последующая рекристаллизация с

заращиванием рекристаллизованного слоя проводится для снижения плотности дислокаций несоответствия в растущей пленке. Далее на низкотемпературный слой наращивается буферный нелегированный слой GaN толщиной около 1 мкм для изоляции активной области структуры от зародышевого слоя. На следующем этапе на буферном слое выращивается низкоомный слой n-GaN толщиной около 2 мкм, легированный Si. Затем выращивается активная область, состоящая из 5 пар следующих слоёв: квантовая яма InGaN шириной около 2 нм, выращенная при температурах 785...837 °С с содержанием In в твёрдом растворе  $x_{In} = 10...15$  % и легированный кремнием барьерный слой n-GaN толщиной около 10 нм, выращенный при температуре вблизи 900 °С. Газом-носителем во время роста активной области является – азот, остальные слои эпитаксиальной структуры выращиваются с газом носителем - водородом.

До этого момента, все ростовые образцы имели одинаковую структуру. Далее на основе данных образцов выращивались 2 типа нитридных структур. В структурах I типа (образцах N373...N426) следующим эпитаксиальным слоем является блокирующий слой на основе p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, легированного примесью Mg толщиной около 25 нм и количеством Al в твёрдом растворе  $x_{Al} = 20$  %, который наносится при температуре 1005 °С. Структуры II типа (образцы N427...N436) выращивались без блокирующего слоя. Последним при температуре 990 °С в обоих типах структур выращивается низкоомный слой легированного магнием p-GaN толщиной 100...130 нм. После этого структуры отжигаются в реакторе в водород - аммиачной атмосфере при 1000 °С в течении 7 мин 30 сек. с целью электрической активации атомов Mg, т.е. увеличения проводимости p-слоя путём разрушения нейтральных комплексов (Mg-H)<sup>0</sup> и формирования электрически активной акцепторной примеси магния. После процедуры отжига температура в реакторе опускается до комнатной. Затем эпитаксиальные структуры извлекаются из реактора для проведения контрольных измерений фотолюминесценции, электролюминесценции и рентгеновской дифрактометрии.

В ходе экспериментальных работ были исследованы 25 экспериментальных пластин светодиодных структур: N373...N436 (номера не по порядку). Все исследуемые образцы в соответствии с дизайном структуры были разбиты на две группы: (1) образцы N373...N426 содержащие блокирующий слой p-AlGa<sub>x</sub>N(Mg), и (2) образцы N427...N436 не содержащие блокирующего слоя AlGa<sub>x</sub>N. Соответствующая геометрия ростовых структур I типа (с блокирующим слоем AlGa<sub>x</sub>N) и II тип (без блокирующего слоя) AlGa<sub>x</sub>N представлена на рисунках 1.2 (а) и 1.2 (б) соответственно.

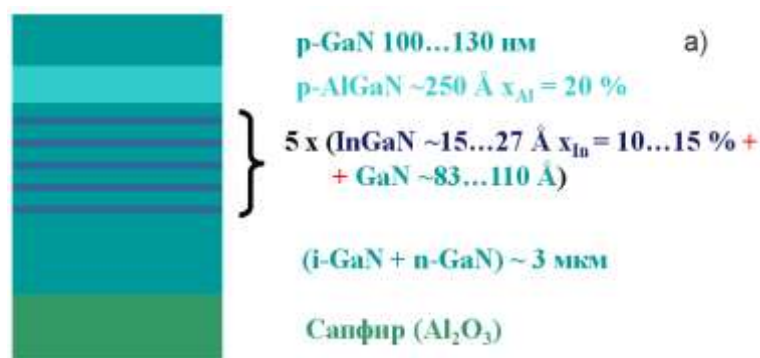


Рисунок 1.2 (а) - Геометрия структур с блокирующим слоем p- $Al_xGa_{1-x}N(Mg)$ .

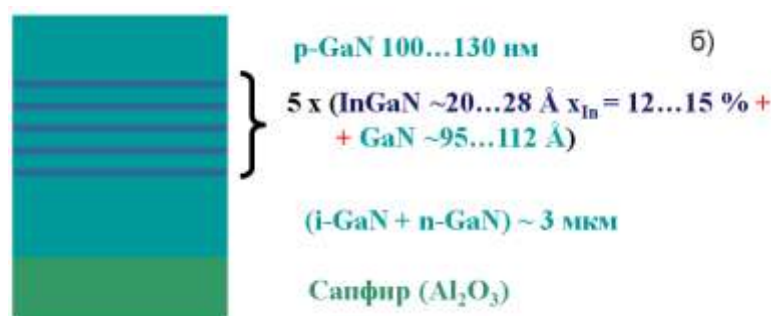


Рисунок 1.2 (б) - Геометрия структур без блокирующего слоя  $Al_xGa_{1-x}N(Mg)$ .

Далее ростовые структуры поступали на измерения рентгеновской дифрактометрии для получения информации о геометрии и фазового состава нитридных структур.

#### 1.4.1 Рентгеновская дифрактометрия структур

Измерения рентгеновской дифрактометрии проводились на установке Vektor-GaN фирмы Nanometrics. Длина волны рентгеновского излучения  $K_{\alpha 1}$  линии атома Cu, используемая в установке составляла 1,540 Å. Поскольку длина волны рентгеновского излучения мала, то излучение глубоко проникает в кристаллическую структуру материала. Рентгеновские лучи отражаются от отдельных атомов по закону Брэгга  $2d\sin = n\lambda$ , где  $d$  – межплоскостное расстояние в кристаллической решетке,  $n$  – угол падения,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения. При рентгеновских измерениях ростовых нитридных структур использованы следующие параметры: симметричный рефлекс (002), угол падения рентгеновского пучка  $16^\circ$ , Rock Angle Step – 4 arcsec, Rotation -  $0^\circ$ , Tilt -  $0^\circ$ .

На рисунке 1.3 приведён интерфейс программного обеспечения установки Vektor-GaN. Синяя (верхняя) кривая – результат измерения рентгеновской кривой качания светодиодного образца (GaN/InGaN/GaN), зелёная (нижняя) кривая – результат

моделирования в программе Accufit. Пик с наибольшей интенсивностью - отражение от толстого слоя GaN. По его величине, полуширине FWHM, можно судить о плотности дислокаций несоответствия. Остальные рентгеновские пики связаны с квантовыми ямами InGaN. В программу для моделирования Accufit, в качестве начального приближения задаются предполагаемые (технологические) значения толщины полупроводниковых слоев, полученные из данных in situ мониторинга и расчетное содержание In в квантовых ямах InGaN, а так же содержание Al в блокирующем слое AlGaN, на основе расходов газовых компонентов в процессе роста нитридной структуры. Выходными данными моделирования в программе Accufit, которые необходимы для исследования, служат ширина квантовых ям InGaN, толщина барьерного слоя GaN, а также содержание In в квантовых ямах InGaN.

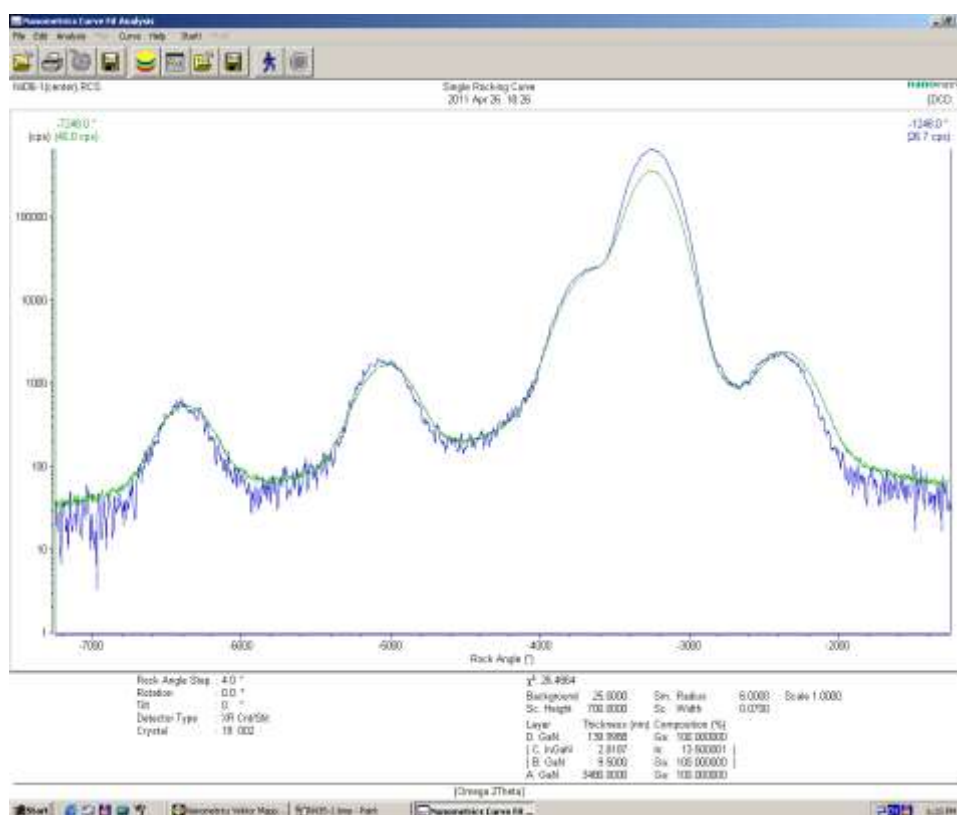


Рисунок 1.3 - Рентгеновская кривая качания и результат моделирования для экспериментального образца (GaN/InGaN/GaN)

В таблицах 1.2 и 1.3 приведены результаты измерений кривых рентгеновской дифракции и моделирования этих кривых в программе Accufit для структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN и GaN/InGaN/GaN соответственно.

Таблица 1.2 - Данные рентгеновской дифрактометрии структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN. Здесь FWHM – полуширина кривой качания, d(InGaN) – ширина



КЯ InGaN,  $d(\text{GaN})$  – толщина барьера GaN,  $x_{\text{In}}$  – содержание In в КЯ InGaN.

№образца	FWHM (GaN), arcsec	$d(\text{InGaN})$ , нм	$x_{\text{In}}$ , %	$d(\text{GaN})$ , нм
1	270,6	2,00	11,50	8,58, содержит 1,75% In
2	275,0	1,90	11,50	9,12, содержит 0,82% In

Таблица 1.3 – Данные рентгеновской дифрактометрии структур GaN/InGaN/GaN. Здесь FWHM – полуширина кривой качания,  $d(\text{InGaN})$  – ширина КЯ InGaN,  $d(\text{GaN})$  – толщина барьера GaN,  $x_{\text{In}}$  – содержание In в квантовой яме InGaN.

№ образца	FWHM GaN, arcsec	$d(\text{InGaN})$ , нм	$x_{\text{In}}$ , %	$d(\text{GaN})$ , нм
3	286,9	2,00	13,99	10,40
4	284,1	1,98	12,00	10,36

Как показывает анализ рентгеновских измерений для исследованных нитридных структур значения FWHM кривых качания составляет 261-283,9 arcsec для структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN и 255,2.....277,7 arcsec для структур GaN/InGaN/GaN, что указывает на несколько большую дефектность структур с блокирующим слоем AlGaN. Соответствующие значения ширины квантовых ям InGaN колеблются в пределах 1,58.....2,68 нм и 1,98.....2,81 нм, а содержание In в квантовых ямах в пределах 10.....15,25 % и 12-14,7 нм соответственно. Соответствующие значения толщины барьера GaN в исследованных структурах изменяются в пределах 8,38.....11,0 нм и 9,5.....11,2 нм соответственно.

Здесь для гетероструктур GaN/AlGaN/InGaN/GaN и GaN/InGaN/GaN усредненные значения FWHM (GaN) (arcsec) равны 273,6 и 275,3; средние значения ширины квантовой ямы  $d(\text{InGaN})$  (нм) равны 2,12 и 2,30; среднее содержание In (%) в квантовых ямах InGaN равны 13,40 и 13,69; средние значения толщины барьера  $d(\text{GaN})$  (нм) равны 9,96 и 10,29 соответственно.

Таким образом, основные размерные параметры нитридных структур I (без блокирующего слоя AlGaN) и II (с блокирующим слоем AlGaN) типов и достаточно близки и в среднем составляют:

полуширина кривой качания  $\text{FWHM (GaN)} = 274,5 \text{ arcsec}$ ,

ширина квантовой ямы  $d(\text{InGaN}) = 2,20 \text{ нм}$ ,

толщина барьера  $d(\text{GaN}) = 10,12$  нм,  
среднее содержание In в КЯ InGaN равно 13,55 %.

Далее ростовые нитридные структуры поступали на измерение спектральных карт распределения длины волны фотолюминесценции (ФЛ) по площади пластины.

#### 1.4.2 Спектры фотолюминесценции структур

Измерения спектральных карт ФЛ проводились на установке RMP Sigma при длине волны возбуждения 266 нм (четвёртая гармоника YAG лазера) при следующих настройках: Slit Width – 0,1 мм Scan Resolution – 0,5 мм, Scan Rate – 30 pts/s, Grating – 300 штрихов/мм (Wavelength resolution – 1 нм) и мощности лазера около 1,5 мВт. Все спектры ФЛ ростовых пластин измерялись при идентичных экспериментальных условиях.

Типичные спектральные карты фотолюминесценции основной (рабочей) полосы излучения ростовых структур представлены на рисунке 1.4. Как видно из рисунка 1.4 реализуются два вида распределения основной полосы излучения по длине волны – концентрические (левая карта) и неконцентрические (правая карта) полосы роста. Неконцентрическое распределение характерно при выращивании активной области на тимплейтах, а концентрическое распределение – для случаев полного эпитаксиального цикла выращивания структуры на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Здесь интервал длин волн основной полосы фотолюминесценции составляет 443,2.....456,7 мкм при средней длине волны 450,7 мкм для левого рисунка 4.4 и соответственно 449,4.....469,2 мкм и 461,1 мкм для правого рисунка 4.4.

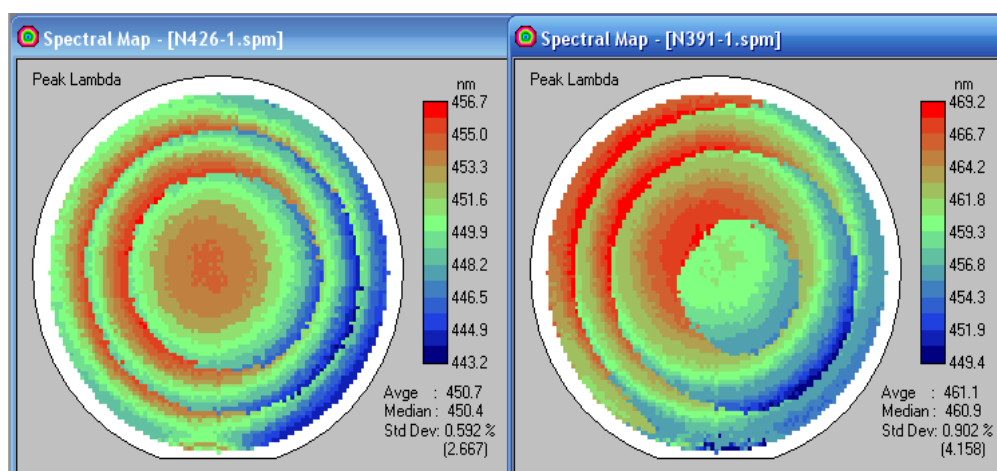


Рисунок 1.4 – Типичные спектральные карты распределения длины волны фотолюминесценции по ростовой пластине, измеренные на установке RPM Sigma

В обоих случаях представлены гетероструктуры GaN/AlGaIn/InGaIn/GaN. Из рисунка 1.4 следует, что для спектров фотолюминесценции ростовых структур характерен разброс экспериментальных значений основной длины волны излучения ФЛ, около 20 нм, по площади пластины.

Приведенные выше распределения длины волны фотолюминесценции по площади пластины характерны и для других измеряемых параметров структуры - интенсивности основной полосы фотолюминесценции на пиковой длине волны и ее полуширины, FWHM. Измерения спектров фотолюминесценции на границе длин волн излучения показывает присутствие двух основных пиков излучения с близкими параметрами - длинами волн излучения и интенсивностями основных полос ФЛ, как это следует из рисунка 1.5.

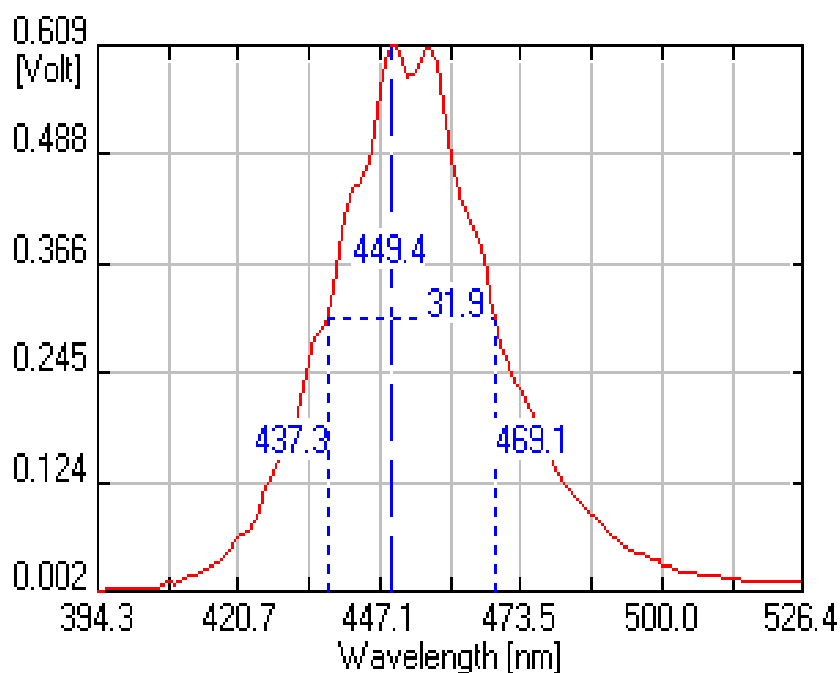


Рисунок 1.5 – Спектр фотолюминесценции на границе двух кругов распределения на спектральной карте

Для обнаружения спутниковых (нерабочих) пиков фотолюминесценции, не связанных с излучением квантовых ям InGaIn, проводились измерения спектров фотолюминесценции в широком диапазоне длин волн.

На рисунке 1.6 приведен спектр фотолюминесценции образца (GaN/AlGaIn/InGaIn/GaN), в диапазоне длин волн от 300 до 700 нм. В спектре излучения такой структуры присутствует основной пик фотолюминесценции на длине волны

454,8 нм, связанный с излучением из квантовой ямы InGaN/GaN и менее интенсивная "желтая" (дефектная) полоса излучения в диапазоне длин волн 550...650 нм, которая обычно присутствует в спектрах ФЛ дефектных образцов GaN. Интенсивность "желтой" полосы излучения в исследованных нитридных структурах примерно в 40...100 раз меньше, чем интенсивность основного пика излучения в области около 450 нм, связанного с квантовыми ямами InGaN.

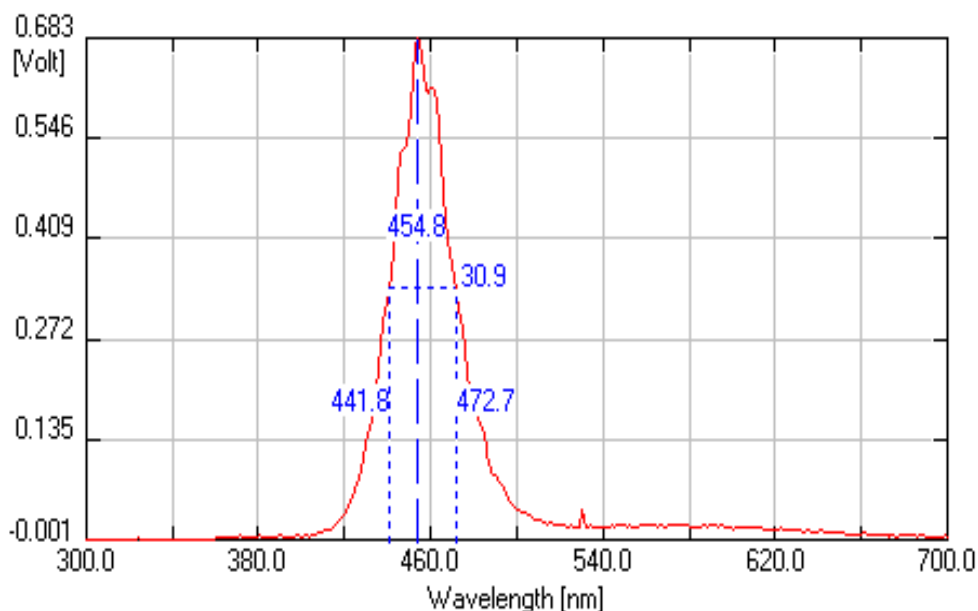


Рисунок 1.6 – Спектр ФЛ, измеренный в широком диапазоне длин волн

Результаты измерения параметров ФЛ в структурах GaN/AlGaIn/InGaN/GaN и GaN/InGaN/GaN представлены в таблицах 1.4 и 1.5 соответственно. Из этих таблиц следует, что длина волны ФЛ  $\lambda_{\text{ФЛ}} = 450,4 \dots 469,9$  нм, а ее полуширина, FWHM, = 27,1.....37,6 нм для структур GaN/AlGaIn/InGaN/GaN и  $\lambda_{\text{ФЛ}} = 444,9 \dots 478,9$  нм и FWHM = 30.5.....35,3 нм для структур GaN/InGaN/GaN. Таким образом, параметры фотолюминесценции –  $\lambda_{\text{ФЛ}}$  и FWHM для обоих типов структур достаточно близки. Средние значения  $\lambda_{\text{ФЛ}} = 450,3$  нм и значение FWHM = 32,2 нм для структур GaN/AlGaIn/InGaN/GaN, притом, что соответствующие средние значения  $\lambda_{\text{ФЛ}} = 457,7$  нм, FWHM = 33,3 нм для структур GaN/InGaN/GaN близки. Соответствующие усредненные значения  $\lambda_{\text{ФЛ}}$  и FWHM для обеих типов излучающих структур составляют 454 нм и 32,7 нм соответственно.

При этом средняя интенсивность излучения основной полосы фотолюминесценции  $I(\lambda_{\text{ФЛ}})$  (в отн. ед.) для структур GaN/AlGaIn/InGaN/GaN составляет 0.627, в то время как для структур GaN/InGaN/GaN эта величина равна 0.963 при идентичных условиях измерения. Таким образом, квантовая эффективность излучения нитридных структур без

блокирующего слоя AlGaN примерно в 1,5 раза выше по сравнению со структурами GaN/AlGaN/InGaN/GaN, что указывает на более высокую дефектность гетероструктур с блокирующим слоем на основе твердого раствора AlGaN.

Таблица 1.4 – Данные измерений параметров ФЛ для структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN, снятые в идентичных условиях. Здесь  $\lambda_{\text{ФЛ}}$  – длина волны излучения,  $I(\lambda_{\text{ФЛ}})$  – ее интенсивность, FWHM –полуширина полосы излучения

№ образца	$\lambda_{\text{ФЛ}}$ , нм	$I(\lambda_{\text{ФЛ}})$ , отн. ед.	FWHM, нм
1	461,6	0,428	34,8
	3,64	0,045	0,950
2	467,8	0,227	37,6
	5,538	0,064	1,469

Таблица 1.5 - Данные измерений параметров ФЛ для структур GaN/InGaN/GaN, снятые в идентичных условиях. Здесь  $\lambda_{\text{ФЛ}}$  – длина волны излучения,  $I(\lambda_{\text{ФЛ}})$  - интенсивность полосы излучения, FWHM –полуширина полосы излучения

№ образца	$\lambda_{\text{ФЛ}}$ , нм	$I(\lambda_{\text{ФЛ}})$ , отн. ед.	FWHM, нм
427	453,6	0,930	35,1
	4,766	0,128	0,995
428	462,9	0,972	34,9
	5,790	0,121	0,972

Вид спектров фотолюминесценции в большой степени определяется условиями оптического возбуждения – длиной волны излучения и мощностью накачки. Это определяет какие области структуры участвуют в формировании соответствующих спектров фотолюминесценции. Для локализации области возбуждения в активной области ростовой структуры предпочтительны измерения спектров электролюминесценции.

### 1.4.3 Спектры электролюминесценции структур

Для измерения спектров электролюминесценции (ЭЛ) в образцы вплавлялись точечные индиевые контакты путём нагревания до температуры 450 °С. Контакт к р-слою GaN наносился непосредственно на поверхность, а для контакта к n-слою GaN с помощью алмазного скрайбера эпитаксиальные слои «процарапывались» до слоя n-GaN.

Исследуемый образец укладывался на специальную приставку вне установки RPM Sigma. С помощью иглочек к структуре прикладывалось прямое смещение, что вызывало люминесцентное свечение, которое с помощью световода заводилось в установку RPM Sigma в ту же регистрирующую схему, которая использовалась для измерения спектров ФЛ. Измерения спектров ЭЛ проводились при токах 5 мА, 30 мА и максимальном токе, который позволял подать источник.

На рисунке 1.7 приведены сравнительные спектры ЭЛ (а) при токе 30 мА и ФЛ (б) для образца (GaN/AlGaN/InGaN/GaN). Спектры ФЛ и ЭЛ различны, что объясняется различными механизмами возбуждения люминесценции. В случае ЭЛ при приложении напряжения изменяется профиль энергетических зон, из-за эффекта Штарка, что приводит к некоторому сдвигу длины волны излучения в область более длинных волн.

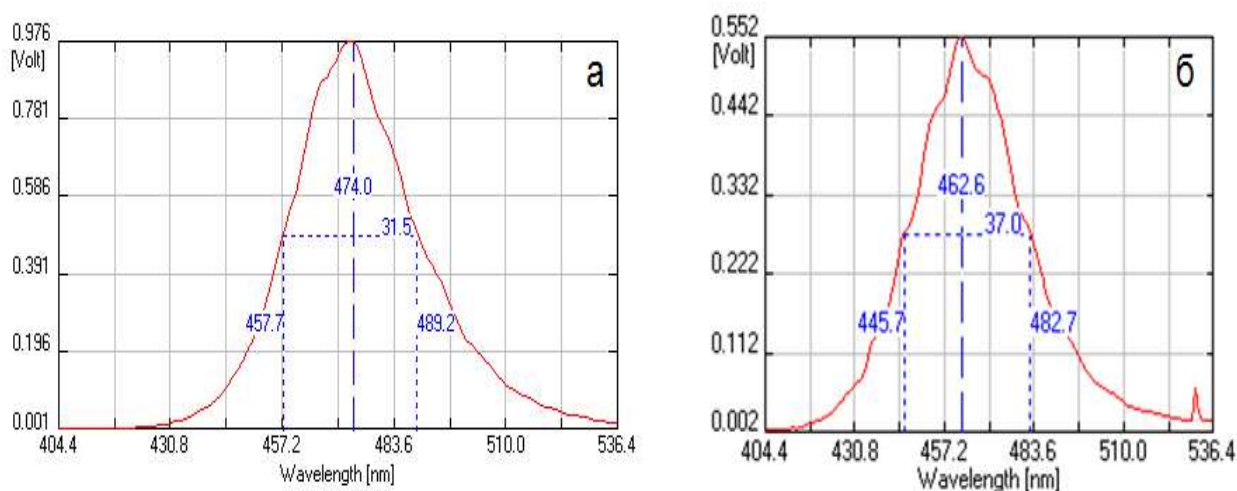


Рисунок 1.7 – Спектры: электролюминесценции (а) и фотолюминесценции (б) гетероструктуры (GaN/AlGaN/InGaN/GaN)

Основным механизмом длинноволнового сдвига длины волны электролюминесценции по отношению к длине волны фотолюминесценции является приложенное прямое смещение. В исследуемых образцах также обнаружен и другой механизм, связанный с влиянием слоя AlGaN, выращенного после активной области светодиодной структуры GaN/AlGaN/InGaN/GaN.

В таблицах 1.6 и 1.7 приведены результаты измерений спектров ЭЛ при токах 5 мА, 30 мА и величине  $I_{\max}$  для образцов на основе структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN и образцов на основе гетероструктур GaN/InGaN/GaN соответственно. Из сравнения таблиц 1.4 с 1.6 и 1.5 с 1.7 следует, что в образцах содержащих слой AlGaN сдвиг длины волны излучения составляет 10...15 нм, а для образцов, не содержащих слоя AlGaN, сдвиг

уменьшается до 5...10 нм. Видимо это происходит из-за деформации последней КЯ при наличии слоя AlGaN. Так же из таблиц 1.6 и 1.7 следует, что интенсивность электролюминесценции при увеличении тока инжекции от 5 мА до 30 мА, т.е. в 6 раз, увеличивается в среднем в 6,8 раза, т.е. практически линейно, для структур с блокирующим слоем AlGaN и в среднем в 10,7 раза в структурах без блокирующего слоя AlGaN.

По-видимому, это связано с тем, что слой AlGaN имеет значительное электросопротивление, что приводит к значительному падению напряжения на данном слое. Действительно, высокое содержание Al(до 20%) затрудняет эффективность легирования такого слоя вследствие заглубления энергетического уровня примеси Mg. Не оптимальное легирование слоя AlGaN примесью Mg может обуславливать высокое электросопротивление блокирующего слоя. Это подтверждается тем, что для структур GaN/InGaN/GaN "раскрытие" вольт – амперных характеристик имеет место при прямых напряжениях вблизи 3 В, в то время как для структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN это требует прямых смещений более 4 В.

Анализ экспериментальных данных таблиц 1.6 и 1.7 показал, для структур GaN/AlGaN/InGaN/GaN средние значения длины волны электролюминесценции  $\lambda_{ЭЛ} = 470,9$  нм и полуширины этой полосы, FWHM, равно 29,1 нм. Соответствующие значения  $\lambda_{ЭЛ} = 465,5$  нм и FWHM = 24,4 нм для структур GaN/InGaN/GaN.

Обобщенные средние значения соответствующих величин для обоих типов структур равны 468,2 нм и 26,9 нм соответственно. Следует отметить, что эти обобщенные средние значения больше на 14 нм и меньше на 5,8 нм по отношению к соответствующим экспериментальным значениям  $\lambda$  и FWHM для спектров фотолюминесценции этих же структур

Таблица 1.6 Данные измерения параметров электролюминесценции (ЭЛ) для гетероструктур GaN/AlGaN/InGaN/GaN

№ образца	ЭЛ при токе 5 мА				ЭЛ при токе 30 мА				ЭЛ при токе $I_{max}$				
	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед	FWHM, нм	U, В	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед.(В)	FWHM, нм	U, В	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед	FWHM, нм	U, В	$I_{max}$ , мА
1	477,2	0,189	28,0	5,4	477,2	1,169	30,2	8,5	477,2	1,866	32,3	11	56
2	470,2	0,172	28,6	5,1	469,2	1,027	31,1	8,1	469,2	1,569	32,3	10,2	51,5

Таблица 1.7 Данные измерения параметров электролюминесценции (ЭЛ) для гетероструктур GaN/InGaN/GaN

№ образца	ЭЛ при токе 5 мА				ЭЛ при токе 30 мА				ЭЛ при токе $I_{max}$			
	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед	FWHM, нм	U, В	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед.(В)	FWHM, нм	U, В	$\lambda_{ЭЛ}$ , нм	Интенс., отн.ед	FWHM, нм	U, В
3	462,9	0,101	24,0	4,1	455,6	1,662	26,6	7	455,6	2,819	26,4	9
4	473,3	0,305	25,0	4,4	472,3	1,922	28,5	7	466,1	3,012	29,9	9,1



#### 1.4.4 Сравнение результатов измерений спектров ФЛ на разных установках

Помимо измерений спектров фотолюминесценции на установке RPM Sigma были проведены измерения ФЛ при других экспериментальных условиях, результаты которых представлены на рисунке 1.8(а,б).

На измеренных спектрах присутствуют два пика, пик связанный с излучением КЯ InGaN в области 450...460 нм и более интенсивный "желтый" (дефектный) при 550...650 нм. Пик на длине волны 700...750 связан с измерительной установкой. Данные спектры излучения, полученные в условиях высокой оптической накачки, разительно отличаются от спектров на рисунках

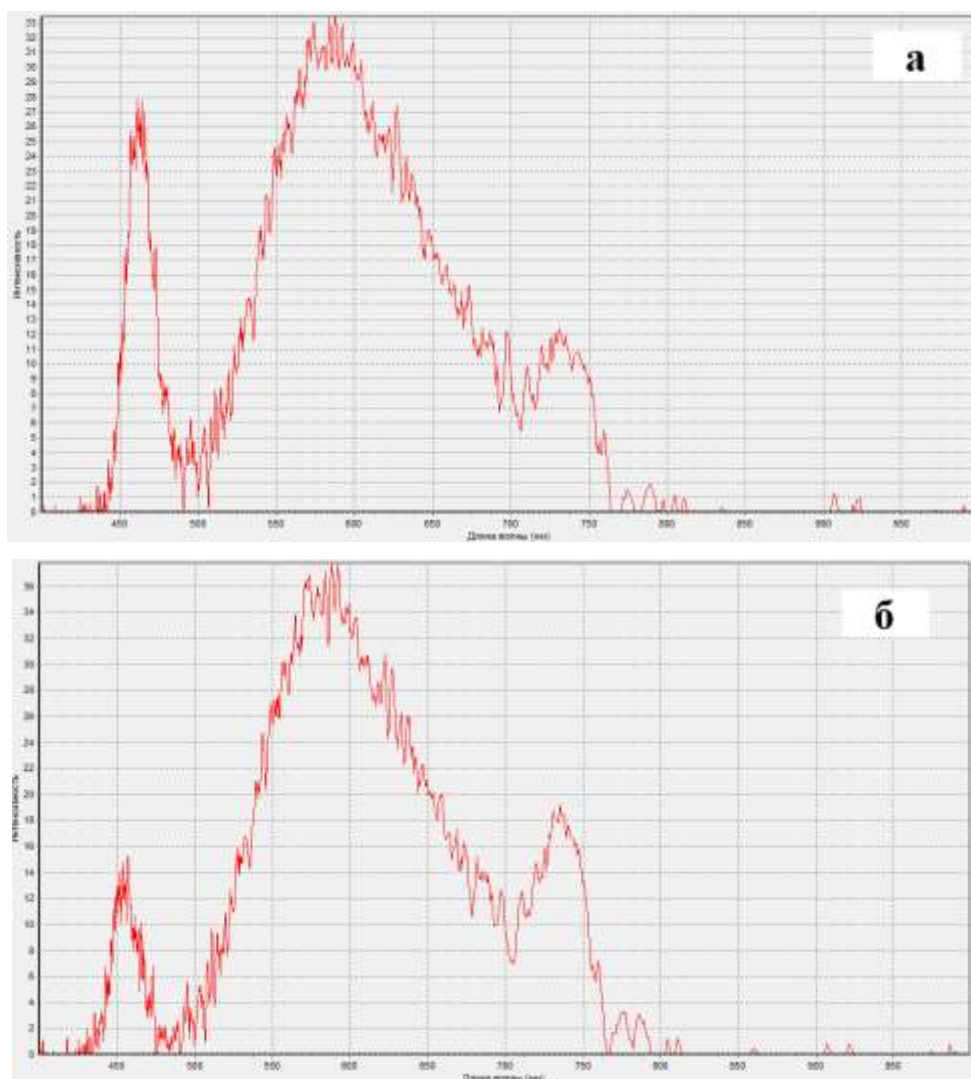


Рисунок 1.8 – Спектры фотолюминесценции образцов 1 (а) и 2 (б) при возбуждении мощной (P=450 мВт) УФ - лампой с длиной волны 360 нм

1.5, 1.6, 1.7(б), полученные в условиях маломощной оптической накачки. Для спектров фотолюминесценции, измеренных на установке RPM Sigma (YAG - лазер с длиной волны 266 нм и мощностью 1,5 мВт) характерно наличие основного интенсивного пика от КЯ InGaN с длиной волны излучения 450.....480 нм и в десятки раз менее интенсивной "желтой" полосы. Это обусловлено тем, что в последнем случае до активной области структуры, из-за поглощения в слоях GaN, доходит около 10 % мощности накачки лазера, что обуславливает низкий уровень возбуждения. Для спектров, изображенных на рисунке 1.8(а, б) характерно то, что желтая полоса интенсивнее основного пика, связанного с излучением КЯ InGaN. Такое разительное отличие в случае возбуждения люминесценции мощной УФ - лампой, по - видимо, связано с тем, что её излучение проникает в низкоомную и буферную области GaN с высокой плотностью дефектов. При этом можно отметить, что в случае структуры GaN/InGaN/GaN относительная интенсивность "синей" полосы в области около 450 нм выше, чем в структуре GaN/AlGaN//InGaN/GaN (1.8(а,б)).

#### 1.4.5 Температурные спектры ФЛ структур

Проведены измерения спектров ФЛ образцов N2 и N9 в диапазоне температур от 5 до 300 К при накачке HeCd-лазером (мощность на образце 5 мВт, длина волны излучения 325 нм) в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) (рисунки 1.9, 1.10).

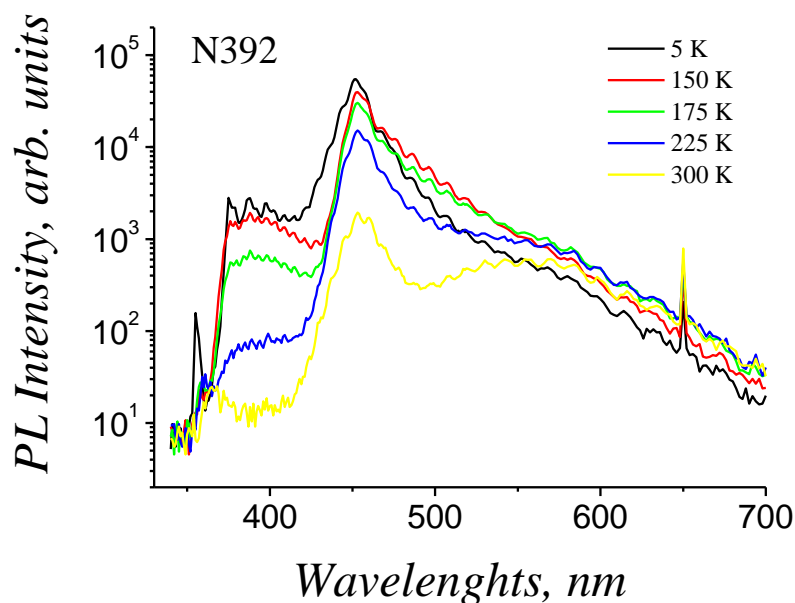


Рисунок 1.9 – Спектры фотолюминесценции образца N2(GaN/AlGaN/InGaN/GaN) измеренные в интервале температур 5-300К.

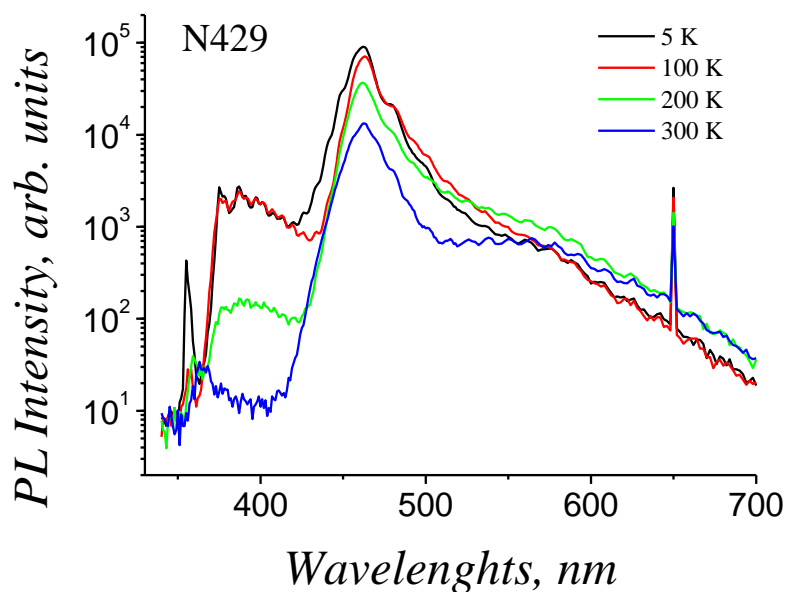


Рисунок 1.10 – Спектры фотолюминесценции образца N9(GaN/InGaN/GaN) измеренные в интервале температур 5-300К

В спектрах фотолюминесценции образца N2 кроме основного пика от КЯ InGaN на длине волны 452...453 и мало интенсивной "желтой" полосы в диапазоне 550...650 нм, присутствуют пики от GaN на длине волны 355...364 нм и полоса излучения вблизи 370...410 нм, возможно связанная с донорно-акцепторной рекомбинацией.

Спектры фотолюминесценции образца N9 во многом подобны спектрам ФЛ образца N2. С той лишь разницей, что максимум излучения КЯ приходится на 462...463 нм и тем, что в отличие от образца N2 в "жёлтой" области наблюдается не отчетливый пик излучения, а «полочка». При изменении температуры от 5 до 300К интенсивность основного пика связанного с КЯ InGaN снижается приблизительно в 25 и 5 раз для образцов N392 и N429, соответственно. Это свидетельствует о том, что в образце N2(GaN/AlGaN/InGaN/GaN) при комнатной температуре значительный вклад в рекомбинацию вносят безызлучательные механизмы, обусловленные большей дефектностью данной структуры.

### Список литературы к разделу 1

- 1.1 Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича.– М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
- 1.2 Nakamura S., Pearton S., Fasol G. The Blue Laser Diode (Springer, Berlin). – 1997. – P. 335.
- 1.3 Фотоника: Словарь терминов / Ковалевская Т.Е., Овсяк В.Н., Белоконев Е.В. и др.; под ред. Овсяка В.Н. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 342 с.
- 1.4 Feng Z.C. III-Nitride devices and nanoengineering. / London: Imperial College Press, 2008. – P.477.
- 1.5 Dovidenko K., Oktyabrsky S., Narayan J., Razedhi M. Aluminum nitride films on different orientations on sapphire and silicon // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79. – P.24-39.

## 2 СВЕТОДИОДЫ

### 2.1 Типы корпусов

Конструкции СД условно можно разделить на маломощные (индикаторные) СД (потребляемая электрическая мощность составляет менее 200 мВт), средней мощности (200 – 900 мВт), и мощные СД с потребляемой мощностью от 0.9 Вт. По конструкции корпуса СД можно разделить на две группы: со штыревыми выводами и для поверхностного монтажа с планарными выводами. Для мощных СД одним из важнейших параметров является тепловое сопротивление.

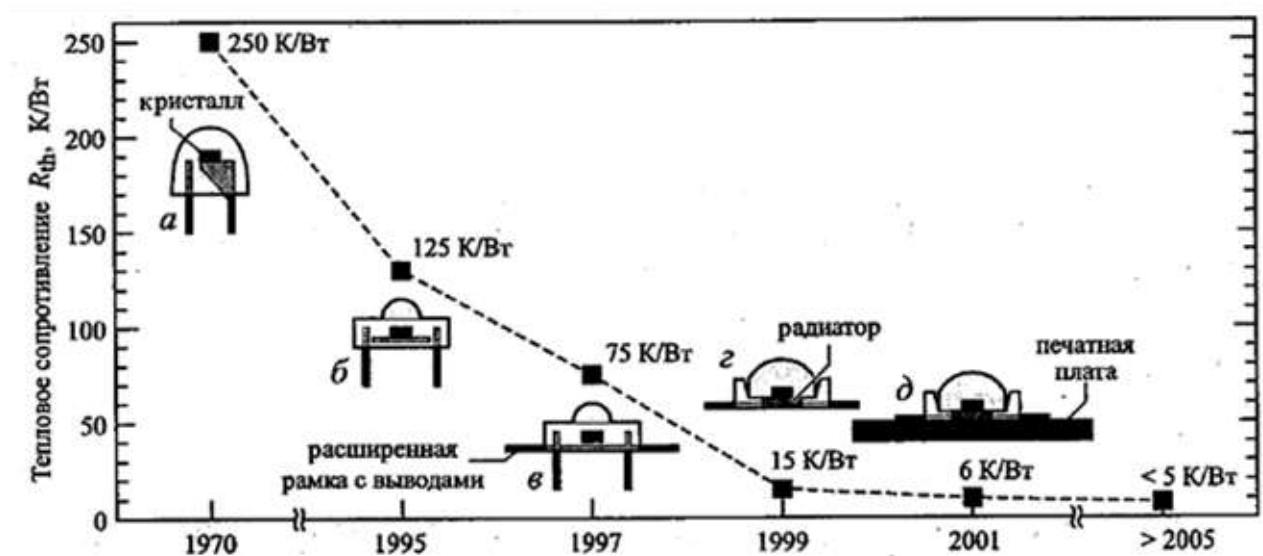


Рисунок 2.1. Тепловое сопротивление корпусов светодиодов: а-«рамка 5 мм», б-«рамка с низким профилем», в- с низким профилем и расширенной рамкой, г- с радиатором, д- с радиатором, смонтированным на печатной плате [2.1]

На рисунке 2.1 показано развитие конструкции светодиодов исходя из их теплового сопротивления. Чем выше мощность светодиода, тем меньшим тепловым сопротивлением должна обладать его конструкция. Для индикаторных светодиодов тепловое сопротивление не играет большой роли, а для мощных тепловое сопротивление влияет как на надёжность, так и на эффективность в условиях эксплуатации.

Представленные полупроводниковые кристаллы можно разделить по материалу подложки: Epistar (планарный тип кристалла) – сапфир теплопроводность  $\sim 30$  Вт/м $\times$ К, максимально допустимая температура на кристалле 115  $^{\circ}$ С; Cree (вертикальный тип кристалла) – карбид кремния теплопроводность  $\sim 58$  Вт/м $\times$ К, максимально допустимая температура на кристалле 145  $^{\circ}$ С; Lattica Power (планарный тип кристалла) – кремний теплопроводность  $\sim 149$  Вт/м $\times$ К; SemiLEDs (вертикальный тип кристалла) – медь

теплопроводность  $\sim 390 \text{ Вт/м}\times\text{К}$ , максимально допустимая температура на кристалле  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопроводность GaN  $\sim 1,3 \text{ Вт/м}\times\text{К}$ .

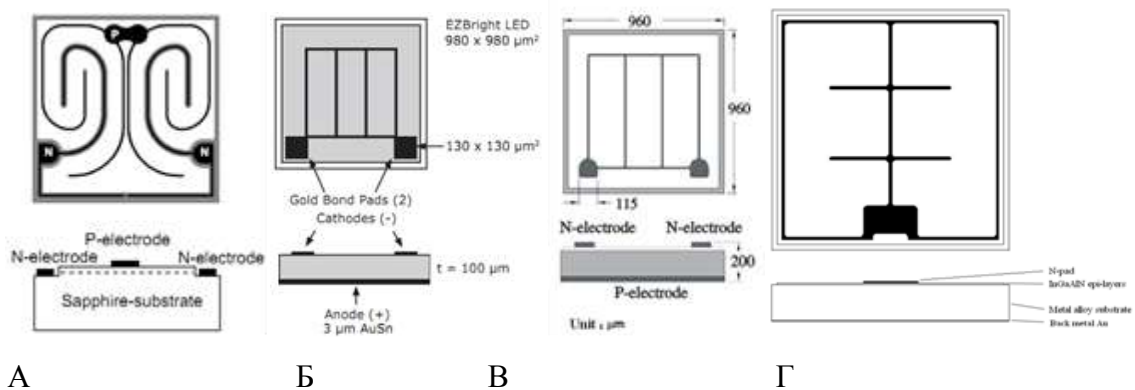


Рисунок 2.2. Конструкции кристалла размерами  $\sim 1 \times 1 \text{ мм}^2$ : А - Полупроводниковый кристалл производства Epistar серии ES-CABHV38 планарного типа; Б - 64 Полупроводниковый излучающий элемент производства Cree серии CPR3CR 1000 вертикального типа; В - Полупроводниковый излучающий элемент производства Lattice Power серии LP1000-EN вертикального типа; Г - Вертикальный полупроводниковый излучающий элемент фирмы SemiLEDs [2.2-2.5].

Так же на сегодняшний день есть ряд технических решений, опробованных в производстве и направленных на повышение надёжности и эффективности светодиодов за счёт, в том числе, отвода тепла от активного элемента. Конструкции светодиодов ведущих фирм приведены на рисунке 7, все эти фирмы используют керамические корпуса, в которых кристаллы паяются к металлизированному основанию из керамики.

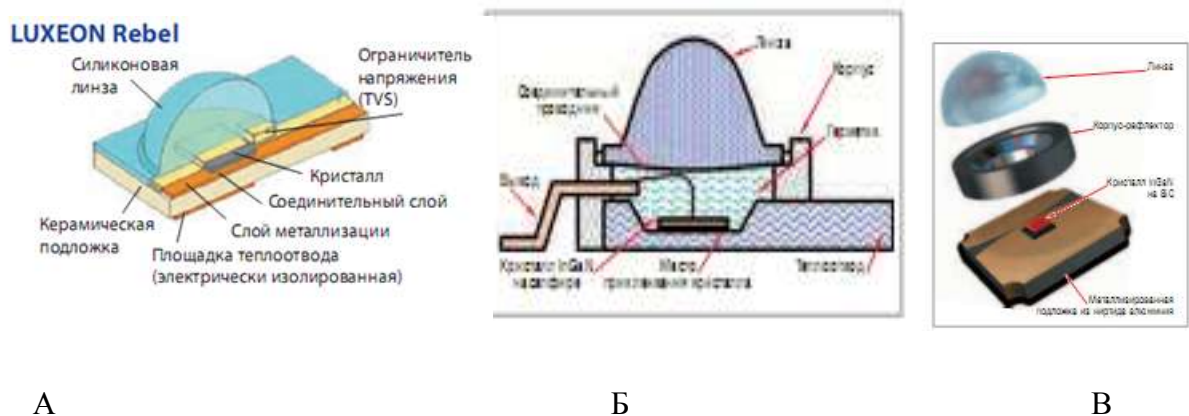


Рисунок 2.3. Светодиоды ведущих фирм: А – Lumiled [2.6], Б – Nichia [2.7], В – Cree [2.3]

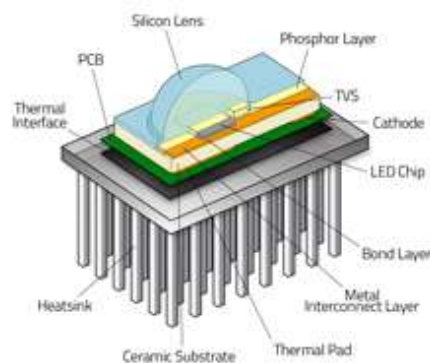


Рисунок 2.4. Конструкция светодиода Rebel производства Lumiled-Philips [2.6]

Светодиоды REBEL-STAR-NW100 производства Lumiled-Philips поставляют смонтированными на теплопроводящую подложку. Тепловое сопротивление  $4^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ . Световой поток 100 лм, рабочий ток 350 мА, гарантированная надёжность изделия при эксплуатации [2.6]. В данных диодах используется полупроводниковый кристалл для flip-chip монтажа.

Мощные СД дают возможность изготавливать светодиодные светильники небольших размеров, где необходимо обеспечивать большие значения светового потока.

Тем не менее, на светодиодах малой мощности можно получить большую эффективность чем на мощных, при условии их работы в оптимальных электрических режимах.

Так сравнение эффективности мощных и маломощных СД наглядно отражено в работе [2.8].

Таблица 2.1. Характеристики мощного и маломощного СД кристаллов без люминофора

	Значение прямого тока, мА	Значение мощности оптического излучения, мВт	Значение прямого напряжения, В	КПД, %
Кристалл $450 \times 450 \text{ мкм}^2$	20	47,1	2,8	84,3
Кристалл $1000 \times 1000 \text{ мкм}^2$	350	756	3,10	76,7

Таблица 2.2. Характеристики мощного и маломощного СД с кристаллами из таблицы 2.1.

	Значение прямого тока, мА	Световой поток, лм	Значение прямого напряжения, В	Светова я отдача, лм/Вт
Кристалл $450 \times 450$ мкм <sup>2</sup>	20	14,4	2,89	249
Кристалл $1000 \times 1000$ мкм <sup>2</sup>	350	203	3,18	183
Матрица из 4-х кристаллов $1000 \times 1000$ мкм <sup>2</sup>	1000	1913	14,16	135

Как видно из таблиц 2.1 и 2.2, световая отдача маломощного СД больше чем у мощного почти на 70 лм/Вт, и больше чем у СД матрицы из мощных СД почти на 115 лм/Вт.

Этот факт обусловлен низким перегревом активной области маломощного СД, как видно из таблиц 2.1 и 2.2, низкое значение прямого напряжения говорит о низком сопротивлении СД, а микронные размеры кристалла ( $450 \times 450$  мкм<sup>2</sup>) и отсутствие жёстких требований к отводу тепла позволяют формировать из таких кристаллов высокоэффективные сборки различной конфигурации.

Именно благодаря таким качествам, как высокая световая отдача, отсутствие требований к специальному отводу тепла и микронные, миниатюрные размеры кристаллов, сделали возможным изготовление светодиодныхборок в виде светоизлучающих элементов ленточной структуры.

## 2.2 Люминофоры

Для изготовления высокоэффективных полупроводниковых источников света на основе твёрдых соединений нитридов галлия, индия и алюминия, важным компонентом является люминофорная композиция. Выбор люминофорной композиции и метода её нанесения влияет на световую отдачу источника света и на его цветовую температуру. Люминофорная композиция представляет собой оптически прозрачный компаунд, в который добавлены порошки люминофоры. В качестве основного люминофора принято использовать жёлто-зелёный люминофор с длиной волны возбуждения, соответствующей длине волны излучения нитридного кристалла. Излучает такой люминофор в оптическом



спектре с шириной по уровню 0,5 от максимума порядка 100 – 120 нм, при этом пик излучения приходится на длины волн 540 – 590 нм, в зависимости от его активатора. На рисунке 9 приведена примерная структура люминофоров типа YAG [2.1-2.9].

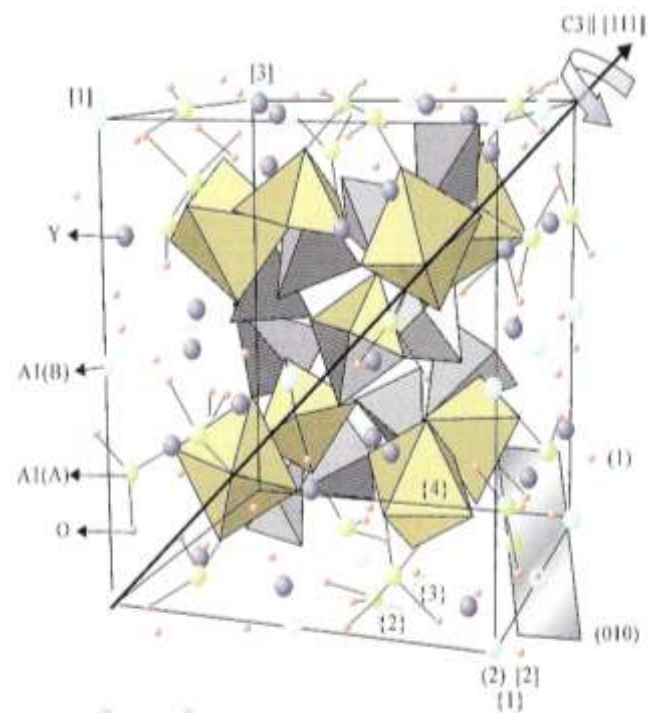


Рисунок 2.5. Структура люминофора YAG

Как видно из рисунка 2.5 структура люминофора типа YAG достаточно сложная, при её изменении меняются и свойства люминофора, ряд Российских и зарубежных научных коллективов работают над повышением эффективности люминофоров.

Таким образом, люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 5 – 35 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов ((Y<sub>1-a</sub>Gd<sub>a</sub>) Al<sub>5</sub> O<sub>12</sub> × Ce<sup>3+</sup> (YGG)). Кристаллическая решетка YAl<sub>5</sub>O<sub>12</sub> активирована атомами Ce и Gd, Ce и Gd, которые вносят в неё искажение. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны переходят на более высокие неравновесные уровни, с которых спонтанно переходят на низкие уровни, выделяя энергию перехода в виде фотона. Люминофоры излучают свет в широком спектральном диапазоне, максимум излучения которого находится в жёлто-зелёной области спектра. Вследствие объединения спектров синего и жёлто-зелёного излучения человеческий глаз видит белый цвет свечения. Принцип работы люминофора основан на фотолюминесценции [2.10, 2.11].

Для выбора люминофора или люминофорной композиции необходимо знать цветовые координаты (спектр излучения) нитридного кристалла и цветовые координаты

люминофора. Чтобы в первом приближении оценить характеристики разрабатываемого источника света, можно воспользоваться формулой (1):

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

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

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

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

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

Визуально физический смысл формулы (1) можно представить на диаграмме МКО на рисунке 2.6 [2.12].

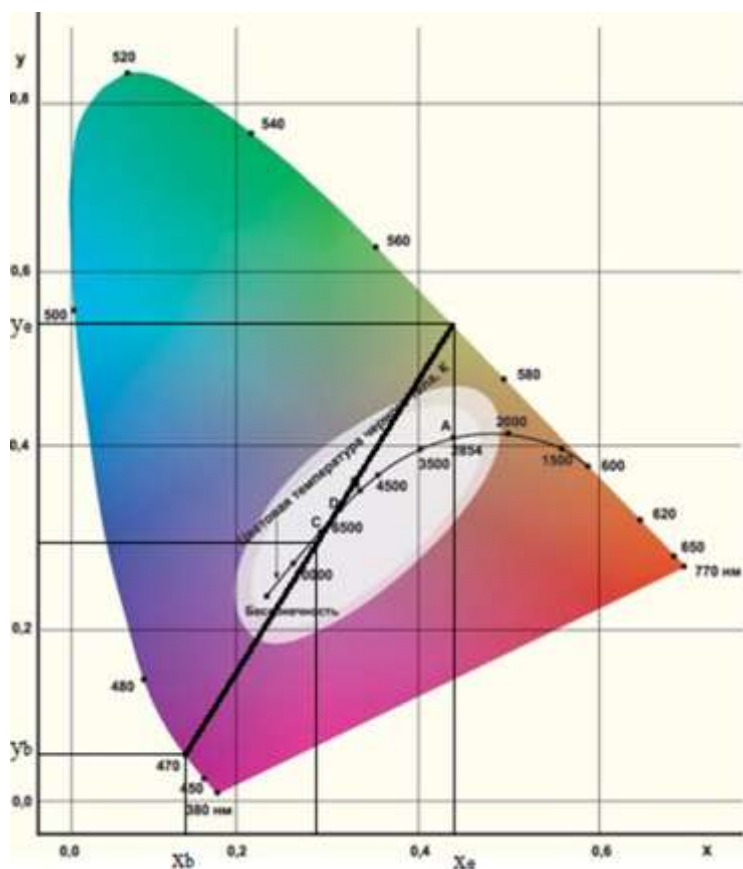


Рисунок 2.6. Диаграмма МКО

На рисунке 2.6 видно, что если соединить прямой линией точку, соответствующую цветовым координатам нитридного кристалла и точку, соответствующую цветовым координатам люминофора, то образуется ряд значений цветовых координат, лежащих на данной прямой, которым может соответствовать группа цветности светодиода. Группа цветности светодиода, в таком случае, будет зависеть от световой отдачи люминофора, световой отдачи кристалла и концентрации люминофора в композиции. Если значения

световой отдачи кристалла и люминофора считать постоянными, которые можно определить экспериментальным путём, то по формуле (1) в первом приближении можно определить необходимую концентрацию люминофора, для получения нужного значения по группе цветности.

Таким образом, можно подобрать наиболее эффективную концентрацию люминофора, обеспечивающую высокое значение световой отдачи светодиода. Затем можно добавлять в состав композиции дополнительные люминофоры, чтобы была возможность технологически задавать требуемую группу цветности. Для примера можно рассмотреть характеристики люминофоров производства [2.13] в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Таблица типов и характеристик люминофоров производителя [2.13].

Материал	Марка	Цвет	Координаты цветности		Спектральные характеристики	
			x	y	Спектр возбуждения, нм	Пиковая длина волны излучения, нм
Алюминаты	LMY-60-C	Светло-жёлтый	0,4250	0,5468	450-460	531
	LMY-65-C	Жёлтый	0,4458	0,5162	457,5-465	541
	LMY-70-C	Тёмно-жёлтый	0,4713	0,4931	465-470	550
Силикаты	LMS-520-B	Зелёный	0,2705	0,6229	380-450	520
	LMS-540-B	Светло-жёлтый	0,4137	0,5554	450-465	540
	LMS-550-B	Светло-жёлтый	0,4429	0,534	450-465	550
	LMS-560-B	Тёмно-жёлтый	0,4941	0,4927	450-467,5	560
	LMS-570-B	Оранжево-красный	0,5324	0,4569	450-520	570
	LMS-575-B	Оранжево-красный	0,5422	0,446	450-520	575
Нитридные	LAM-R-11600	Оранжево-жёлтый	0,612	0,3864	350-550	600
	LAM-R-11610	Светло-красный	0,6129	0,3853	350-550	610
	LAM-R-11618	Красный	0,6200	0,3789	350-550	618

Из таблицы 2.3 видно, что люминофоры, которые производитель предлагает для применения в светодиодах, делятся по типам:

- ✓ нитридные (сдвиг максимума спектра в красную область),
- ✓ силикатные (сдвиг максимума спектра в оранжевую область),
- ✓ алюминаты (максимум спектра в жёлто-зелёной области),
- ✓ силикатно-алюминатные (сдвиг максимума спектра в зелёную и синюю области).

## Список литературы к разделу 2

- 2.1 Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича.– М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
- 2.2 Официальный сайт Epistar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.epistar.com.tw>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.3 Официальный сайт Cree [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cree.com>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.4 Официальный сайт Lattice Power [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.latticepower.com>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.5 Официальный сайт SemiLEDs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.semileds.com>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.6 Официальный сайт Lumiled-Philips [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.philipslumileds.com>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.7 Официальный сайт Nichia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.nichia.co.jp/en/about\\_nichia/index.html](http://www.nichia.co.jp/en/about_nichia/index.html), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 2.8 Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – № 43.
- 2.9 Социн Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения. Круглый стол производство светодиодов в России – дорожная карта. Материалы доклада. Москва 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprpss.ru/sobytiya/vystavki-i-konferencii/kruglyj-stol-proizvodstvo-svetodiodov-v-rossii-dorozhnaya-karta.html>, свободный (дата обращения: 08.04.2013).

- 2.10 Меркушев О.М., Ведерников Л.Г. Фотолуминофор на основе YAG, активированные Ce<sup>3+</sup>, в светодиодах белого света // Светодиоды и лазеры. – 2002. – № 1-2. – С.64.
- 2.11 Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». – 2013 – Т. 2. – С. 63-65.
- 2.12 Абрамов В.С., Агафонов Д.Р., Шишов А.В., Щербаков Н.В., Рыжиков И.В., Социн Н.П., Юнович А.Э. Белые светодиоды // Светодиоды и лазеры. – 2002. – № 1-2. – С. 25-29.
- 2.13 Официальный сайт фирмы Dalian Luminglight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.luminglight.com>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).

## **3 НАДЕЖНОСТЬ СВЕТОДИОДОВ**

### **3.1 Анализ основных механизмов деградации светодиодов**

Условия эксплуатации, и в том числе, значение и нестабильность питающего тока могут также существенно сократить срок службы полупроводниковых источников света. Вопросы разработки стандартов, определяющих срок службы и критерии надежности для светодиодов решены не окончательно, хотя и существуют предложения считать сроком службы время, в течении которого световой поток деградирует до некоторого значения (например, 50%) от начального значения. Некоторые компании предпочли разработать собственные методы прогнозирования срока службы и надежности на основе данных, полученных от потребителей. Еще больше недостатков обнаруживается в применении эмпирических методов прогнозирования. Во-первых, наиболее типичным видом отказа светодиодов является постепенная деградация световой мощности в процессе эксплуатации. Однако, существующие стандарты оперируют информацией только в терминах постоянной интенсивности отказов. Хотя в большинстве случаев характеристики светодиодов ухудшаются постепенно, также наблюдались внезапные

отказы из-за роста дислокаций с периферии активной области, разрушения p-n – перехода, роста дислокаций с окисленного торца или промежуточной области, разделяющей торец и диэлектрическое покрытие, и катастрофического оптического повреждения. Скорость деградации СД, а следовательно и надежность, в значительной мере зависит от изготовителя и уровня качества производства.

Четкое определение отказа является наиболее критическим местом, один из методов определения отказа заключается в том, что при фиксированном значении тока следят за выходной оптической мощностью прибора, считая прибор неработоспособным при падении выходной мощности ниже определенного уровня (обычно от 20% до 50 %) от исходного значения. Другой метод основан на контроле падения выходной мощности прибора и его компенсации путем увеличения питающего тока. Когда увеличение питающего тока достигает определенной относительной величины например, 50% прибор считается вышедшим из строя. Некоторые механизмы отказа и дефекты также могут инициировать выход из строя светодиодов.

Экспоненциальный характер данной зависимости подтверждает ход кривых, полученных в экспериментах по изучению деградации синих и зеленых кристаллов на основе InGaN/GaN-гетероструктур с квантовыми ямами при повышенной температуре и плотности тока. 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.

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.

Основным источником внезапных отказов СД 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.

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 СД, 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.

### **3.2 Нарушение электрического контакта**

Нарушение электрического контакта обусловлено обрывом проволоки соединяющей омические контакты чипа и корпуса. Этот дефект наблюдается и при разрушении омических контактов на чипе. В первом случае возможны три причины: некачественное присоединение выводов проволоки к омическим контактам чипа; рассогласование по линейному расширению при высоких температурах компаунда и проволоки; стеклование компаунда при высоких температурах и растрескивание при низких. Во втором случае причинами являются: стеклование деформация компаунда при перегреве вследствие чего проволока отрывается от чипа вместе с омическим контактом; некачественное формирование омических контактов (особенно к р – области) связанное с нарушением технической гигиены при производстве чипа, связанной с некачественной очисткой

поверхности чипа при формировании омического контакта; разница в линейном расширении омического контакта на  $n$  – области и токопроводящего клея (паяльной пасты) при применении вертикальных чипов (GaN/InGaN).

Короткое замыкание в СД обусловлено электрическим или тепловым пробоем активной области чипа, а также затеканием токопроводящего клея на торцы чипа, приводящее к замыканию  $n$  и  $p$  области. Электрический пробой активной области происходит в результате электрической перегрузки полупроводника и в том числе от статического электричества. Тепловой пробой происходит в результате температурной перегрузки GaN/InGaN и омических контактов, происходит диффузия металла с полупроводником легирование металла в химический состав полупроводника и в кристаллическую решетку. Затекание токопроводящего клея на торцы чипа обусловлено нарушением технологии сборки СД или применением клея (припоя) с низкой температурой плавления.

### **3.3 Деградация активной области светодиодов**

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 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 (для светодиодов голубого и зеленого излучения) 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. 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.

Таким образом, на первом этапе деградации происходит формирование центров безизлучательной рекомбинации вокруг стоков, окруженных точечными дефектами.

На втором этапе деградация усиливается за счет интенсивной безизлучательной рекомбинации через центры безизлучательной рекомбинации. Чем меньше энергия, выделяющаяся при безизлучательной 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 безизлучательной 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.

### **3.4 Деградация 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 GaN р-типа. Электрод должен обладать меньшим коэффициентом взаимной диффузии составляющих, инженеры иногда применяют барьерный слой для подавления эффектов электромиграции. Проблемы с токовым насыщением в мощных светодиодах более серьезны. Для решения этих проблем 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.

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 светодиода. Другим типом отказа рабочей кромки является так называемый катастрофический оптический дефект (КОД) — когда величина световой энергии превосходит определенный уровень и рабочая кромка начинает плавиться. Отказ оптоэлектронных приборов, в обычных условиях устойчивых к деградации рабочей кромки, может быть инициирован повреждениями при обработке, посторонними загрязнениями и дефектами материала светодиода.

### **3.5 Термическая деградация**

Тепловая деградация из-за неоптимального теплоотвода часто доминирует в светодиодах в первые 10000 часов работы. Значительная выделяемая тепловая мощность требует монтажа кристалла СД 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 (вакансий), кристаллов, бугорков и вискеров. Рост вискеров, который может начаться под действием внутренних напряжений, температуры, влажности и особенностей материала, обычно происходит на границе между припоем и радиатором и может привести к КЗ.

### **3.6 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 InGaN/GaN светодиодов 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.

### **3.7 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. Благодаря относительно высокой смачиваемости, припой на основе олова может перелиться через край контактной площадки и сформировать закоротку. Отказы, связанные со сборкой в корпус, могут вызываться герметиком, электродными выводами и фосфором. Термические напряжения в герметике являются наиболее частой причиной отказа в светодиодах. 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 светодиода может привести к механическому повреждению. При очень низких температурах может произойти растрескивание эпоксидной композиции. Высокая температура, вызванная внутренним нагревом и неизлучающей рекомбинацией, и достигающая  $150^{\circ}\text{C}$ , 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.

### 3.8 Деграция люминофора

Одной из причин медленной деграции излучающих диодов является снижение квантовой эффективности люминофора на основе иттрий алюминиевого граната легированного церием. Причин снижения несколько: Первая причина связана с тушением люминесценции за счет диффузии кислорода в кристаллическую решетку граната.

Вторая причина связана с перераспределением кристаллической фазы по толщине люминесцентного покрытия на основе кремний-органического компаунда. Более тяжелые частицы люминофора под силами тяжести и поверхностного натяжения перераспределяются внутри покрытия приводя, к уменьшению квантовой эффективности, к нарушению соотношения цветов и нарушению угловой диаграммы направленности излучения.

Люминофоры применяемые в производстве СД белого свечения представляют собой жёлтые, зелёные и оранжевые порошки, состоящие непосредственно из кристаллов диаметром  $\sim 6 - 9$  мкм алюмоиттреевого граната  $((Y_{1-a}Gd_a)_3(Al_{1-b}Ga_b)_5O_{12}, Ce^{3+}$  (YAG)), и силикатные люминофоры SrCaSiN. Люминофоры стойкие к температурному воздействию до  $128^{\circ}C$ , но могут окисляться и впитывать влагу. Разработчики люминофоров рекомендуют перед смешиванием люминофора с компаундом просушить его в печи при температуре  $100^{\circ}C$ .

Компаунды бывают: эпоксидные, при высокой температуре происходит стеклование, начинается быстрое расширение компаунда (за счёт элемента Tg); эластичные (резинообразные) и гели (вязкие). Все эти компаунды темнеют при высокой температуре более  $130^{\circ}C$ . При длительной работе светодиодов залитых эластичным компаундом или гелем возможно осаждение кристаллов люминофора на полупроводниковый чип в связи, с чем снизятся значения световых параметров. Изменение значения цветовой температуры связано с выгоранием частиц люминофора и с их осаждением на чип. В первом случае

снижается количество переизлучающих частиц, возрастает цветовая температура, снижается световой поток. Во втором случае повышается плотность частиц на поверхности чипа 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.

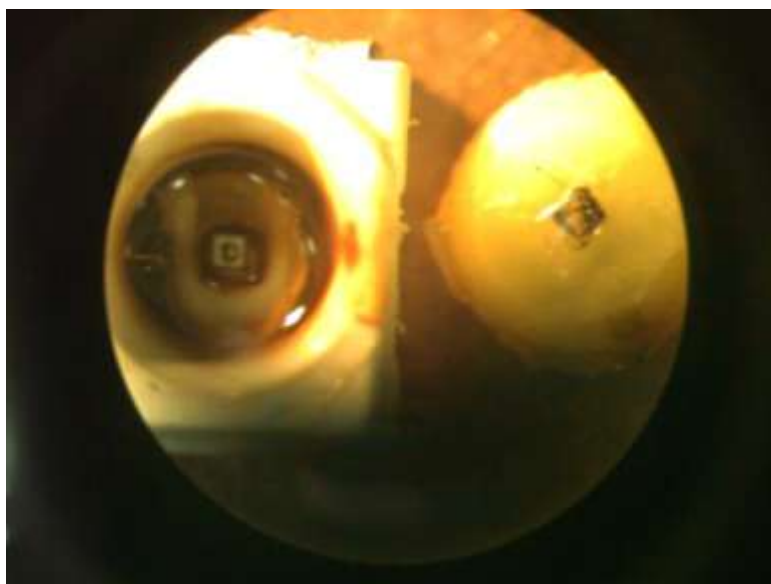


Рисунок 3.1 Фотография светодиода слева и полимеризованной смеси компаунда с люминофором справа после длительного воздействия повышенной температуры окружающей среды  $150^{\circ}\text{C}$  в течении 24 часов

Как видно из рисунка 3.1 после воздействия высокой температуры между компаундом и корпусом выделилось из компаунда смолистое вещество коричневого цвета. Так же видно тёмное пятно на компаунде повторяющее геометрию полупроводникового кристалла. Электронно-микроскопические исследования показали (рис.2), что при термообработке в структуре люминофорного покрытия появляются различного типа дендритные образования. Исследование спектров поглощения покрытий (рис.3) в зависимости от температуры показали, что происходящие изменения несущественны. Тем не менее, квантовая эффективность люминофора (рис. 4) при повышенных температурах существенно уменьшается.

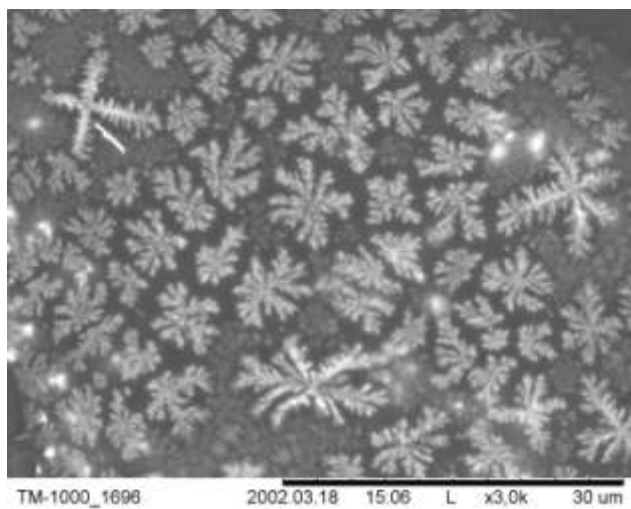
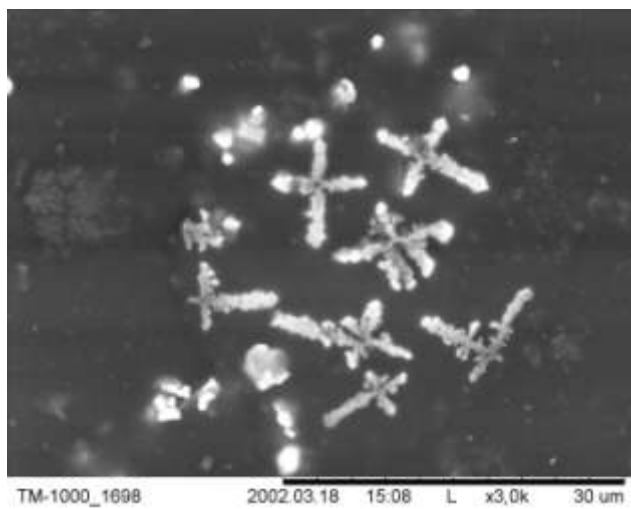
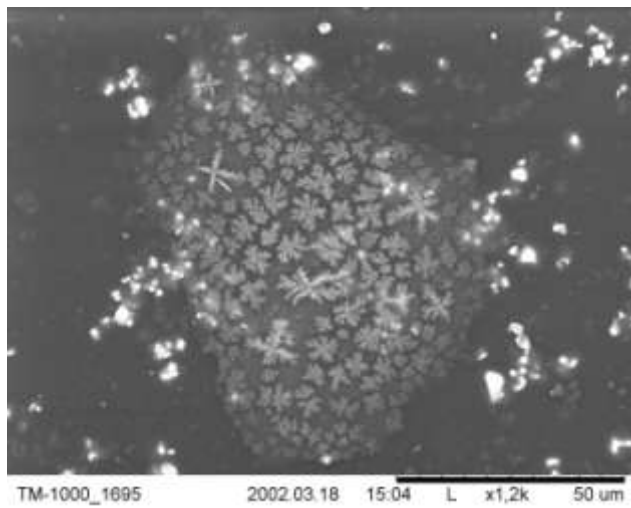


Рисунок 3.2 Изменение структуры люминофорного покрытия на основе ФЛЖ-7 после термической обработки при 140 °С

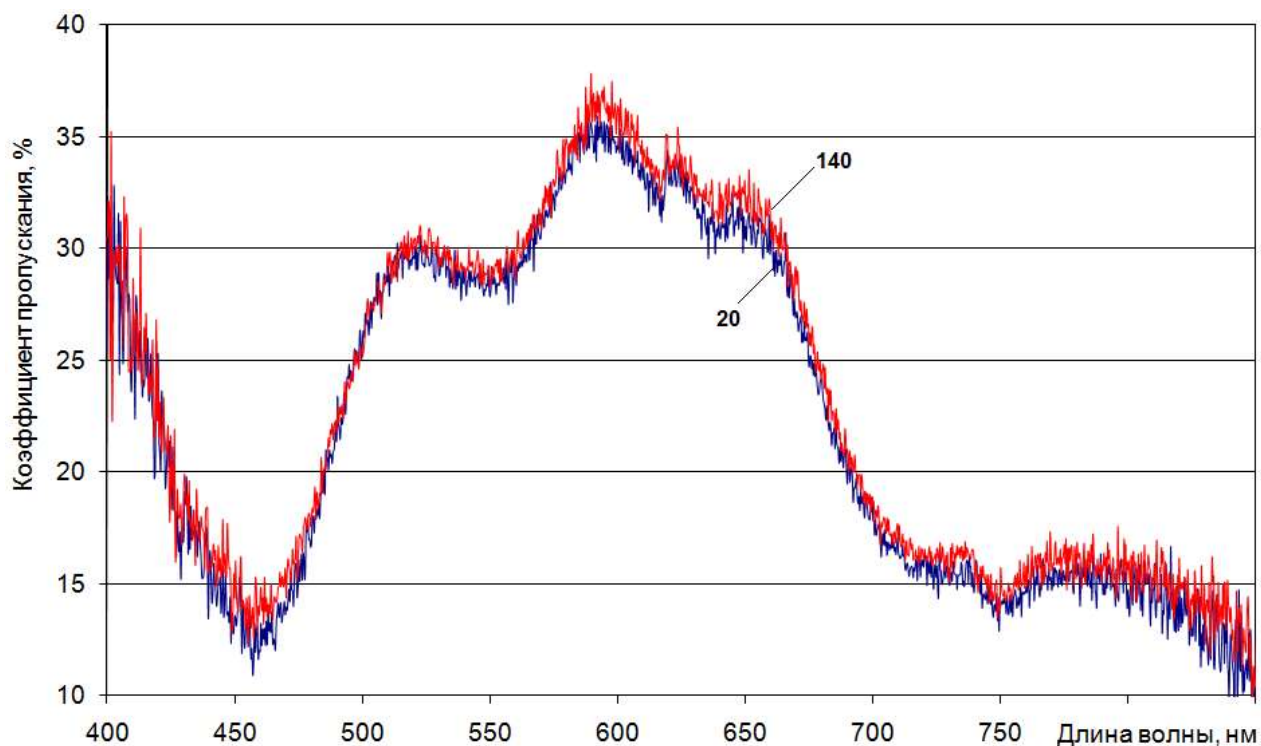


Рисунок 3.3 Спектры поглощения люминофора ФЛЖ-7 при 20°C и 140°C

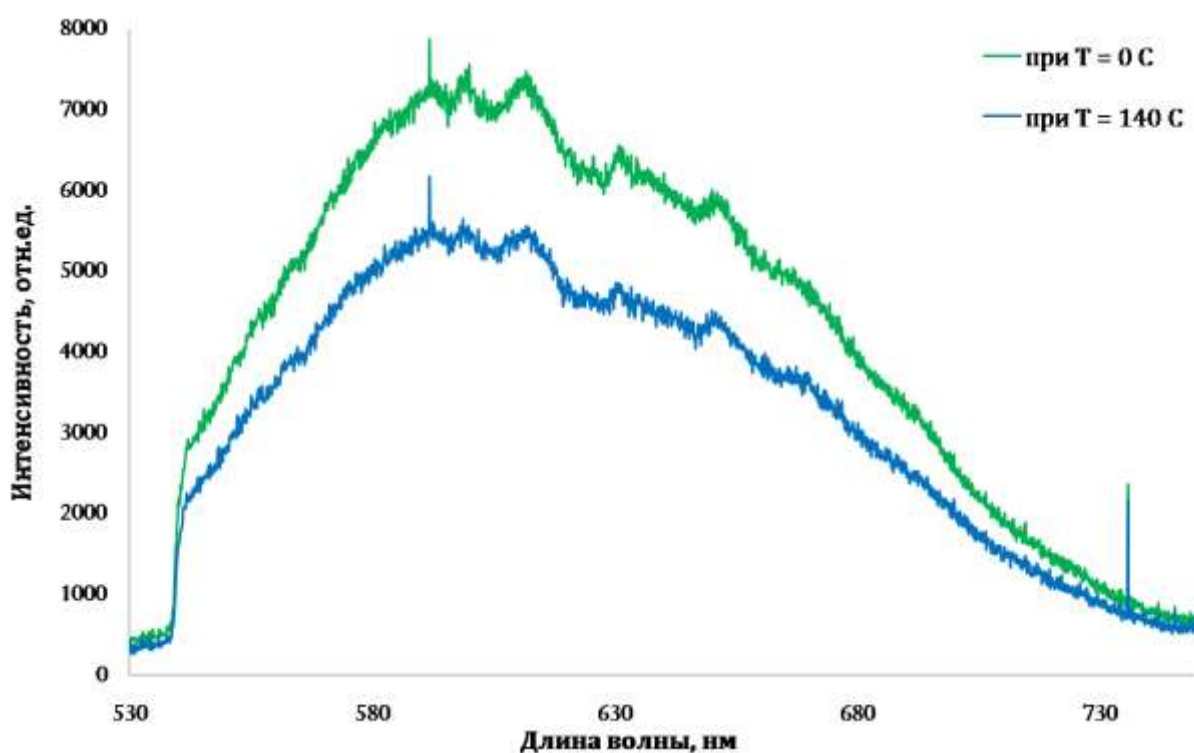


Рисунок 3.4 Спектры возбуждения люминофора ФЛЖ-7 при 20°C и 140°C

Для определения энергии активации ( $E_a$ ) и выбора режимов форсирования необходимо выбрать параметры критерии годности. Параметры критерии годности выбирают из электрических, фотометрических и спектральных параметров. В СД

основными параметрами являются электрическая мощность  $P$ ; прямое напряжение  $U_{пр}$  при заданном токе  $I_{пр}$ ; световой поток  $\Phi$ , освещённость  $E$ , максимальная сила света в угле излучения  $I_v$ ; цветовая температура, спектр излучения. Прямыми измерениями мы можем определить с высокой точностью:  $I_v$ ,  $U_{пр}$ ,  $I_{пр}$ ,  $E$ , спектральную характеристику излучения СД. Исходя из выше сказанного, для удобства контроля параметров критериев годности (ПКГ) во время проведения испытаний, предлагаем оценивать значения параметров прямыми измерениями:

- освещённость  $E$  измеряем при помощи люксметра ТКА и светопроводящей трубки длиной 20 мм расположенной между СД и фотодатчиком и чётко зафиксированной для повторяемости результатов измерений как показано на рисунке 3.5;

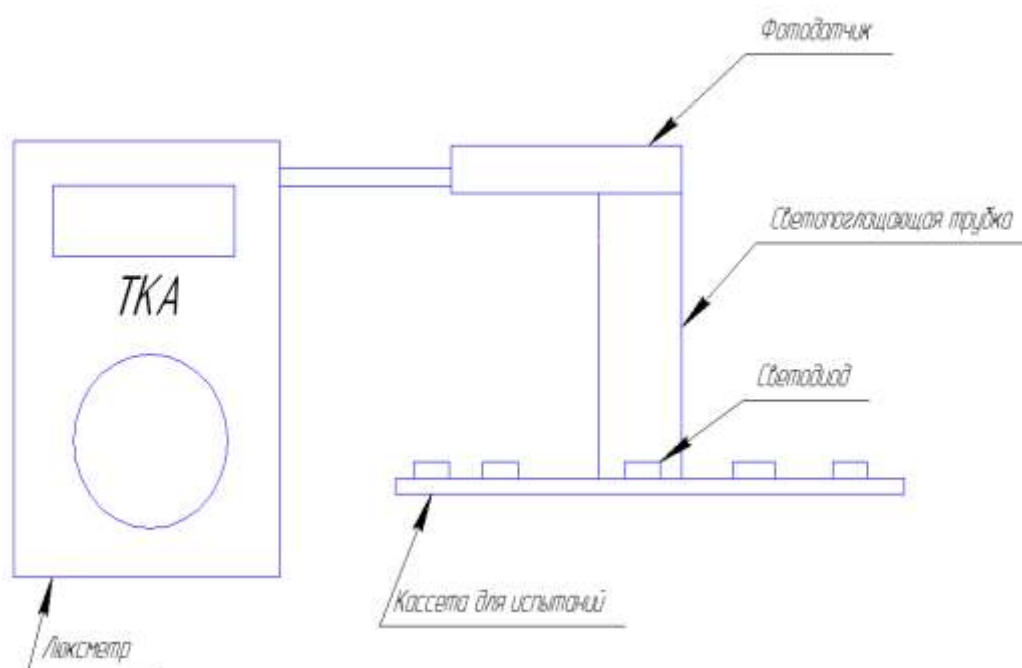


Рисунок 3.5 Люксметр с светопроводящей трубкой

-  $U_{пр}$  и  $I_{пр}$  измеряем вольтметром и амперметром. Вольтметр и амперметр должны иметь точность показаний до третьего знака после запятой;

- спектр излучения измеряется прибором ТКА-ВД. В процессе испытаний оцениваем соотношение максимальной длины волны излучения чипа ( $\lambda_{\max}$  чипа) с максимальной длиной волны и шириной в половине максимума спектра излучения люминофора.

Для определения режимов форсирования необходимо определить границы области допустимого форсирования (ОДФ). Граница области допустимого форсирования (ОДФ) характеризует совокупность максимально возможных режимов форсирования, при которых не изменяются основные механизмы отказов при ускоренных испытаниях (УИ), термоэлектрическая нагрузка (температура, ток, напряжение) при которой ещё



выполняется требование об отсутствии отказов по нормам ТУ или паспорту на СД (СУ). В пределах ОДФ должны быть выполнены следующие требования:

- температура на переходе  $Q_{pn}$  не должна превышать максимального значения приведенного в спецификации для данных чипов. Для чипов с неизвестной максимальной температурой р – n перехода значение температуры можно определить исходя из кандел-амперной характеристики. Максимально допустимую температуру определяют по уравнению, где значение прямого тока находят по кандел-амперной характеристики в точке, при которой значение силы света ( $I_v$ ) является максимальным, соответственно значение напряжение находят по ВАХ при определённом значении тока.

- напряжение и ток на переходе не должны приводить к возникновению электрических пробоев;

- сочетание температуры, тока и напряжения не должно вызывать теплового пробоя или предшествующего ему теплового шнурования – образования горячих пятен;

- температура корпуса не должна превышать предельно допустимых температур используемых конструктивных материалов (клеев, компаунда и т.д.).

Испытаниям подвергают одну выборку. Рекомендуемый размер выборки 20 шт. Определение ОДФ рекомендуется проводить методом ступенчато-возрастающей нагрузки. Основные положения этого метода изложены в ОСТ 11.070.088 – 84. При испытаниях осуществляют увеличение температуры перехода  $Q_{pn}$  за счёт роста  $Q_{окт}$  и/или  $P$  (потребляемая мощность). При ступенчатых испытаниях, температура окружающей среды на первой ступени должна соответствовать значению, заданному в ТЗ (ТУ). Допускается расширения диапазона температур только в сторону повышения. Верхний и нижний пределы температур при испытаниях устанавливаются исходя из физико-химических свойств применяемых материалов. Температура и электрические параметры промежуточных ступеней выбирают исходя из увеличения термоэлектрической нагрузки на одинаковое для всех ступеней значение  $A$ .

$$A = T_{pn(II \text{ ступени})} - T_{pn(I \text{ ступени})} \quad (1)$$

Значение величины  $A$  выбирают в зависимости от допустимого диапазона термоэлектрической нагрузки на СД (СУ) и количества ступеней испытаний.

Контроль ПКГ при испытаниях проводят перед началом и в процессе испытаний. Периодичность измерений параметров устанавливается с учётом жёсткости режима так, чтобы по возможности точнее фиксировать моменты отказов приборов по условным нормам. При необходимости вводят дополнительные ПКГ. Длительность испытаний на каждой ступени должна быть одинаковой и рекомендуется устанавливать  $48^{+2}_{-4}$ . Допускается устанавливать длительность ступени  $24^{+2}_{-4}$  или  $96^{+2}_{-4}$  (в соответствии с ОСТ

11.336.938 – 83). Для приборов, у которых отказ выявляется устройствами, встроенными в испытательный стенд, промежуточный контроль ПКГ допускается проводить только на ступенях, на которых зафиксирован отказ этим устройством.

Продолжительность испытаний должна быть такой, чтобы накопленный процент (доля) отказов достигла 20 – 40%.

Границей ОДФ считают значения режима последней ступени испытаний: температура окружающей среды  $Q_{окг}$  и потребляемая мощность  $P$  (значение прямого тока  $I_{пр}$  и прямого напряжения  $U_{пр}$ ) на которой отказы СД (по нормам ТУ) ещё отсутствовали, или ступени, предшествующие появлению первого отказа. Отказ одного прибора на любой ступени испытаний при отсутствии отказов на двух последующих ступенях не учитывают, т.к. это свидетельствует о случайном характере отказа и о том, что смены механизма отказа при этом не происходит.

Из накопленных статистических данных при испытаниях по определению границ ОДФ рассчитывают энергию активации отказов  $E_a$ . Обработку результатов испытаний проводят графически. Для этого заполняют протокол испытаний в виде таблицы в которой указывают следующие значения: номер режима испытаний ( $z$ ); количество образцов (шт.); режимы испытаний; температура р-п перехода в  $Q(^{\circ}C)$ ,  $T(K)$ ; время наработки на отказ  $t$  (час); функция режима испытаний  $10^3/T(K)$ ; функция времени испытаний  $\ln t$ , количество отказов (шт.), общее время испытаний. На графике (рисунок 3.6) фиксируют все точки соответствующие отказам при определённой температуре р-п перехода в определённый момент времени.

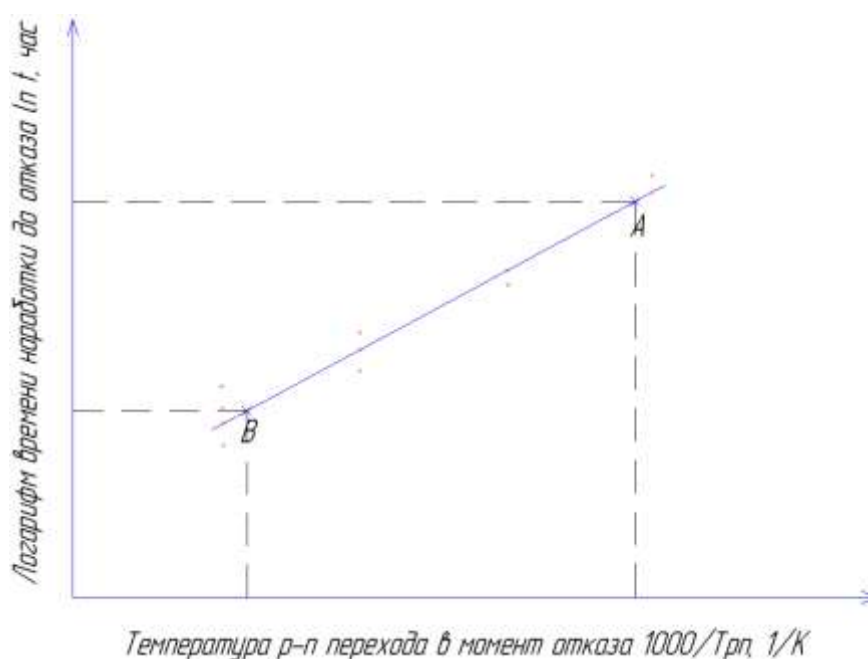


Рисунок 3.6 График зависимости времени наработки до отказа от температуры

Особо отмечают точки с одинаковой долей отказов СД (СУ). Прямую проводят так, чтобы она располагалась наиболее близко к этим точкам. На построенной прямой, выбирают две точки (А) и (В) и отмечают соответствующие им значения  $(\ln t)_A$  и  $(\ln t)_B$  на оси ординат, а  $(10^3/T(K))_A$  и  $(10^3/T(K))_B$  на оси абсцисс. Величину  $E_a$  определяют по формуле (2):

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times \frac{\ln t_A - \ln t_B}{\frac{10^3}{T_A} - \frac{10^3}{T_B}} \quad (2)$$

Далее определяют коэффициент ускорения из уравнения с известной энергией активации отказов и оптимальными режимами ускоренных испытаний. Режимы ускоренных испытаний выбирают из оптимального соотношения электрической мощности и температуры окружающей среды, чтобы температура р-п перехода не выходила за границы ОДФ.

#### Список литературы к разделу 3

- 3.1. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича.– М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
- 3.2. ГОСТ ИСО 8995-2002 Освещение рабочих систем внутри помещений. (УТРАТИЛ СИЛУ в РФ, замены не нашел).
- 3.3. РД 11 0216-85 Приборы полупроводниковые. Методы испытаний по определению конструктивно-технологических запасов. – 1985.
- 3.4. ГОСТ 11630 – 84. Приборы полупроводниковые. Общие технические условия. – 1984.
- 3.5. РД 11 0755-90 Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. РНИИ «Электронстандарт». – 1985.
- 3.7. Полещук А., Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. – 2008 – №2, С. – 30-35.
- 3.8. Paolo Bugno. Characterization and reability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress // Anno Academico 2009/2010. – P. 123.
- 3.9. Tsai P.S. Lifetime tests and junction – temperature measurement of InGaN light-emitting diodes using patterned sapphire substrates // J. Lightwave Technol. – 2007. – Т. 25. – P.591-596.
- 3.10. Pavesi M., Rossi F., Zanoni E. Effects of extreme dc-ageing and electron-beam irradiation in InGaN/ AlGaIn/ GaN light-emitting diodes // Semicond. Sci. and Technol. – 2006. – Т.21. – P.138-143.

## 4 ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТОДИОДОВ

### 4.1 Отвод тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC

Светодиоды SMD в корпусах типа PLCC имеют допустимую температуру *p-n*-перехода +110...+125°C. Для построения эффективной осветительной системы необходимо провести точный тепловой расчет с учетом рабочих характеристик используемых светодиодов.

Надежность и выходные характеристики светодиодов жестко связаны с температурой их перехода, что делает тепловой расчет и выбор системы охлаждения весьма ответственным этапом проектирования светодиодных систем.

**Требования к радиатору** самый простой способ определения требований к радиатору — это использование модели теплового сопротивления.

Тепловое сопротивление  $R\theta$  (°C/Вт) определяется как изменение температуры между двумя точками пути тепла при рассеивании 1 Вт тепла. Общая формула теплового сопротивления между точкой *x* и точкой *y*:

$$R\theta_{x-y} = \frac{T_x - T_y}{P_d}, \quad (1)$$

где:  $T_x$  – температура в точке *x*, °C;

$T_y$  – температура в точке *y*, °C;

$P_d$  – общее рассеяние тепла;

При использовании модели теплового сопротивления делается предположение, что общее рассеяние тепла равно общей электрической мощности, подаваемой в светодиод. В действительности рассеяние тепла [Вт] меньше общей электрической мощности, так как определенное ее количество преобразуется в излучение фотонов (видимое и невидимое).

$$P_d = I_f \times V_f,$$

где:  $I_f$  – прямой ток;

$V_f$  – прямое напряжение.

Тепловое сопротивление в светодиоде Avago SMD между *p-n*-переходом кристалла светодиода и точкой пайки (°C/Вт) может быть записано следующим образом:

$$R\theta_{\text{переход-точка пайки}} = R\theta_{J-P} = \frac{T_J - T_P}{P_d}, \quad (2)$$

где:  $T_J - T_P$  – между температурой  $p-n$ -перехода светодиода и температурой точки пайки;

$T_J$  – температура  $p-n$ -перехода кристалла светодиода, °С;

$T_P$  – температура в точке пайки, °С.

Тепловое сопротивление  $R\theta_{J-P}$  является важной характеристикой светодиода, и его значение может быть найдено в спецификации изделия. Например, типовое значение  $R\theta_{J-P}$  для PLCC2 InGaN равно 280°С/Вт. Это означает, что при питании светодиода с потреблением мощности 0,1 Вт температура  $T_J$  увеличится на 28°С по сравнению с температурой точки пайки.

Другими типами теплового сопротивления, представляющими интерес являются:

- тепловое сопротивление между  $p-n$ -переходом светодиода и окружающей средой:

$$R\theta_{J-A} = \frac{T_J - T_A}{P_d}, \quad (3)$$

–

- тепловое сопротивление между точкой пайки светодиода и печатной платой:

$$R\theta_{P-PCB} = \frac{T_P - T_{PCB}}{P_d}, \quad (4)$$

–

- тепловое сопротивление между печатной платой и окружающей средой:

$$R\theta_{PCB-A} = \frac{T_{PCB} - T_A}{P_d}, \quad (5)$$

–

- тепловое сопротивление между радиатором и окружающей средой:

$$R\theta_{HS-A} = \frac{T_{HS} - T_A}{P_d}, \quad (6)$$

Другое предположение, сделанное при использовании модели теплового сопротивления, заключается в том, что все тепло, генерируемое в  $p-n$ -переходе светодиода, передается через единственный основной путь проводимости. Передача тепла через излучение и конвекцию игнорируется, так как здесь она обычно является довольно незначительной.

#### 4.1.2 Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода

Основной путь тепла для светодиода PLCC:

p-n-переход кристалла светодиода → точка пайки → печатная плата → радиатор → окружающая среда.

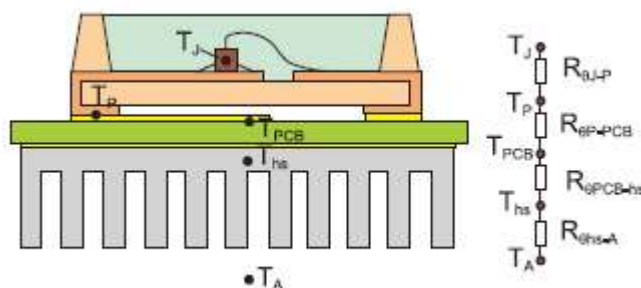


Рисунок 4.1 – Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода [4.2]

В этом случае тепловой путь может моделироваться с помощью последовательной цепи резисторов, как показано на рис.1. Передача тепла через герметик и корпус светодиода не учитывается из-за намного более низкой их теплопроводности по сравнению с металлической выводной рамкой. Общее тепловое сопротивление  $R\theta_{J-A}$  может быть выражено суммой отдельных сопротивлений вдоль пути тепла от p-n-перехода в окружающую среду:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-PCB} + R\theta_{PCB-HS} + R\theta_{HS-A}, \quad (7)$$

В некоторых случаях, когда не используется дополнительный радиатор, модель может быть упрощена следующим образом:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-PCB} + R\theta_{PCB-A}, \quad (8)$$

Тепловое сопротивление  $R\theta_{P-PCB}$  относится к термическому компаунду, который используется между точкой пайки светодиода и печатной платой. В отличие от других мощных светодиодных излучателей, которые требуют применения специального термического компаунда, такого как термическая густая смазка или термическая смола, светодиод Avago PLCC может непосредственно припаиваться к печатной плате. В связи с тем, что припой — это металлический сплав, его теплопроводность является очень хорошей. Таким образом, можно пренебречь ее тепловым сопротивлением  $R\theta_{P-PCB}$ , так как  $T_P \approx T_{PCB}$ . С учетом этого уравнение (8) преобразуется [4.4]:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-A}. \quad (9)$$

#### 4.1.3 Модель теплового сопротивления для нескольких светодиодов на одном носителе

Если несколько мощных светодиодных излучателей смонтированы на одном носителе (печатной плате), то общее тепловое сопротивление изменится из-за дополнительного нагрева от соседних модулей. Это изменит значение  $R\theta_{PCB-A}$ . В связи с наличием нескольких светодиодов на печатной плате величина  $R\theta_{J-P}$  нескольких светодиодов может быть упрощена до  $R\theta_{J-P TOTAL}$ , использующей параллельную модель теплового сопротивления. Эта величина может быть получена алогично вычислению итогового сопротивления параллельно включенных резисторов:

$$R\theta_{J-P TOTAL} = \left[ \frac{1}{R\theta_{J-P1}} + \frac{1}{R\theta_{J-P2}} + \frac{1}{R\theta_{J-P3}} + \dots + \frac{1}{R\theta_{J-Pn}} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где:  $n$  – количество светодиодов на одной печатной плате.

В связи с тем, что  $R\theta_{J-P1} = R\theta_{J-P2} = R\theta_{J-P3} = \dots = R\theta_{J-Pn}$ ,

$$R\theta_{J-P TOTAL} = \frac{n}{R\theta_{J-P}}^{-1} = \frac{R\theta_{J-P}}{n}, \quad (11)$$

Если должна использоваться эта простая модель, то следует учитывать общую величину  $P_d$  всех светодиодов:

$$R\theta_{J-P TOTAL} = T_J - T_P \quad P_{d TOTAL}, \quad (12)$$

где:  $P_{d TOTAL} = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + \dots + P_{dn}$

#### 4.1.4 Требования к характеристикам

Перед проектированием теплового управления для мощного светодиода пользователь должен задать следующие требования:

- максимальная рабочая температура окружающей среды  $T_{Amax}$ , на основе условий приложения пользователя;
- максимальная температура  $p$ - $n$ -перехода светодиода  $T_{Jmax}$ , может быть получена из технических требований на PLCC;
- максимальная мощность рассеивания на один излучатель  $P_{dmax}$ ,

где  $P_{dmax} = I_{Fmax} \times V_{Fmax}$ , может быть получена из технических требований PLCC.

При определении требуемых характеристик радиатора всегда должен рассматриваться наихудший случай.

Для системы без дополнительного радиатора требованием рассеяния тепла является  $R\theta_{PCB-A}$ . Путем подстановки уравнения (3) в уравнение (9) получаем:

$$\begin{aligned} T_{Jmax} - T_{Amax} \quad P_{dmax} &= R\theta_{J-P} + R\theta_{P-A}, \\ R\theta_{P-A} &= T_{Jmax} - T_{Amax} \quad P_{dmax} - R\theta_{J-P}. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как все параметры на правой стороне уравнения (13) известны, то можно определить требование  $R\theta_{PCB-A}$  к рассеиванию тепла.

## 4.2 Рекомендуемые типы дизайна печатных плат

При использовании маломощных светодиодов, вполне приемлемы печатные платы из стеклотекстолита марки FR-4. Однако, при рассеивании более высоких мощностей может потребоваться использование специальных конструкций печатных плат, а также плат с металлическим основанием (в международной классификации MC PCB или AL PCB – печатные платы на алюминиевом основании) и слоем диэлектрика, с улучшенной теплопроводностью с тепловым сопротивлением от 0,45 до 1,5 К/Вт.

Всего имеются три типа монтажных плат для светодиодов в корпусах PLCC для различных диапазонов рассеивания тепла:

- тип I — односторонняя печатная плата FR4 с/без дополнительной медной площадки;
- тип II — двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями;
- тип III — печатная плата с внутренним металлическим слоем (MCPCB).

### 4.2.1 Тип I. Односторонняя печатная плата FR4 с/без дополнительной медной площадки

Этот тип монтажных плат является самым дешевым и наименее эффективным для рассеивания тепла (рис. 4.2), поэтому он используется для светодиодов мощностью менее 0,5 Вт.



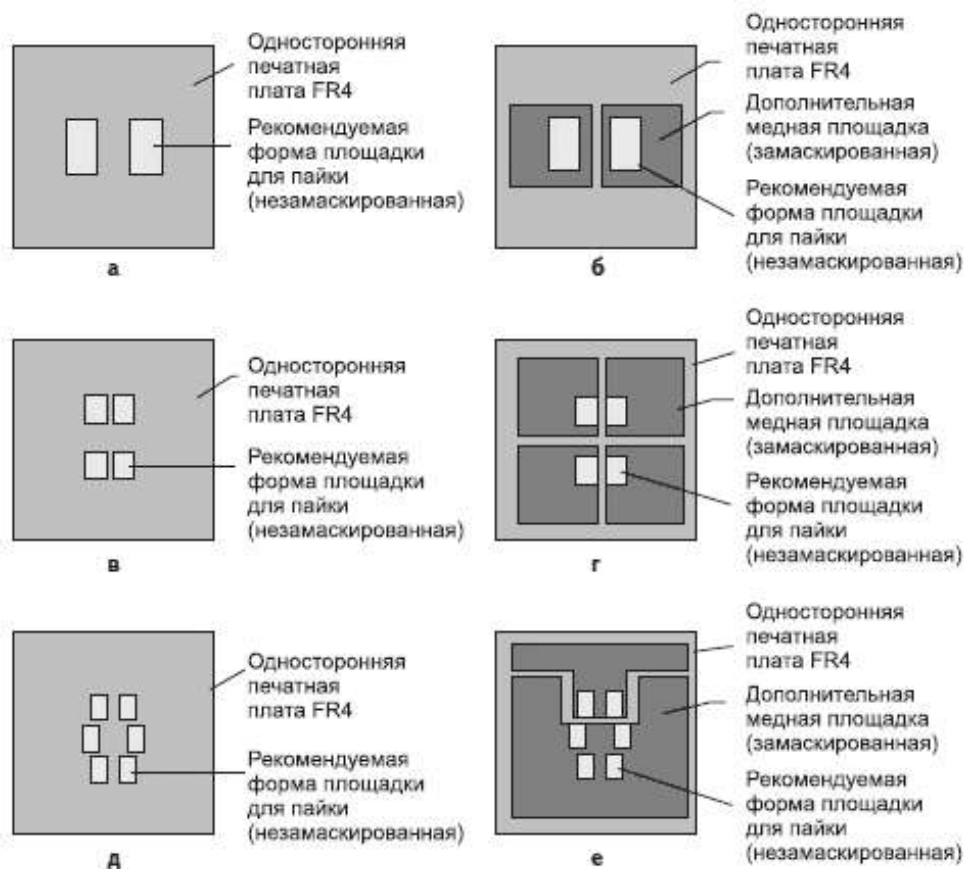


Рисунок 4.2 – Односторонняя печатная плата FR4 без дополнительной медной площадки

#### 4.2.2 Тип II. Двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями

Монтажная плата II типа обеспечивает дополнительное рассеивание тепла от светодиода через отверстия к дополнительной медной площадке на нижней стороне печатной платы (рис. 4.3), которая может быть оставлена без паяльной маски с помощью технологии выравнивания пайки горячим воздухом (HASL), если это приведет к лучшему рассеянию тепла в окружающую среду. Это также обеспечивает лучшее взаимодействие металла при присоединении дополнительного радиатора.

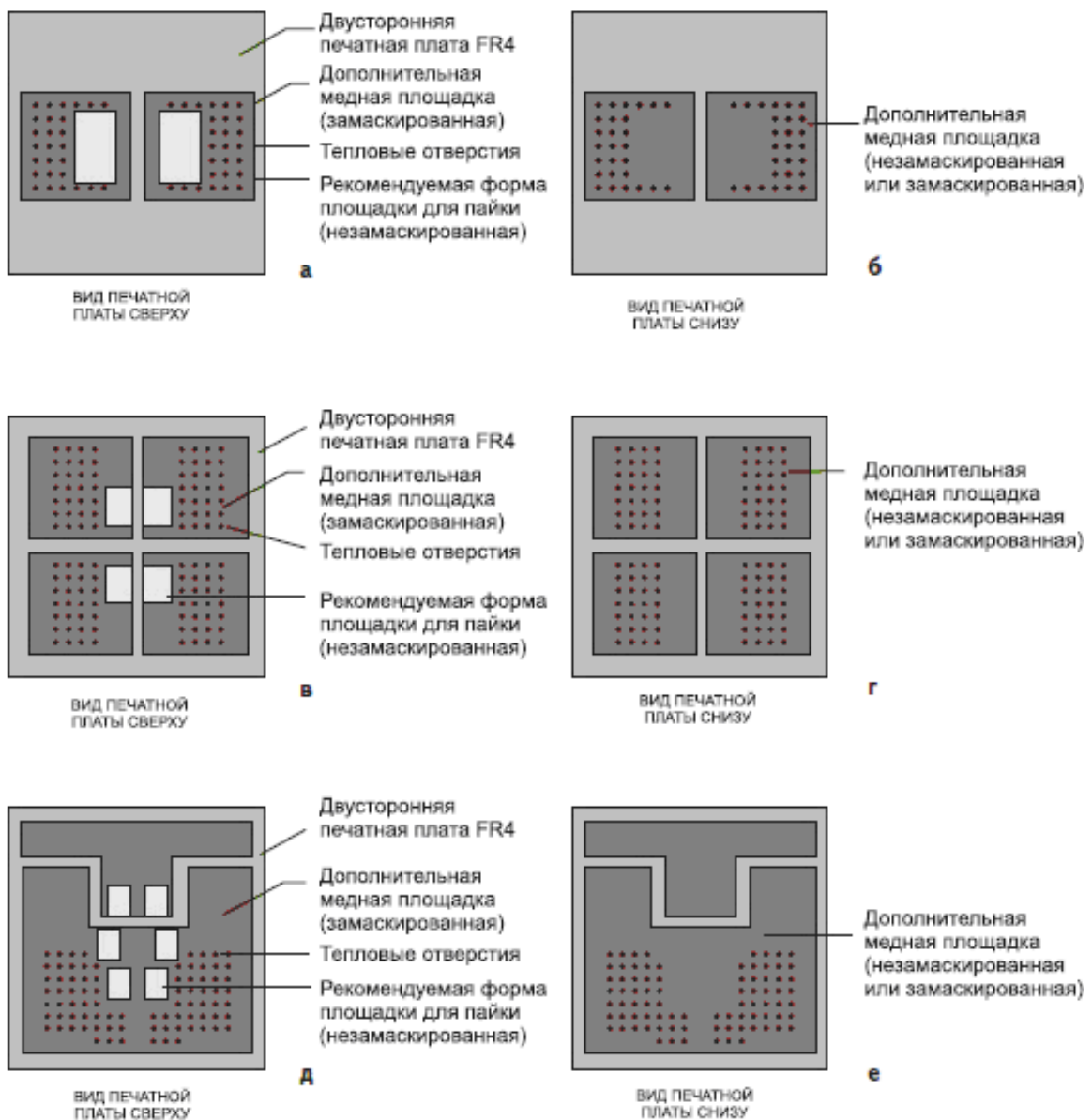


Рисунок 4.3 – Двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями: а, в, д — вид печатной платы сверху; б, г, е — вид печатной платы снизу

#### 4.2.3 Тип III. Печатная плата с внутренним металлическим слоем

Комбинированная структура MC PCB (некоторые производители обозначают как IM PCB) это структура, состоящая из теплоотводящего основания из алюминия, меди или их сплавов, на котором расположен диэлектрический слой, ламинированный медной фольгой.

В печатной плате с внутренним металлическим слоем обычно в качестве внутренней основы используется алюминий (рис. 4.4). Он имеет хорошую теплопроводность (более 200 Вт/мК). Тепло, проводимое от светодиода, может эффективно распространяться через плату MC PCB в окружающую среду.

Теплопроводность применяемых алюминиевых подложек: Алюминий 1100 (аналог АД) - 222 Вт/мК; Алюминий 5052 (аналог АМг2,5) - 138 Вт/мК; Алюминий 6061 (аналог АД33) - 167 Вт/мК. На сегодняшний день несколько крупных компаний-производителей термопроводящих электроизолирующих материалов выпускают базовые материалы для изготовления печатных плат с металлическим основанием: Bergquist (США), Totking (Китай), Ruikai (Китай), Laird (Thermagon) (США), Denka (Япония).

По сравнению с подложкой FR4, МС РСВ превосходно поддерживает низкую температуру *p-n*-перехода светодиода.

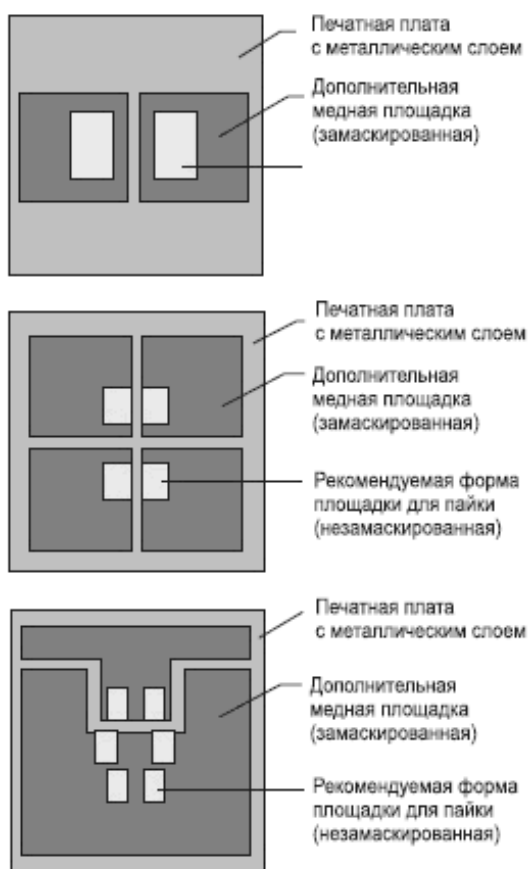


Рисунок 4.4 – Печатная плата с металлическим слоем

#### 4.2.4 Рекомендуемые формы контактных площадок и посадочных мест для пайки

Рекомендуемые формы площадки для пайки, показанные на рис. 4.5, можно также найти в технических требованиях. Выводы (штырьки) модуля PLCC могут непосредственно припаиваться к площадкам с помощью процесса оплавления или ручной пайки.

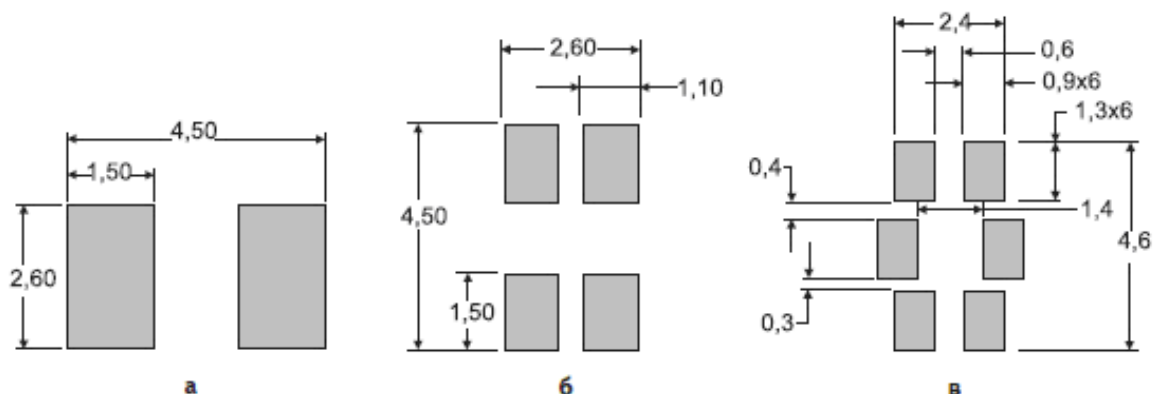


Рисунок 4.5 – Рекомендуемые формы площадки для пайки:  
а) PLCC2; б) PLCC4; в) 0,5 Вт PLCC6

#### 4.3 Анализ теплового влияния различных конструкций печатных плат

Давно известен способ улучшения теплопроводности платы из стеклотекстолита типа FR-4 - добавление металлизированных отверстий, которые создаются путем сверления и последующего омеднения (рис. 4.6). Эти отверстия могут быть использованы для электрического соединения между слоями фольги [4.10].

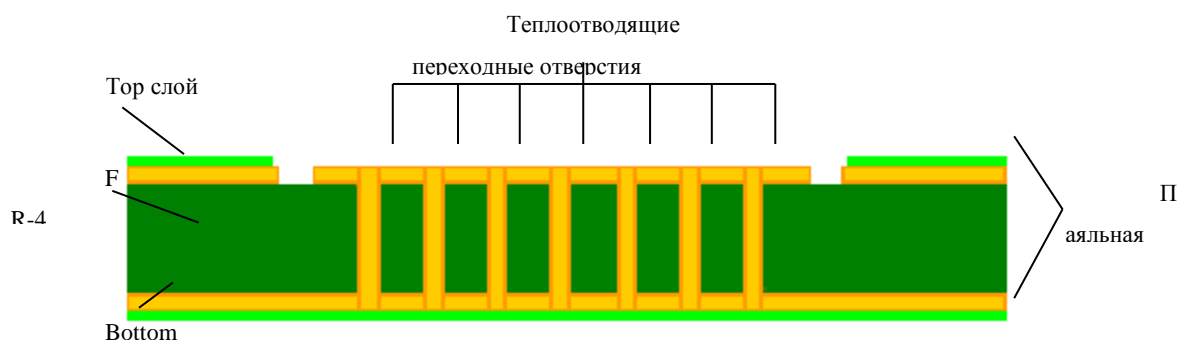


Рисунок 4.6 – Поперечное сечение ПП на FR-4 с теплоотводящими переходными отверстиями [4.1]

Добавочные отверстия уменьшают тепловое сопротивление платы из стеклотекстолита FR-4. Тепловое сопротивление одиночного отверстия можно рассчитать по формуле:

$$\theta = l / (k \times A).$$

Таблица 4.1 – Теплопроводность слоев платы из двухстороннего FR-4 с переходными отверстиями.

Слой / Материал	Толщин а, мкм	Теплопроводность Вт/м·°К
Паяльная паста SnAgCu	75	58
Верхняя фольга Cu	70	398
Стеклотекстолит FR4	1588	0,2
Отверстия, заполненные пастой SnAgCu	1588	58
Нижняя фольга Cu	70	398

Используя значения, приведенные в таблице 4.1, вычисляем сопротивление одиночного металлизированного отверстия Ø 0,6 мм:

$$(1,588 \times 10^{-3}) / (58 \times (\pi \times (0,5 \times 0,6 \times 10^{-3})^2)) = 96,8 \text{ } ^\circ\text{C/W}.$$

В случае использования N отверстий на некой площади, результирующее сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\theta_{vias} = l / (N_{vias} \times k \times A).$$

Надо иметь в виду, что необходимо обеспечить плотное прилегание источника тепла к площадке с металлизированными отверстиями, в противном случае, сопротивление будет увеличиваться в связи с неравномерным распределением тепла. Можно рассчитать общий эквивалент сопротивления в области теплоотводящей площадки светодиода, включающего в себя тепловое сопротивление диэлектрического слоя и металлизированных отверстий.

Упрощенно, оба сопротивления рассматриваются как параллельное применение формулы:

$$\theta_{vias \text{ FR-4}} = [ (1/\theta_{vias}) + (1/\theta_{FR-4}) ]$$

Используя значения, приведенные в таблице Таблица 4.1, для платы размером 270 мм<sup>2</sup> с пятью отверстиями Ø 0.6мм тепловое сопротивление приблизительно составит 12°C/Вт, что значительно лучше по сравнению с первоначальным значением сопротивления той же платы без отверстий – 30 °C/Вт.

#### 4.3.1 Сравнение пустых отверстий и отверстий, залитых припоем

Полое металлизированное отверстие отводит тепло только благодаря тонкому слою меди, нанесенному в процессе металлизации, и имеет более высокое тепловое сопротивление, по сравнению с заполненным припоем. Тепловое сопротивление полого отверстия рассчитывается так:

$$A = \pi \cdot (D \cdot t - t^2)$$

где:  $D$  – диаметр отверстия;  $t$  – толщина покрытия.

Для отверстия диаметром 0.6 мм с толщиной омеднения 35 мкм площадь медного колечка покрытия всего 0.06 мм<sup>2</sup>. А если это отверстие будет заполнено припоем, то площадь его вырастет до 0.28 мм<sup>2</sup>, а тепловое сопротивление уменьшится с 441 °C/Вт до 96,8 °C/Вт соответственно.

Полые отверстия заполняются припоем во время пайки. Однако, в зависимости от ряда факторов, это заполнение не всегда происходит полностью. И рассчитывать на то, что заполнение улучшит теплоотвод, было бы не совсем неправильно.

На рис. 4.7 показан пример некачественной пайки и образовавшихся пустот под запаянным светодиодом (показаны красным). Пустоты увеличивают тепловое сопротивление, а с другой стороны, излишки припоя могут переполнять отверстия, что приведет к неровностям ПП под теплоотводом светодиода и уменьшению площади теплового контакта.



Рисунок 4.7 – Пример незаполненных отверстий

Можно добиться равномерного заполнения отверстий припоем при сверлении отверстий диаметром менее 0,3 мм. В этом случае сила поверхностного натяжения расплавленного припоя внутри отверстия противостоит воздействию силы тяжести, что способствует равномерному распределению припоя. Недостаток этого способа в том, что уменьшение диаметра отверстий приводит и к уменьшению площади тепловых контактов, и как следствие этого - увеличение теплового сопротивления платы. Помимо заполнения припоем во время пайки, можно заполнять отверстия и любыми другими теплопроводящими материалами, например эпоксидными смолами. Но всё это увеличивает время изготовления ПП и увеличивает их стоимость. В общем, CREE выступает за использование полых металлизированных отверстий как более практичную и эффективную технологию, в сравнении с отверстиями, заполняемыми припоем [4.6].

График (рис. 4.8) иллюстрирует зависимость теплопроводности от изменения диаметра и количества отверстий. В этом эксперименте все отверстия были заполнены припоем SnAgCu. Как и ожидалось, чем больше диаметр, тем меньше тепловое сопротивление.

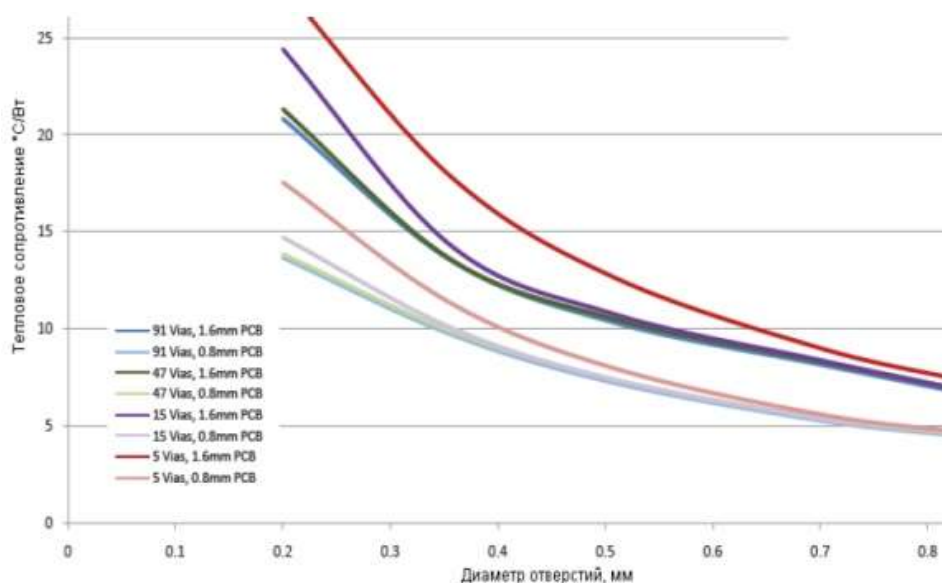


Рисунок 4.8 – FR-4 PCB с различными диаметрами и количеством отверстий

В следующем случае рассматривается влияние количества тепловых омедненных отверстий диаметром 0,254 мм, расположенных на расстоянии 0,635 мм друг от друга. Результаты показывают (рис. 9), что увеличение числа отверстий более 14 не приведет к существенному уменьшению теплового сопротивления. Очевидно это связано с тем, что 14 отверстий – это максимум достижимой плотности на площадке, расположенной под теплоотводящей площадкой светодиода.

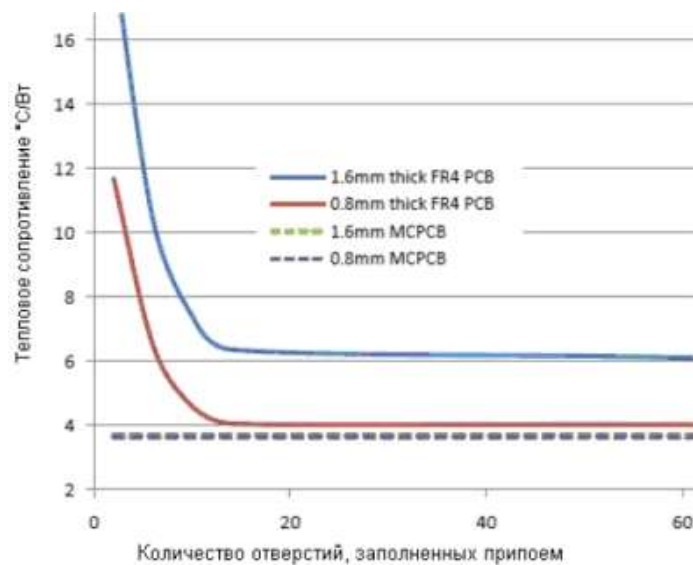


Рисунок 4.9 – Тепловое сопротивление ПП FR-4 с различным количеством тепловых отверстий и MC PCB

#### 4.3.2 Сочетания увеличения поверхности и количества отверстий

В этом эксперименте исследовались варианты исполнения ПП с 14 отверстиями диаметром 0.25 мм с различной шириной медных дорожек. Нижний слой фольги на ПП не просверлен. Как видно из графика (рис. 4.10), увеличение ширины дорожки более чем 6 мм не приведет к улучшению теплового сопротивления ПП.

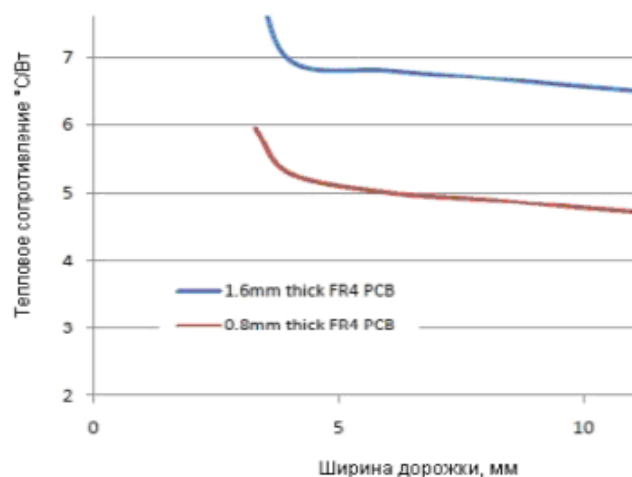


Рисунок 4.10 – Тепловое сопротивление FR-4 PCB с 14 отверстиями и различной шириной дорожек

Было выяснено также, что изменение ширины нижней дорожки несущественно влияет на общее тепловое сопротивление.



В [4.2] были исследованы факторы, влияющие на тепловой режим светодиодов: температура окружающей среды, материалы печатной платы и расположение плат в пространстве и их размеры.

Влияние температуры окружающей среды и теплового сопротивления материалов, исследовались для трех типов печатных плат. Монтажная плата II типа, выполненная из двустороннего стеклотекстолита FR4, в которой теплоотводящие металлизированные отверстия диаметром 0,4 мм заполнялись припоем.

Исследования проводились при температуре окружающей среды 25 °С и нормальной влажности.

Результаты измерений показали, что плата с основанием из фольгированного алюминия имела более низкую температуру, чем из фольгированного стеклотекстолита FR4, поскольку алюминий имеет более низкое тепловое сопротивление и отдает большее количество тепла в окружающую среду. В тоже время, плата из двустороннего фольгированного стеклотекстолита, за счет наличия дополнительных теплоотводящих металлизированных отверстий, имела лучшие тепловые характеристики, чем фольгированный алюминий (табл.4.2).

Таблица 4.2 – Данные измерений.

Материал платы	Измеренная температура	$\theta_{ba}$ (тепловое сопротивление между платой и окружающей средой)
Односторонний стеклотекстолит FR4	84.8 °С	59.8 °С/Вт
МС PCB	76.6 °С	51.6 °С/Вт
Двухсторонний стеклотекстолит FR4 с теплоотводящими отверстиями	75.5 °С	50.5 °С/Вт

При увеличении количества отверстий теплопроводность платы из фольгированного стеклотекстолита FR4 еще более увеличивается (рис. 4.11,4.12) .

Таблица 4.3 – Температура корпуса белого светодиода LD-700AWNI-70 после работы в течение 30 минут.

Размеры, мм	60· 60·1,8	60·40· 1,8	60·2 0·1,8	20·20· 1,8	$I_f$ (mA)
Объем, мм <sup>2</sup>	6480	4320	2160	720	
Площадь, мм <sup>2</sup>	3600	2400	1200	400	
Плата на Al PCB					
LD- 700AWNI-70	47	56	68	80	350
Плата из двухстороннего стеклотекстолита FR4 с 4 отверстиями					
LD- 700AWNI-70	74	75	79,8	81,7	350

График на рис. 4.11 иллюстрирует зависимость теплопроводности платы из фольгированного стеклотекстолита FR4 при различном количестве отверстий.

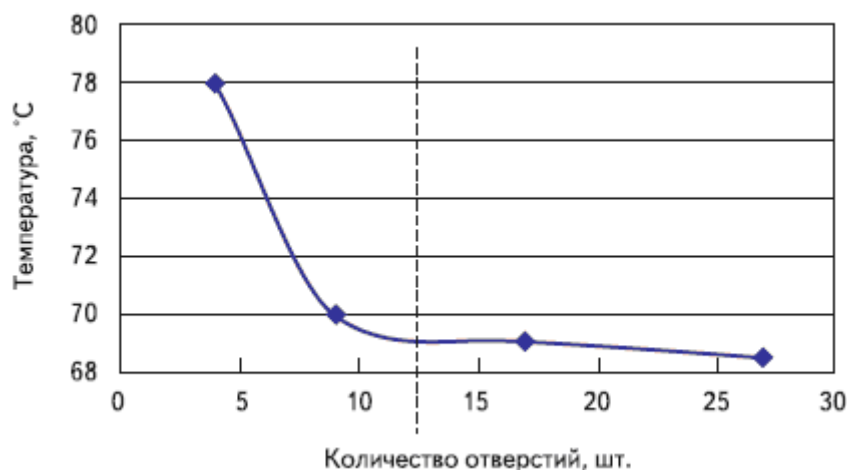


Рисунок 4.11 – График зависимости теплопроводности [4.2]

Расположение печатных плат в пространстве и их размеры также оказывают влияние на величину теплового сопротивления между светодиодом и окружающей средой.

При вертикальном размещении отвод тепла в условиях естественной конвекции лучше, чем при горизонтальном. График на рис.4.12 иллюстрирует зависимость теплового сопротивления плат различного размера из фольгированного алюминия при разной их ориентации в пространстве.

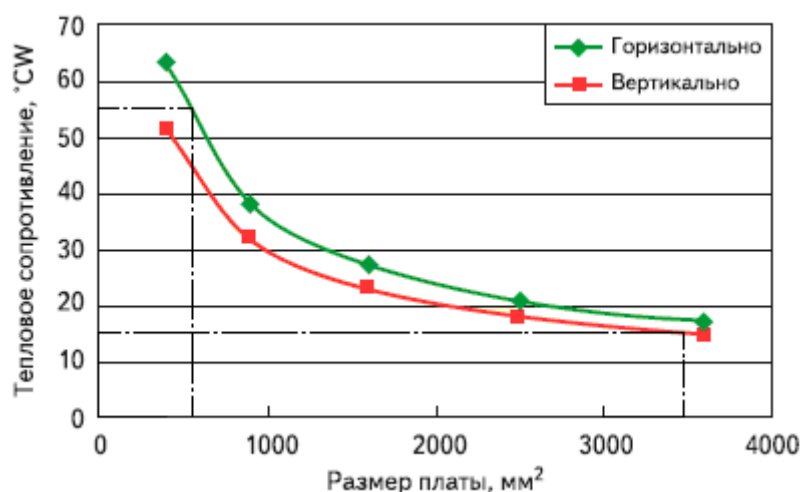


Рисунок 4.12 – График теплового сопротивления [4.2]

Используя данный график (рис.4.12), можно рассчитать площадь платы для достижения оптимального теплового режима.

Например, из графика видно, что тепловое сопротивление для одиночного светодиода равно  $55,7^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  (рассеиваемая мощность  $0,95\text{ Вт}$ ), обеспечит плата из фольгированного алюминия размером примерно  $400\text{ мм}^2$  при её горизонтальном расположении в пространстве. А для сборки состоящей из четырех светодиодов (рассеиваемая мощность  $3,8\text{ Вт}$ , тепловое сопротивление  $13,9^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ) уже необходимо использовать плату площадью не менее  $3500\text{ мм}^2$  расположенную вертикально или применить дополнительный радиатор с соответствующими тепловыми характеристиками, что является наиболее эффективным методом, чем увеличение размера платы.

#### 4.4 Регулирование температурных режимов с использованием внешних охлаждающих устройств

Инженерные расчеты для охлаждения сложны, поскольку необходимо учесть конструктивные особенности полупроводникового источника света и общее тепловое сопротивление изделия как сумму тепловых сопротивлений отдельных элементов конструкции. Существуют три возможных способа охлаждения полупроводникового источника света: через корпус, через печатную плату (варианты PCB или MC PCB рассмотренные выше) и с помощью внешних охлаждающих устройств, например, радиаторов.

При охлаждении полупроводникового источника света через корпус отвод тепла минимален, и поэтому данный метод малоэффективен, особенно при охлаждении мощных светодиодов.

В случае мощных ультраярких светодиодов использование внешних радиаторов является обязательным. Существуют различные подходы к конструированию радиаторов для свободной конвекции.

#### 4.4.1 Выбор радиатора

После того как установлены тепловые критерии (с обязательным учетом характеристик и рекомендаций производителей светодиодов), рассчитано тепловое сопротивление, рассмотрены возможные способы монтажа и оценен размер доступного пространства, выбирают конструкцию радиатора (рис. 4.13). Особое внимание при этом уделяют его пространственной ориентации.



Рисунок 1– Специализированные радиаторы для мощных светодиодов компании LUSTROUS Corp. (Тайвань)

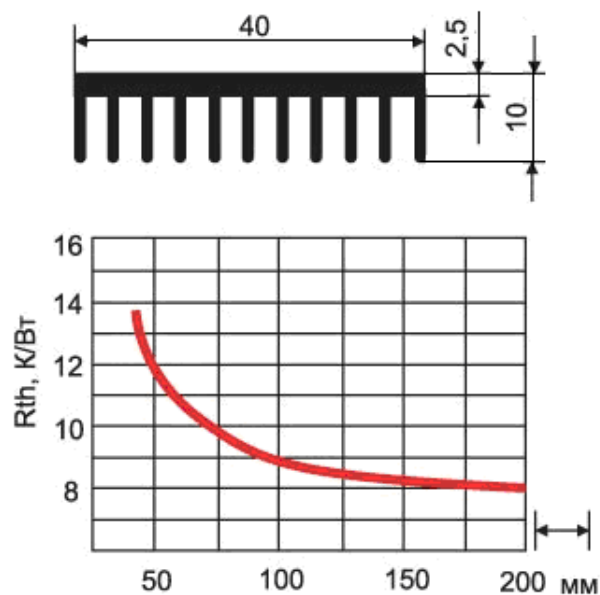


Рисунок 4.14 – График зависимости теплового сопротивления радиатора от его размеров

Гребенчатые радиаторы следует монтировать так, чтобы они не создавали препятствий естественным конвективным потокам. При активном охлаждении необходимо обеспечить максимально беспрепятственный впуск и выпуск воздуха. Поставщики радиаторов для светодиодов указывают тепловое сопротивление изделий на графиках в документации к ним.

Пользуясь предоставленными производителем графиками, по расчетному значению теплового сопротивления пользователь может определить параметры радиатора для конкретного применения (рис.4.14.).

Среди других методов охлаждения светодиодов с большим тепловыделением можно упомянуть термоэлектрическое (на базе элементов Пельтье) и жидкостное охлаждение (через микроканалы и т. п.). Однако эти методы находят лишь ограниченное применение по причине их дороговизны.

#### 4.4.2 Применение радиаторов

Использование дополнительного радиатора – более эффективный метод, чем увеличение размера платы. С его помощью можно значительно уменьшить температуру корпуса светодиода. Были проведены экспериментальные исследования двух видов алюминиевых радиаторов, размерами 28x18x8мм и 38x38x6мм. Данные приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты измерений.

Материал платы 20x20 мм	R4	Al PCB	Al PCB	Al PCB	Al PCB
Теплопроводящий материал		-	Прокладка фирмы 3М	Теплопроводная паста	Теплопроводная паста
Радиатор		-	Алюминий 28x18x8 мм	Алюминий 28x28x8 мм	Алюминий 38x38x6 мм
Прямой ток $I_f$ (мА)	Температура корпуса светодиода, °С				
100	7	37	35	34	32
150	7	47	44	40	37
200	6	55	50	44	42
250	4	62	58	50	47
300	3	70	66	55	51
350	2	79	73	61	56
400	9	85	80	66	60
450	8	92	86	71	63
$\theta_{ca}$ (°С/Вт) при 350 мА	2	49	44	33	29

Особое внимание необходимо уделить сопряжению светодиодного модуля и радиатора. Наилучший контакт между светодиодом и радиатором достигается только при максимальной ровности контактирующих поверхностей и отсутствии воздушных полостей, препятствующих теплопередаче.

Для передачи тепла от основания к радиатору используют: теплопроводящие пасты, и специальные материалы с изменяющимися физическими свойствами - сглаживающие естественные неровности поверхностей. В этом качестве используются [4.1]:

- теплопроводящая паста – прекрасный способ соединения относительно плоских и даже плохо согласованных поверхностей, однако при этом необходимо обеспечить очень толстый слой. Теплопроводящую пасту рекомендуется использовать, особенно при механическом креплении

- светодиодов винтами. Неудобства: низкая технологичность, большие временные затраты и загрязнение;
- тонкая алюминиевая фольга (0,051-0,076 мм) с или без парафинового покрытия с обеих сторон. Парафиновое покрытие обеспечивает заполнение микроскопических неровностей на касающихся поверхностях. Неудобства: фольга должна прокладываться без складок, которые резко ухудшают теплопередачу; наличие двух поверхностей соприкосновения вместо одной;
  - тонкая прокладка из теплопроводящего, но изолирующего материала (каптона, полиамидной пленки). Неудобство: худшая теплопроводность, чем у алюминиевой фольги;
  - эластомер на основе силикона (толщиной 0,127-0,254 мм). Хотя такие прокладки очень технологичны, они не столь хороши, как проводящие пасты и парафинированный алюминий. Однако при использовании наполнителя из окиси алюминия эластомер может быть эффективен, особенно когда поверхности не являются достаточно плоскими. Неудобство: тепловое сопротивление эластомера зависит от давления, поэтому при неаккуратной сборке может произойти непредвиденное снижение теплопроводности;
  - более толстый слой эластомера на основе силикона (0,508-0,762 мм и выше), предназначенный для соединения грубо обработанных металлических, где имеется большая вероятность возникновения зазоров и снижения теплопроводности. Неудобство: относительно низкая эффективность передачи тепла, однако лучшая, чем у обычного воздуха;
  - материалы, изменяющие свое физическое состояние. Такие материалы представляют собой специально изготовленные слоистые структуры из парафина или воска, выпускаемые в виде больших листов или специально нарезанных прокладок. После размещения прокладки между двумя металлическими поверхностями изделие нагревают до температуры 60-70 °С. Парафин тает и почти идеально заполняет микротрещины. Для плоских металлических деталей данный метод является лучшим, сравниться с ним может только пайка.

#### 4.4.3 Реализация теплоотвода в светодиодной технике

Наиболее распространённым способом отведения избыточного количества тепла от мощных светодиодов является его передача на печатную плату (в том числе и платы с

металлическим основанием – MC PCB). Затем тепло передается в окружающую среду преимущественно при помощи конвекции. Однако в каждом случае эффективность теплоотвода будет зависеть от эффективности передачи тепла в области контакта двух поверхностей, так как поверхности источника тепла и теплоприемника имеют шероховатости и неровности. При контакте плоскостей в большинстве случаев возникают зазоры (микроразрывы), в которых содержится воздух (рис. 4.15). Как результат - контакт между плоскостями происходит точечно, что существенно увеличивает тепловое сопротивление перехода.

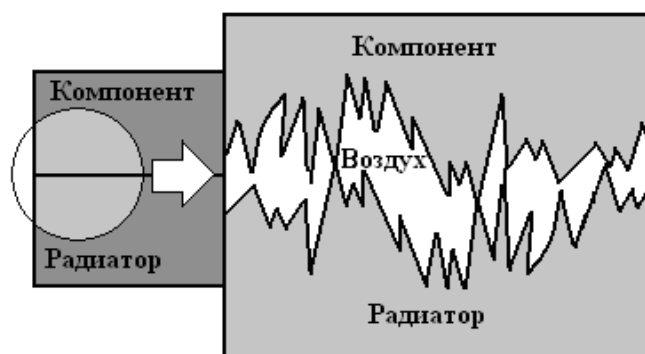


Рисунок 4.15 – Схематичное изображение контакта двух поверхностей [4.8]

Воздух имеет коэффициент теплопроводности около  $0,02 \text{ Вт/м}^*\text{К}$ , что крайне мало, и примерно в 40 раз меньше, чем у типичных теплопроводящих паст. Таким образом, в связи с наличием воздуха между контактирующими поверхностями возникает высокое сопротивление тепловому потоку, и эффективность отвода тепла существенно падает. Чтобы избежать этого негативного эффекта от присутствия воздуха используют теплопроводящий материал, который заполняет зазоры. Тип материала выбирают, исходя из рассеиваемой мощности, конструктивных особенностей изделия и уровня теплопередачи.

#### **Уровни теплопередачи в светодиодном устройстве**

Рассмотрим несколько уровней передачи тепла в типичном LED светильнике (рис.4.16.).



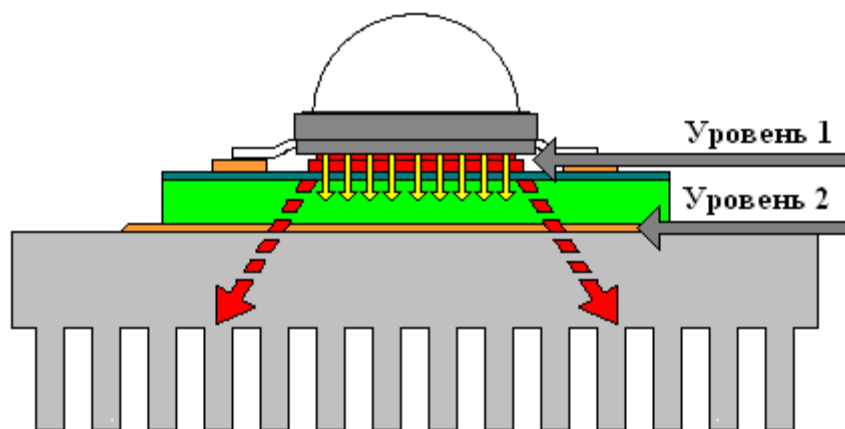


Рисунок 4.16 – Уровни теплопередачи в светодиодном устройстве

**Уровень 1:** передача тепла от светодиода на печатную плату или основание. Этот уровень характеризуется очень малой площадью теплового потока и относительно большим количеством передаваемого тепла. Таким образом, для обеспечения эффективной теплопередачи нужен материал, который обеспечит минимальное тепловое сопротивление в области контакта поверхностей. Часто для обеспечения теплопередачи на первом уровне теплоотводящее основание светодиодов припаивают к плате. Пайка - хороший вариант для теплопередачи, так как коэффициент теплопроводности типичного припоя -  $85 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ , но использование данного способа в ряде случаев ограничено из-за технологических соображений. Альтернативой пайке может служить применение теплопроводящих клеев или паст с высокой теплопроводностью (до  $7 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$  для материалов Dow Corning) [4.8].

**Уровень 2:** передача тепла от платы (модуля) со светодиодами на радиатор или другую рассеивающую тепло поверхность. Этот уровень характеризуется большой площадью передачи и менее мощным удельным тепловым потоком, в сравнении с рассмотренным ранее первым уровнем. Для обеспечения теплопередачи на втором уровне можно использовать материалы с относительно невысокой теплопроводностью (в пределах  $2 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$ ). В качестве теплопроводящего материала (в зависимости от конструкции изделия) могут использоваться силиконовые теплопроводящие пасты, клеи, подложки или компаунды [4.8].

Когда светодиоды устанавливаются непосредственно на радиатор, первый и второй уровни теплопередачи совпадают. В этом случае в качестве теплопроводящего материала можно использовать теплопроводящие пасты или клеи с высокой теплопроводностью.

#### 4.4.4 Применение теплопроводящих паст

Важно учитывать, что для использования в современных светодиодных устройствах теплопроводящие пасты должны иметь широкий диапазон рабочих температур. Для уличного светильника такой диапазон может составлять от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  и выше. Опыт показывает, что широко распространенные и популярные на отечественных производствах традиционные теплопроводящие пасты в ряде случаев не отвечают таким жестким требованиям. Поэтому через относительно короткий период времени паста может высохнуть, потерять свои полезные свойства и, как следствие, теплопередача будет нарушена.

Хорошо зарекомендовавшим себя материалом в светодиодной светотехнике для задач теплопередачи второго уровня является силиконовая теплопроводящая паста Dow Corning SC 102. Теплопроводность  $0,8 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$  дает возможность использовать её во многих светодиодных конструкциях, а диапазон рабочих температур от  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  обеспечивает эффективную и надежную теплопередачу практически при любых возможных температурах эксплуатации светильника.

Для более эффективного отвода тепла от теплонагруженных компонентов (задачи первого уровня теплопередачи), можно использовать пасты Dow Corning с более высоким коэффициентом теплопроводности вплоть до  $7 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$  (Dow Corning TC -5600) [4.8].

#### 4.4.5 Применение теплопроводящих клеев

Избавиться от дополнительных элементов крепления можно, используя силиконовые теплопроводящие клеи. В дополнение к теплоотводу они обеспечивают ещё и механическую фиксацию, что дает возможность упростить процесс сборки светильника. Силиконовые теплопроводящие клеи прекрасно работают в широком диапазоне температур и обладают высокой теплопроводностью, что обуславливает их широкое применения в современной светодиодной технике. В качестве примера можно привести несколько силиконовых теплопроводящих клеев Dow Corning и рассмотреть их особенности (таблица 4.5)

Таблица 4.5 – Сравнительные характеристики теплопроводящих клеев Dow Corning

Параметры	Dow Corning. SE 4420	Dow Corning. SE 4486	Dow Corning. 3-6752
Вязкость, сП	108,000	19,000	81,000
Теплопроводность Вт/м <sup>°</sup> К	0,9	1,6	1,9

Полное отверждение	200 часов при 20° С*	120 часов при 20 °С*	3 минуты при 150 °С
Потенциальное применение	Теплоотвод с малых площадей среди их тепловых потоков в мелкосерийном производстве	Теплоотвод с больших площадей высоких тепловых потоков в мелкосерийном производстве	Использование в крупносерийном производстве при высоких тепловых нагрузках
* - отверждение слоя в 3 мм при относительной влажности воздуха 55%;			

#### 4.4.6 Применение теплопроводящих компаундов

Часто светодиодная техника оказывается подвержена неблагоприятным воздействиям окружающей среды: влажность, соляной туман, кислотные осадки, загрязнение пылью и т.п. Это информационные LED экраны, светильники уличного освещения, светильники взрывобезопасного исполнения, светофоры и т.п. Есть несколько способов защиты LED устройств от воздействия внешней среды. Традиционно используют стекло, которым закрывают устройство. Однако тепловой режим устройства и его оптические характеристики при таком способе защиты не становятся лучше. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев замкнутое пространство под защитным стеклом светильника остается заполнено воздухом, поэтому при определенных условиях под стеклом светильника может образовываться конденсат.

Это может изменить оптические свойства светильника, вызвать коррозию и короткие замыкания в устройстве. Очевидно, что современный светильник требует более современных решений для защиты устройства. Многие производители для защиты устройства всё чаще используют теплопроводящие заливочные компаунды. В этом случае плата или светильник заливается с внешней стороны до уровня оптических элементов (рис.4.17). Таким образом, при помощи одного материала обеспечивается отвод тепла от светодиодов, защита светодиодного устройства от негативного воздействия внешней среды и дополнительная механическая прочность светильника.

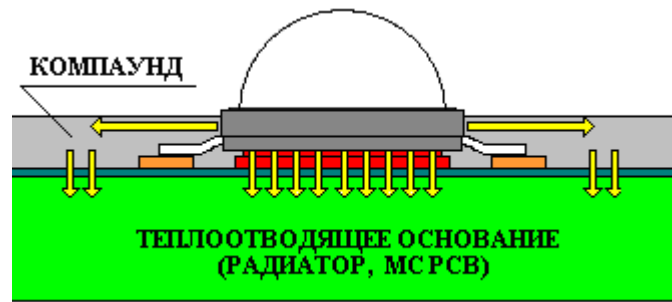


Рисунок 4.17 – Варианты защиты светодиодного светильника заливкой силиконовым теплопроводящим компаундом

Такое решение может повысить эффективность сборки, надежность и конкурентоспособность светодиодного устройства. Хорошим решением для заливки светодиодного устройства могут быть силиконовые компаунды Sylgard 160 и Sylgard 170. Материалы характеризуются теплопроводностью до  $0,6 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$  и возможностью полимеризации при любой глубине заливки. Время полимеризации компаундов составляет несколько минут при повышенной температуре (4 минуты при  $100^{\circ}\text{C}$ ). Также возможна полимеризация и при комнатной температуре, но время отверждения будет дольше. Основные различия озвученных материалов в том, что Sylgard 170 более текучий (2000 сП против 6000 сП у Sylgard 160). Это определяет выбор компаунда для решения конкретной задачи. Кроме того, таким же образом можно поступить при защите источника питания (драйвера) от негативных внешних воздействий. Принцип тот же: компаунд заполняет объём, в котором ранее был воздух, при этом улучшается тепловой баланс всего блока. Такое решение является общепринятой мировой практикой. В некоторых конструкциях светильников драйвер оказывается заключенным в корпусе светильника. Из-за ограниченного теплообмена драйвер может перегреться и переключиться в режим «защита от перегрева». В ряде случаев воздух, окружающий источник питания, может выступать в роли теплоизолятора и ограничивать теплопередачу на корпус светильника. Выходом из такой ситуации может быть заполнение пространства вокруг источника питания материалом с высокой теплопроводностью, например, теплопроводящим силиконовым компаундом.

#### 4.4.7 Применение теплопроводящих подложек

Для повышения технологичности сборки и упрощения конструкции светодиодного светильника полезным решением могут быть теплопроводящие подложки. Этот класс материалов представляет собой заранее отвержденный силиконовый гель со специальными свойствами. Теплопроводность до  $3,5 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{К}$  и толщина от 0,25 до 5,0 мм

позволяют решать широкий спектр задач по отводу тепла с поверхности печатных узлов (данные приведены для материалов Dow Corning, таблица 4.2).

Таблица 4.6 – Линейка теплопроводящих подложек Dow Corning .

Продукт Dow Corning	Отличительные особенности	Теплопроводность Вт/(м*К)	Толщина, мм
Dow Corning® TP-15**	Клейкая поверхность с одной или двух сторон. Демпфируют нагрузки и обеспечивают хорошую электрическую изоляцию. Хорошая теплопроводность	1,1-1,3	0,25-2,0
Dow Corning® TP-21**	Хорошо сжимаемые и клейкие с двух сторон подложки. Решение для задач, где требуется плотное заполнение зазоров или перенос тепла через большие воздушные зазоры	0,7	2,2-5,0
Dow Corning® TP-22**	Демпфируют механические нагрузки и отличаются высокой теплопроводностью	1,64	0,25-3,0
Dow Corning® TP-23**	Подложки с высокой степенью сжимаемости и высокой теплопроводностью. Решение для задач, где требуется эффективный перенос тепла через большие воздушные зазоры.	1,4	2,2-4,6
Dow Corning® TP-35**	Мягкие теплопроводящие подложки. Демонстрируют высокую степень сжимаемости и высокую теплопроводность	3,5	0,5 - 5,0
** - возможны различные варианты исполнения			

С точки зрения конструкции изделия в дополнение к функции передачи тепла подложки могут выполнять еще и функцию заполнения воздушных зазоров до 4 мм и более (можно складывать подложки в несколько слоев). Эта возможность полезна как при производстве светодиодных устройств, так и при производстве источников питания. Дополнительно, благодаря высоким диэлектрическим свойствам и хорошей сжимаемости, одна подложка может обеспечить отвод тепла с любой площади печатного узла и от компонентов различных размеров и форм. С технологической точки зрения применение теплопроводящих подложек упрощает и сокращает процесс сборки светодиодной

техники. Подложки не требуют процессов полимеризации, что исключает необходимость применения специального оборудования для отверждения, сокращает затраты времени на сборку, уменьшает потребление электроэнергии и человеческих ресурсов. Применение теплопроводящих подложек способно повысить конкурентоспособность светодиодной техники как за счет обеспечения высокого качества продукции, так и за счет оптимизации себестоимости.

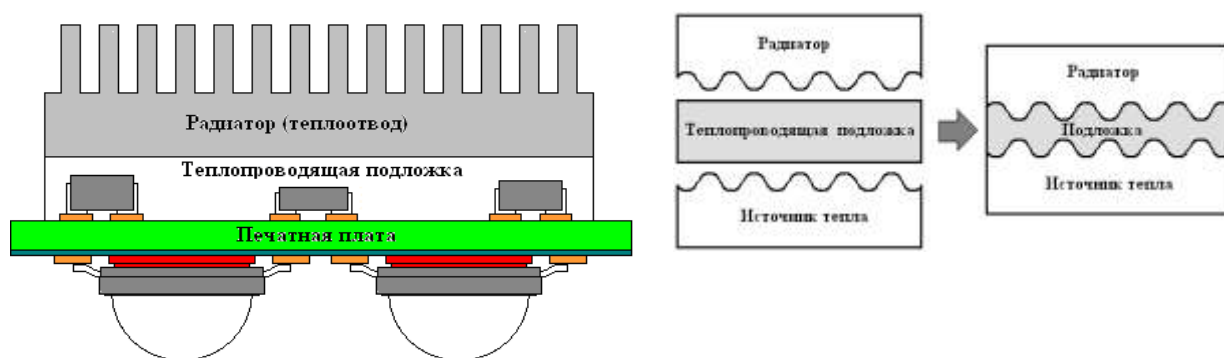


Рисунок 4.18 – Применение теплопроводящих подложек в светодиодной технике

Таким образом, применение современных теплопроводящих материалов является одним из тех решений, которые помогут повысить конкурентоспособность светодиодной техники за счет обеспечения высокого качества продукции и оптимизации себестоимости.

#### 4.4.8 Определение требований к характеристикам радиатора

Для приложения ASMT-QWBC-Nxxxx свыше 0,5 Вт предъявляются следующие требования:

- ток источника питания  $I_F = 150$  мА;
- максимальная температура окружающей среды  $T_{Amax} = 25$  °С;
- 1 светодиод ASMT-QWBC-Nxxxx в модуле. Предельное ограничение вычисления:
- максимальная мощность рассеивания [Вт]:  

$$Pd_{max} = I_F \times V_{Fmax} = 0,150 \times 3,8 = 0,615;$$
- максимальная температура  $p$ - $n$ -перехода светодиода [°С]  $T_{Jmax} = 125;$
- тепловое сопротивление ASMT-QWBE [°С/Вт]  $R\theta_{J-P} = 40.$

Необходимо определить опции монтажа и размеры, необходимые для реализации требований приложения. С помощью формулы (13) можно вычислить требуемое тепловое сопротивление  $R\theta_{P-A}$  [°C/Вт]:

$$R\theta_{P-A} = (T_{Jmax} - T_{Amax}) / P_{dmax} - P\theta_{J-P} = (125 - 25) / 0,57 - 40 = 135,4.$$

## 4.5 Методы измерения температуры p-n-перехода

Из-за трудностей непосредственного измерения температуры p-n-перехода  $T_J$  она может быть оценена косвенно, путем использования модели внесенного теплового сопротивления. Для этой процедуры измеряется  $R\theta_{P-A}$  между точкой пайки испытываемого устройства и окружающей средой. С помощью этого значения можно вычислить температуру p-n-перехода.

Ниже описаны процедуры для измерения  $R\theta_{P-A}$  и последовательного вычисления  $T_J$ :

- Возьмите значение  $R\theta_{J-P}$  светодиода из соответствующих спецификаций.
- Припаяйте к печатной плате светодиод, используемый в качестве испытываемого устройства (DUT).
- Поместите небольшой термодатчик на штырек катода/анода DUT. Обратитесь к спецификации для получения маркировки (катода или анода) в виде указателя основного теплового пути.
- Подайте на светодиодный модуль необходимый прямой ток. Светодиодный модуль должен быть включен в течение примерно 30 минут, чтобы достичь его температурной стабильности.
- Запишите температуру точки пайки  $T_P$ , температуру окружающей среды  $T_A$ , ток  $I_F$  и соответствующее прямое напряжение  $V_F$ .
- Вычислите  $R\theta_{P-A}$  системы и  $T_J$  для DUT с помощью уравнений (14) и (15):

$$R\theta_{P-A} = (T_P - T_A) / (I_F \times V_F), \quad (14)$$

$$T_J = T_P + (I_F \times V_F \times R\theta_{J-P}). \quad (15)$$

### 4.5.1 Пример вычисления

Для приложения PLCC2 HSMC-A100 конструктивный ток оценивается как  $I_F = 20$  мА. В соответствии со спецификацией HSMC-A100 следует не допустить превышения температуры p-n-перехода, равной 110 °C. Таким образом, необходимо измерить температуру окружающей среды  $T_A$ , температуру точки пайки  $T_P$  и прямое напряжение  $V_F$ .

Результаты теста:  $T_P = 28$  °C,  $V_F = 2,0$  В.

В спецификации HSMC-A100 для величины  $R\theta_{J-P}$  установлено значение 28 °C/Вт. Вычислим значение  $T_J$  [°C] для DUT с помощью уравнения (15):

$$T_J = 28 + (20 \times 2,2 \times 280) = 40,32.$$

Следовательно,  $T_J < 110$  °C max.

#### Список литературы к разделу 4

- 4.1. Винокуров А. Расчет печатных плат для светодиодов CREE серий XP и MX // Полупроводниковая светотехника, №3, 2010 С. 16-20.
- 4.2. Винокуров А. Тепловые режимы мощных светодиодов DORADO // Компоненты и технологии. – №5. – 2006. – С. 1-4.
- 4.3. Исламгазина Л. Особенности сборки силовых модулей в условиях перехода к бессвинцовым технологиям // Компоненты и технологии. – №9. – 2006.
- 4.4. Pol Andreaseas. Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC // Полупроводниковая светотехника. – №5, 2010. – С. 54-57.
- 4.5. Peter Marx. LED-Anwendungstechnik // Licht. – №3. – 2009. – С. 184-188.
- 4.6. Philips. Справочник светодиодное освещение. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/238843168/LED-lighting-explained-pdf>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 4.7. Скрипников Ю.Ф. Радиаторы для полупроводниковых приборов / Ю.Ф. Скрипников. – М.: Энергия, 1973. – 50 с.
- 4.8. Савельев А., Ковенский В. Эффективные решения для теплоотвода в светодиодной светотехнике // Поверхностный монтаж. – №1(87). – февраль 2011. – С. 32-35
- 4.9. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.Н. Братковский и др.; под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1232 с.
- 4.10. Optimizing PCB Thermal Performance for Cree® XLamp® LEDs. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp\\_PCB\\_Thermal.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_PCB_Thermal.pdf), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 4.11. Лотарь Н. Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – №3. – 2010. – С. 13-15.
- 4.12. Юрген Ш. Медно-керамические подложки DBC: новые возможности, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники // пер. с англ. Валев С. Компоненты и технологии. – №3. – 2005. – С. 72-75.
- 4.13. Большое тестирование термопаст. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.modlabs.net/articles/bolshoe-testirovanie-termopast>, (дата обращения: 01.01.2017).



- 4.14. Cree XLamp Long-Term Lumen Maintenance CLD-AP28. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cree.com/products/pdf/XLampXR E\\_lumen\\_maintenance.pdf](http://www.cree.com/products/pdf/XLampXR_E_lumen_maintenance.pdf), (дата обращения: 01.01.2017).
- 4.15. DPC (Direct Plated Copper) Metallized Substrate. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metallized-ceramic.ready-online.com/dpc.html>, (дата обращения: 01.01.2017).
- 4.16. ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – М.: Стандартиформ, 2001. – 20 с.
- 4.17. ГОСТ 2.106-96. ЕСКД. Текстовые документы. – М.: ВНИИНМАШ, 1996. – 39 с.
- 4.18. ГОСТ 2.118-2013. ЕСКД. Техническое предложение. – М.: 2013. – 8 с.

## 5. ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

На сегодняшний день технологии органических светоизлучающих диодов применяется многими разработчиками, например, для создания приборов ночного видения. Органические дисплеи встраиваются в телефоны, цифровые фотоаппараты, автомобильные бортовые компьютеры, коммерческие ОСИД-телевизоры, выпускаются небольшие ОСИД-дисплеи для цифровых индикаторов, лицевых панелей автомагнитол, карманных цифровых аудиопроигрывателей и т. д.

Существует три основных достоинства ОСИД, о которых не забывает упомянуть ни одна из компаний, занимающихся продвижением этой технологии в массовое производство. Это быстрый отклик устройства (около 10 мс), широкий угол обзора и большой диапазон рабочих температур. Последний параметр оказывает заметное влияние на сферу возможного применения ОСИД-дисплеев, теоретически их можно устанавливать в неотапливаемых помещениях. Устройства, выполненные на основе ОСИД, хорошо справляются со своими функциями при температурах от  $-40$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Технология развивается в двух основных направлениях: так называемые «малые молекулы» (SM-OLED) и «полимеры» (PLED).

Первая технология была разработана компанией Eastman-Kodak, и обычно в научно-технических материалах её упоминают, как «small molecule» OLED (SM-OLED). На сегодняшний день, промышленное производство таких OLED-панелей обходится довольно дорого.

Вторая технология разработана Cambridge Display Technologies (CDT) и изначально называлась Light-Emitting Polymer (LEP). Однако устройства с использованием данной разработки больше известны под названием Polymer Light Emitting Diodes (PLED). Долгое время эта технология значительно отставала в развитии от SM-OLED как по качеству отображения информации, так и сроку жизни. Но отдельного внимания заслуживает способ производства этих панелей – он основан на принципах струйной печати. Технические характеристики изготавливаемых подобным образом панелей постоянно меняются в лучшую сторону.

В основе работы ОСИД – принцип электролюминесценции, используется возможность некоторых органических соединений излучать свет под воздействием электрического тока. Каждая ОСИД-ячейка выполнена на основе нескольких тонких органических плёнок, которые в свою очередь находятся между двумя тонкоплёночными проводниками. При этом рабочее напряжение находится в интервале от 3 до 16 В.

Большая часть основных технических параметров зависит от органических материалов, которые используются при изготовлении дисплея по ОСИД-технологии.

## 5.1 Органические светоизлучающие структуры в составе дисплея

На рисунке 5.1 представлена структура ОСИД-дисплея (органический светоизлучающий диод (Organic Light Emitting Diode – OLED)).

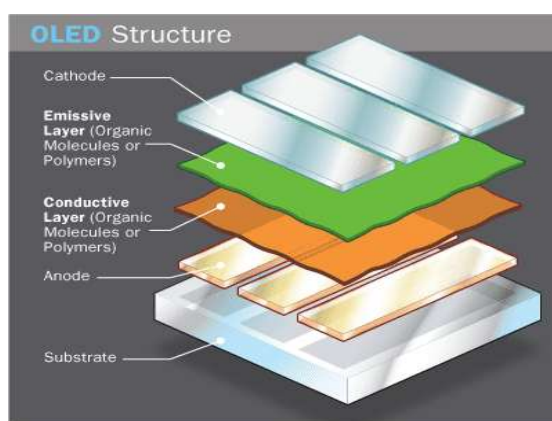


Рисунок 5.1 – Структура ОСИД-дисплея

### 5.1.1 Обоснование выбора конструкции макетов и экспериментальных образцов

Проанализированы два варианта конструкции макетов. Первый вариант горизонтальной конструкции макета и технологии имеет обобщенное название «горизонталь», второй – вертикальная структура по технологии «вертикаль». Конструкция макетов приведена на рисунках 5.2 и 5.3.

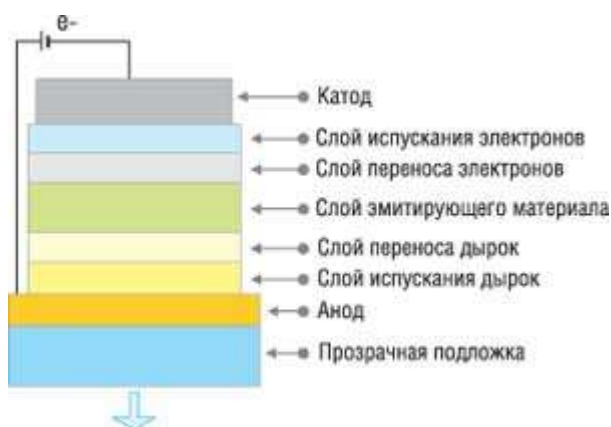


Рисунок 5.2 – Базовая структура ОСИД - дисплея

Существует три технологии изготовления полноцветных ОСИД, имеющих различные схемы расположения светоизлучающих структур (рисунок 5.3):

- схема с отдельными цветными эмиттерами;
- схема WOLED+CF (белые эмиттеры + цветные фильтры);
- схема с конверсией коротковолнового излучения.

Самый простой и привычный вариант – обычная трехцветная модель, которая в технологии ОСИД называется моделью с отдельными эмиттерами. Три органических материала излучают свет базовых цветов – R, G и B. Этот вариант самый эффективный с точки зрения использования энергии, однако, на практике довольно сложно подобрать материалы, которые будут излучать свет с нужной длиной волны, да еще с одинаковой яркостью.

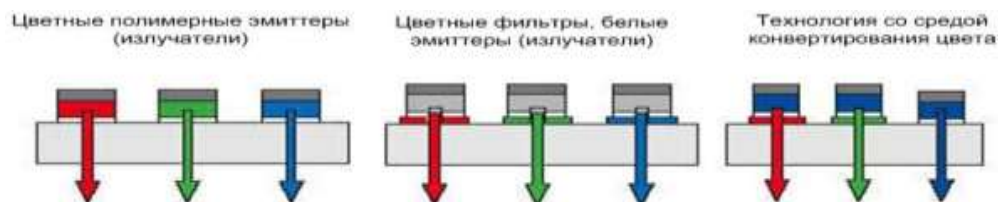
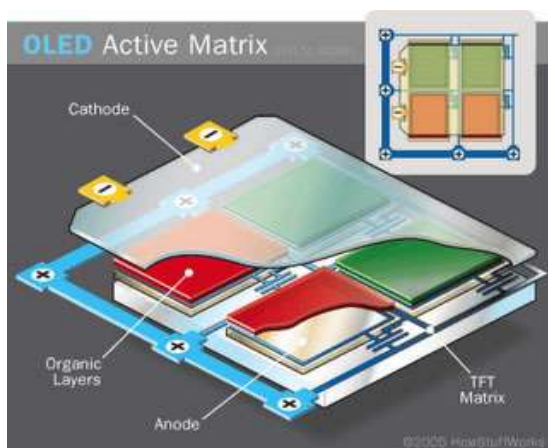


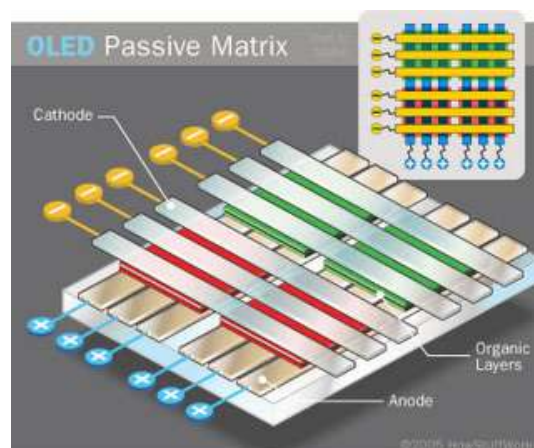
Рисунок 5.3 – Три варианта формирования структур цветных ОСИД

Второй вариант реализуется гораздо проще. Он использует три одинаковых белых эмиттера, которые излучают через цветные фильтры, однако он значительно проигрывает по эффективности использования энергии первому варианту, поскольку значительная часть излученного света теряется в фильтрах.

В третьем варианте (CCM – Color Changing Media) применяются голубые эмиттеры и специально подобранные люминесцентные материалы для преобразования коротковолнового голубого излучения в более длинноволновые – красный и зеленый. Голубой эмиттер, естественно, излучает «напрямую». У каждого из вариантов есть свои достоинства и недостатки. Все варианты в качестве элемента управления ОСИД-дисплеями могут использовать активную или пассивную матрицу (рисунок 5.4).



а) ОСИД с активной матрицей



б) ОСИД с пассивной матрицей

Рисунок 5.4– Схемы управления ОСИД-дисплеем

Анализ различных вариантов конструкции, используемых материалов и технологий показал в основе любых вариантов используются следующие базовые материалы:

- Подложка - особо плоские стеклянные заготовки (например, кварцевые фотошаблонные заготовки) или гибкие полимерные материалы.
- В качестве анодного контакта - покрытия на основе оксида индия – олова (наносятся методом магнетронного распыления в вакууме).
- В качестве катодного контакта используются алюминиевые пленки.

## 5.2 Материалы для органических светоизлучающих диодов

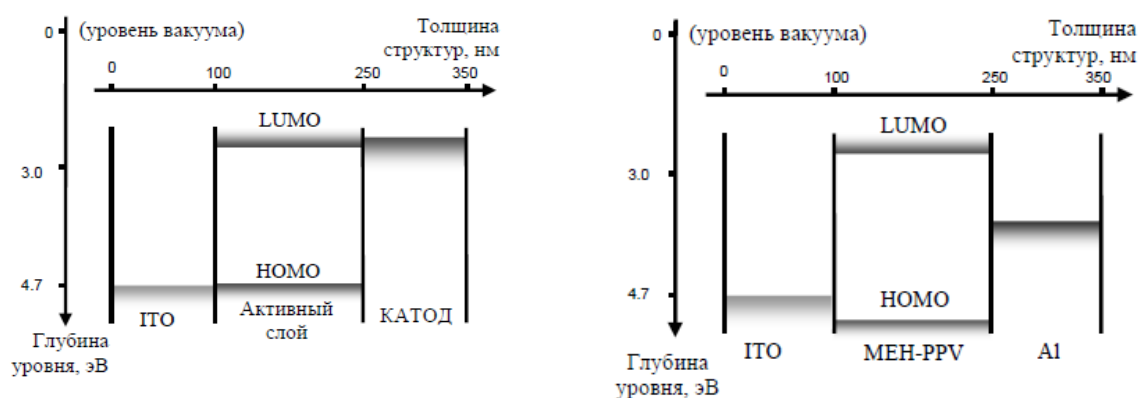
ОСИД представляет собой сэндвич структуру толщиной более 100 нм и состоит из прозрачного для оптического излучения анода, нескольких слоев, включая активный слой и слои для обеспечения транспорта электронов (ETL) и дырок (HTL) и катода. Что касается анода, то возможности варьирования материалами этого элемента ОСИД структуры ограничены и фактически используются только прозрачные слои ITO на основе оксида индия и олова, однако представляется возможным варьирование рельефа анода и модификация его поверхности различной обработкой.

Учитывая, что механизм электролюминесценции в ОСИД диодах обусловлен инжекцией электронов из катода и дырок из анода с последующей их рекомбинацией, то

естественно предполагать большое влияние на характеристики диодов материала катода, способа его нанесения и микрорельефа как катода, так и анода.

В небольшом объеме вопросов по влиянию катода ОСИД диодов посвящена работа Мирзова О.В.[5.1]. Автор отмечает, что в качестве катода в однослойном ОСИД следует выбирать металл с работой выхода, близкой или несколько меньшей, чем глубина положения LUMO вещества активного слоя. Для большинства пригодных в качестве активного слоя веществ эта глубина составляет от 2 до 3 эВ. Все металлы с работами выхода в этом диапазоне (например, кальций, барий, иттербий) являются химически активными. Как следствие, катодные слои из этих металлов чувствительны к воздействию окружающей среды и могут вступать в реакцию с материалами органических слоев, что вызывает нестабильность показателей рабочих характеристик ОСИД и ограничивает надежность получающихся устройств. Это сильно повышает уровень технологических требований для практического изготовления устройств. Использование же устойчивых к воздействию внешней среды материалов, таких как Al и In, ограничено из-за относительно высокого значения работы выхода (около 4.3 эВ), что приводит к повышению рабочего напряжения, уменьшению квантовой эффективности и времени жизни ОСИД. Сейчас очень актуальна проблема создания материалов с низкой работой выхода, которые могли бы быть использованы в качестве катода. В настоящее время широко применяются различные сплавы: Mg:Ag (10:1) и Al:Li (99:1), а также комбинации различных слоев: LiF/Al, CsF/Al, LiF/Ca/Al.

Итак, первым критерием отбора материалов для создания ОСИД является соответствие работ выхода материалов электродов положениям НОМО и LUMO вещества активного слоя. Поэтому положения этих уровней принято показывать на энергетической схеме ОСИД (рисунок 5.5).



а) идеальная энергетическая схема

б) пример неоптимальной структуры

Рисунок 5.5 – Энергетическая схема слоев ОСИД

На рисунке 5.5 (а) показан случай идеально подобранных по положению энергетических уровней материалов. В таком ОСИД, как правило, величины текущих токов и квантовая эффективность определяются величинами подвижности носителей в активном слое и значением квантового выхода люминесценции рабочего вещества. Вид энергетических схем такого ОСИД в рабочем режиме показан на рисунке 5.6 (а).

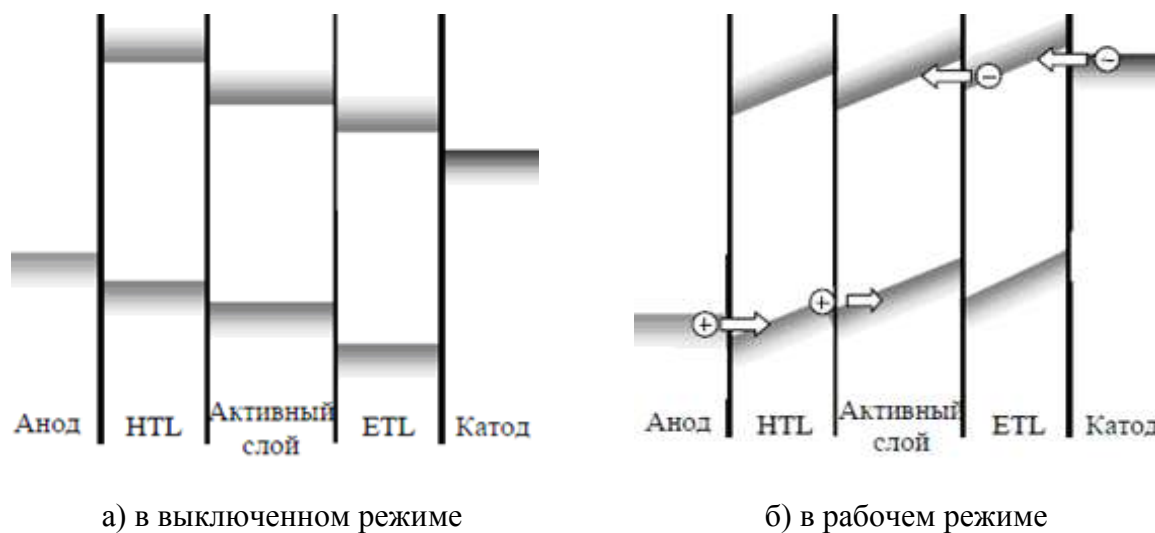
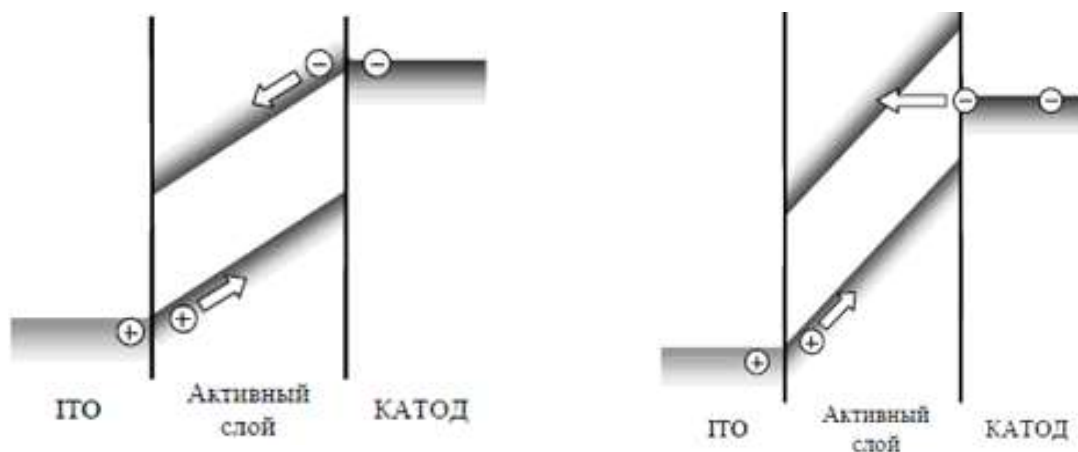


Рисунок 5.6 – Энергетическая схема слоев многослойного ОСИД

Однако полноценно удовлетворить всем перечисленным выше требованиям в однослойных ОСИД не представляется возможным. И первую трудность представляет, как правило, именно подбор электродов с работами выхода, соответствующими положениям НОМО и LUMO вещества активного слоя. Пример схемы однослойного ОСИД, у которого существует большой барьер для инжекции электронов в рабочее вещество, показан на рисунке 5.6 (б). В такой схеме электроны для попадания на LUMO должны туннелировать через этот барьер (рисунок 5.6 (б)), что сильно понижает электронный ток и повышает рабочее напряжение устройства. Кроме того, у большинства подходящих в качестве активного слоя веществ сильно отличаются значения подвижности электронов и дырок. Текущие через ОСИД электронный и дырочный токи оказываются несбалансированными. Как следствие, квантовая эффективность ОСИД, т.е. отношение числа испускаемых фотонов к числу проходящих через структуру от катода к аноду электронов, оказывается низкой, т.к. она определяется в данном случае именно меньшим из токов носителей. Избавить устройство от этого недостатка призваны дополнительные слои, используемые в многослойном ОСИД (рисунок. 5.7).



а) идеальная энергетическая схема в рабочем режиме

б) с большим барьером для инжекции электронов в рабочем режиме

Рисунок 5.7 – Энергетическая схема ОСИД

Наиболее часто используются слои с дырочной проводимостью (hole transporting layer, HTL) и электрон транспортные (electron transporting layer, ETL) слои. Их назначение состоит, во-первых, в создании промежуточной “ступени” в энергетической схеме ОСИД между электродом и активным слоем, что облегчает инжекцию носителей в случае большого барьера, и, во-вторых, в препятствовании сквозному протеканию носителей сквозь структуру, т.е. улучшению баланса между электронным и дырочным токами.

HTL помещается между анодом и активным слоем (рисунок 5.6 (а)). В качестве материала для HTL выбирается вещество с НОМО, занимающим промежуточное (лучше всего, среднее) положение между значением работы выхода материала анода и глубиной НОМО рабочего вещества. Положение LUMO у вещества HTL должно быть высоким, подвижность дырок большой, подвижность же электронов – наоборот, маленькой. Кроме того, желательно, чтобы расстояние между НОМО и LUMO было больше, чем у вещества активного слоя. Это сделает невозможным перенос энергии возбуждения от рабочего вещества на вещество HTL, а также обеспечит автоматическое выполнение условия высокого положения LUMO.

ETL помещается между активным слоем и катодом, и обладает относительно электронов свойствами, аналогичными свойствам HTL относительно дырок (рисунок 5.6 (а)). На рисунке 5.6 (б) показана энергетическая схема многослойного ОСИД в рабочем режиме. Видно, что введение дополнительных слоев приводит к замене одного высокого потенциального барьера двумя низкими. Так как вероятность туннелирования падает с уменьшением высоты барьера экспоненциально, то вероятность последовательного



туннелирования через два низких барьера оказывается значительно выше, чем через один высокий, что и ведет к облегчению инжекции носителей в активную среду.

### 5.2.1 Катодные материалы на основе лантаноидов

Проведено сравнение рабочих характеристик ОСИД конфигурации ИТО/TPD/Alq3/cathode с монометаллическими (Al, Sm, Tm, Yb) и биметаллическими (Eu:Yb, Tm:Yb) катодами. Установлено, что наилучшими рабочими параметрами среди устройств с монометаллическими катодами (включая стандартный Al) обладает ОСИД с Tm электродом. Имеющий самое низкое значение работы выхода электрона Yb катод несколько ему уступает (таблица 5.1).

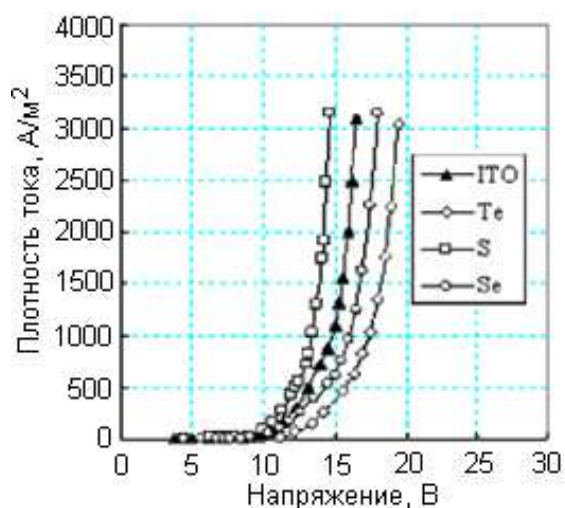
Таблица 5.1 – Рабочие характеристики ОСИД ИТО/TPD/Alq3/M. (M=Al, Sm, Tm, Yb, Eu:Yb, Tm:Yb)

Катод	Al	Sm	Tm	Yb	Eu:Yb	Tm:Yb
Напряжение включения, В	5,8	5,7	4,5	4,8	4,6	3,8
Рабочее напряжение при яркости 150 кд/м <sup>2</sup> , В	10,2	9	5,4	6,2	5,5	4,5
Эффективность по мощности, лм/Вт	0,11	0,14	2,9	1,37	2,17	3,48
Работа выхода электрона, эВ	4,3	2,7	3,12	2,6	2,5 (Eu)	2,6 (Yb)

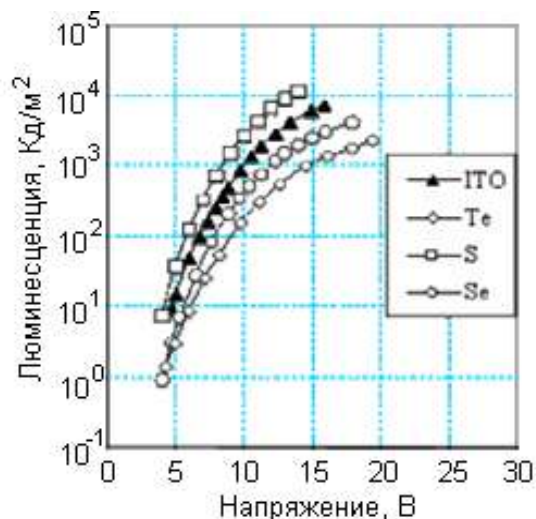
Исследование длительности функционирования ОСИД-устройств с монометаллическими катодами в условиях окружающей среды при заданной начальной яркости 200 кд/м<sup>2</sup> выявило значительное превосходство лантаноидов над алюминием.

### 5.2.2 Модификация поверхности анода ИТО халькогенами

Известна модификация поверхности ИТО ультратонким (2 нм) слоем халькогенов (S, Se, Te) методом испарения и осаждения из газовой фазы. Проведено сравнение вольт-амперных и вольт-яркостных характеристик ОСИД-устройств конфигурации anode/TPD/Alq3/Yb, где анодом служили как обработанные халькогенами подложки ИТО, так и немодифицированное ИТО.



а)



б)

Рисунок 5.8 – Вольт-амперные (а) и вольт-яркостные (б) характеристики ОСИД конфигурации ИТО/Х/TPD/Alq3/Yb. X = S, Se, Te

Как видно из представленных зависимостей (рисунок 5.8), только модификация анода серой привела к увеличению эффективности устройства, в то время как слои теллура и селена понизили максимальную яркость и повысили рабочее напряжение и напряжение включения. В отличие от Se и Te, обладающих выраженными полупроводниковыми свойствами, сера является диэлектриком (таблица 5.2), поэтому причина увеличения эффективности дырочной инжекции, очевидно, та же, что и в случае других ультратонких диэлектрических слоев – понижение эффективного барьера для дырочной инжекции.

Таблица 5.2 – Работа выхода и ширина запрещенной зоны халькогенов

	$\phi$ , эВ	$\Delta E$ , эВ
S	-	2.8
Se	5.9	1.7
Te	4.8	0.36

Кроме возросшей яркости и эффективности по сравнению с устройством, содержащим немодифицированный анод, ОСИД ИТО/S/TPD/Alq3/Yb обладает и увеличенным временем функционирования.

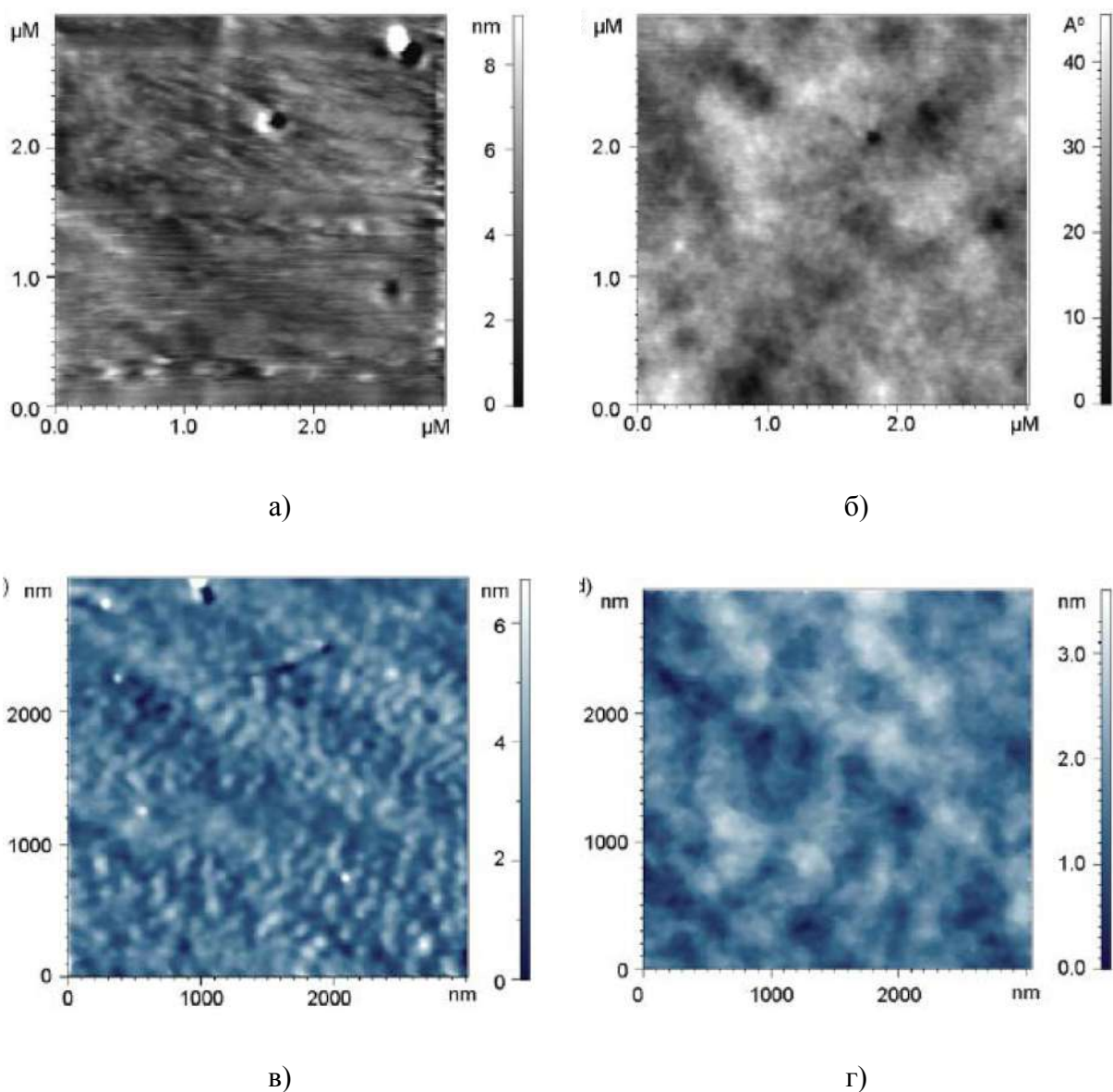


Рисунок 5.9 – AFM-изображения пленок TPD на поверхностях:

(а)ITO, (б)ITO+S, (в)ITO+Se, (г)ITO+Te

Такое повышение стабильности устройства может достигаться не только вследствие увеличения эффективности преобразования электрической энергии в световую, но и за счет увеличения адгезии слоя TPD к поверхности ITO. Как показывают AFM-снимки поверхности пленок TPD на чистом и модифицированном халькогенами ITO, более ровное распределение молекул органического материала по поверхности наблюдается при модификации всеми халькогенами (рисунок 5.9). Однако улучшение характеристик устройств наблюдается лишь в случае использования серы, что, как упоминалось выше, связано с ее диэлектрическими свойствами.

Полученные результаты по материалу катода являются важными, однако, физического толкования полученных результатов автором не приведено. Без объяснения

физических причин достижения неплохих результатов по ОСИД – диодам в диссертации Ильичев В.А.[5.2], трудно целенаправленно вести поиск столь экзотических материалов для катода, как использовал автор (Tm, Yb). Важнейшим результатом диссертационной работы надо считать результат по модификации поверхности анода из ИТО халькогенами, приводящее к существенному улучшению характеристик диодов в случае халькогенизации серой. Толкование свойств дано с позицией диэлектрических свойств покрытия в случае использования серы. На наш взгляд самое главное замечается в том, что процесс халькогенизации серой приводит к формированию микрорельефной поверхности на слое ИТО, что очень хорошо видно на рисунок 5.9 (б).

Проблемам материала катодов ОСИД посвящены многие работы, в которых, представлены результаты по использованию в качестве катодов Al, Mg, LiF/Al, Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al, обсуждается влияние слоев Mg и LiF как инжектирующего электроны электрода и использование этих слоев для покрытия ИТО в зависимости от толщины слоя Mg, когда роль катода выполняет ИТО.

### 5.2.3 Электролюминесцентные материалы для органических светоизлучающих структур

К строению рабочего вещества (электролюминесцентных материалов) ОСИД предъявляются следующие требования.

1. Оно должно обеспечивать возможность слияния электрона и дырки с образованием возбужденного состояния.

2. Это возбужденное состояние должно с большой вероятностью высветиться, т.е. его дезактивация должна осуществляться в результате излучательного процесса. Как правило, на практике требование высокой вероятности высвечивания равносильно требованию высокого квантового выхода фотолюминесценции вещества. Поэтому в качестве светоизлучающих веществ для ОСИД обычно используют соединения с высоким квантовым выходом фотолюминесценции в кристаллическом состоянии, поскольку все процессы в ОСИД протекают в твердой фазе.

3. Рабочее вещество должно обладать хорошей электронной и дырочной проводимостью, поскольку подвижность обоих зарядовых потоков в светоизлучаемом слое оказывает большое влияние на квантовую эффективность ОСИД. Для балансировки электронного и дырочного токов в светоизлучаемом слое вводятся дополнительные HTL-

и ETL-слои, повышающие соответственно дырочную и электронную проводимость рабочего вещества.

4. Одним из основных требований, предъявляемых к органическому полупроводнику в ОСИД, является соответствие работ выхода электродов положениям НОМО и LUMO светоизлучающего вещества активного слоя.

Однако “подстроиться” электролюминесцентному соединению к электродам или подобрать их с работами выхода, соответствующими положениям НОМО и LUMO рабочего вещества, достаточно трудно. Эта проблема решается путем введения дополнительных слоев (HTL и ETL) в органические светодиоды. Они облегчают инжекцию носителей зарядов в случае большого энергетического барьера между электродом и активным слоем, а также препятствуют сквозному протеканию электронов и дырок сквозь ОСИД, что способствует улучшению баланса между электронным и дырочным токами и тем самым – повышению квантовой эффективности светодиодов. Дополнительный слой с дырочной проводимостью (HTL) помещают между анодом и светоизлучающим веществом. Для HTL выбирают соединение с НОМО, занимающее промежуточное (лучше всего среднее) положение между величиной работы выхода анода и глубиной НОМО электролюминесцентного вещества. Положение LUMO у вещества HTL должно быть высоким, подвижность дырок большой, в то время как подвижность электронов должна быть незначительной. Кроме того, желательно, чтобы расстояние между НОМО и LUMO было больше, чем у вещества активного слоя, что предотвращает перенос энергии возбуждения от рабочего соединения на вещество HTL. Электропроводящий слой (ETL) помещают между светоизлучающим веществом и катодом, и он обладает относительно электронов свойствами, аналогичными свойствам HTL относительно дырок.

Таким образом, одним из основных элементов ОСИД является светоизлучающее (электролюминесцентное) соединение, к спектральным, рабочим и эксплуатационным характеристикам которого предъявляются весьма строгие требования. В связи с этим молекулярный дизайн и синтез высокоэффективных электролюминесцентных соединений для ОСИД остается одной из актуальных задач, решение которой позволит внедрить в широкую практическую деятельность органические светоизлучающие диоды и разнообразные изделия на их основе.

Электролюминесцентные сопряженные полимеры такие как, полиацетилен поли(*n*-фенилен) (PPP); поли (*n*-фениленвинилен) (PPV); поли ((2-метокси-5-2'-этилгексилокси) - 1,4-фениленвинилен) (МЕН-PPV) - содержат в основной цепи гетероциклические

соединения, а в боковой – полиэфирные заместители. Такая модификация полимеров позволяет:

- существенно улучшить их спектральные характеристики и механические свойства;
- наличие у этих электролюминесцентных сопряженных полимеров в боковой цепи алкильных и полиэфирных заместителей существенно повышает их растворимость в органических средах, что позволяет при производстве ОСИД на их основе использовать современные высокопроизводительные печатные технологии.

Однако используемые в настоящее время электролюминесцентные полимеры имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их широкое использование при производстве ОСИД:

- склонны к окислению, неустойчивы к воздействию кислорода и влаги воздуха;
- в ряде случаев обладают низкой термической и фотохимической стабильностью;
- имеют широкую полосу в спектре люминесценции (до 200 нм и выше);
- при синтезе электролюминесцентных полимеров трудно контролировать их степень полимеризации, от которой зависят спектральные и механические свойства светоизлучающего материала;
- они обладают низкой квантовой эффективностью люминесценции, которая не может превышать 25%.

Использование координационных соединений *s*-, *p*- и *d*-элементов также позволяет решить некоторые из этих проблем.

Поскольку люминесценция металлокомплексов, за исключением некоторых комплексов редкоземельных элементов (РЗЭ), так же как и в случае сопряженных полимеров, обусловлена флуоресценцией органического лиганда, поэтому их спектры излучения также содержат широкий пик, а эффективность люминесценции тоже ограничена 25%.

Перспективным классом веществ для использования в качестве светоизлучающих материалов в ОСИД являются координационные соединения редкоземельных элементов (РЗЭ).

Их принципиальным отличием от рассмотренных выше люминофоров является то, что в них люминесцирует ион редкоземельного элемента, а не органический лиганд, что имеет место в флуоресцентных металлокомплексах. Один из механизмов люминесценции

координационных соединений РЗЭ состоит в поглощении света органическим лигандом и передаче энергии возбуждения через свой триплетный уровень иону лантанида, который излучает её в виде электромагнитной волны.

Следовательно, при выборе подходящей пары “лантанид – лиганд” должны быть рассмотрены два важных фактора.

1. Энергия резонансного уровня лантанида должна быть близкой, но несколько ниже, чем энергия триплетного уровня лиганда, чтобы вероятность перехода с триплетного уровня лиганда на резонансный уровень РЗЭ была высока.

2. Вероятность безызлучательной дезактивации резонансного уровня лантанида должна быть мала по сравнению с вероятностью его излучательного перехода.

На основании этих факторов для использования в ОСИД может быть выбрана следующая группа ионов лантанидов. Эта группа состоит из катионов самария, европия, тербия и диспрозия ( $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ). Комплексы этих ионов обнаруживают сильную ионную флуоресценцию со слабой молекулярной флуоресценцией и фосфоресценцией. Эти характеристики указывают на:

1. эффективный перенос энергии с триплетного уровня органического лиганда на резонансный уровень иона лантанида;

2. менее выраженную безызлучательную дезактивацию.

Обычно для каждого иона РЗЭ один или два подуровня основного состояния являются предпочтительнее всех других. Таким образом, в спектре излучения существует обычно полоса, которая значительно превышает все другие по интенсивности, а так как полосы в спектрах РЗЭ очень узкие (они слабо подвержены уширению по причине экранирования  $4f$ -оболочки внешними электронами), то получаемый цвет излучения близок к монохроматическому.

Другим важным преимуществом комплексов лантанидов является принципиальная достижимость квантового выхода, равного 100 %. Действительно, обычно принципиальным ограничением на этом пути является переход молекулы в триплетное состояние, в котором всегда высока вероятность безызлучательной релаксации, в то время как в комплексах РЗЭ переход в триплетное состояние необходим, поскольку через него осуществляется перенос энергии возбуждения на ион лантанида.

Задача создания полноцветных ОСИД в настоящее время в основном решается следующими двумя путями.

1. В ОСИД вводят три хромофора, каждый из которых производит один основной цвет, а именно красный, зеленый и синий, которые при наложении друг на друга

воспроизводят всю оставшуюся цветовую гамму. Однако в этом случае при конструировании подобных светодиодов возникает ряд серьезных проблем.

Во-первых, приходится трижды проводить напыление светоизлучающих слоев. При этом к каждому из этих слоев предъявляются очень высокие требования. Они должны иметь равномерную толщину и очень гладкую поверхность. В технологии производства монохромных ОСИД это осуществляется с помощью специальных дозаторов, которые прекрасно выполняют свои функции при получении одноцветных светодиодов, но поскольку при производстве полноцветных ОСИД тонкое регулирование процесса напыления с помощью таких дозаторов должно быть выполнено трижды, то возникают серьезные технические трудности и получение полноцветных светодиодов становится достаточно дорогим. Этот сложный технологический процесс также ограничивает и размер дисплея, который может быть сделан по данной технологии. Кроме того, в настоящее время красных и зеленых хромофоров с высоким сроком службы имеется достаточно, а материалы, отвечающие за синие свечения, дефицитны, и они менее долговечны. Это приводит к тому, что в процессе эксплуатации таких ОСИД из-за неравномерного старения его светоизлучающих слоев происходит искажение цветопередачи. В настоящее время основные усилия химиков направлены на разработку эффективных и долговечных синих источников излучения.

2. Использование хромофора, который излучает по всей видимой области спектра, т.е. обладает белым свечением, а все остальные цвета получают из него с помощью светофильтров.

Такие хромофоры существуют (например, бензотиазолат цинка), но их немного, срок их работы существенно уступает хромофорам красного и зеленого свечения и, к сожалению, они не дают чисто белый цвет. Почти всегда в их излучении присутствуют различные оттенки другого цвета, поэтому как минимум два излучателя обычно требуется для реализации чисто белого свечения. В связи с этим получение флуоресцентных хромофоров белого свечения является одной из самых актуальных задач при производстве полноцветных органических светоизлучающих диодов.

Перспектива коммерческого использования ОСИД и электролюминесцентных устройств на их основе зависит от их квантовой люминесцентной эффективности, цветопередачи, яркости, мобильности переноса зарядов, термической и операционной (рабочей) стабильности и ряда других факторов. Поэтому одним из основных элементов ОСИД является светоизлучающее (электролюминесцентное) соединение, от которого в



большой степени зависят спектральные, рабочие и эксплуатационные характеристики органических светоизлучающих диодов и изделия на их основе.

Современное производство ОСИД прежде всего нуждается:

- в высокоэффективных электролюминесцентных соединениях, излучающих белый и синий цвета;
- в хорошо растворимых в органических средах светоизлучающих материалах, позволяющих использовать высокоэкономичные жидкофазные печатные нанотехнологии при получении нужных изделий из них;
- в гибридных электролюминесцентных соединениях, с помощью которых можно перейти от сложных в изготовлении и эксплуатации многослойных ОСИД к простым и надежным однослойным электролюминесцентным устройствам.

#### 5.2.4 Материалы для полимерных светоизлучающих диодов (PLED-materials)

Светоизлучающие диоды, использующие в технологии производства полимер органические материалы, имеют ряд преимуществ над традиционными неорганическими электролюминесцентными устройствами, а именно: низкое напряжение возбуждения, простое изготовление, широкий диапазон излучаемого света, а также способность использоваться в широкоформатных дисплеях. В частности, производству электролюминесцентных устройств с использованием полимеров способствует механическая и термическая стабильность полимеров.

В настоящее время известны и описаны в литературе светоизлучающие устройства на основе соединений поли(1,4-фениленвинилена) – PPV. Однако, светоизлучающие устройства на основе существующих PPV материалов могут иметь ряд недостатков, которые включают сложные многоступенчатые процессы производства, такие как процесс обработки веществ, при котором полимеризация происходит в самом устройстве, что может привести к дефектам в готовом устройстве. Такие дефекты могут привести к короткому сроку их службы. Одним из других недостатков таких полимеров является отсутствие соответствующих материалов, имеющих диапазон излучения света всей ширины видимого спектра, что необходимо для создания полноцветных дисплеев.

PLED (Polymer Light Emitting Diode) – полимерный светодиод представляет собой слоистую структуру, состоящую из: подложки (пластиковой, стеклянной (рисунок 5.10)); прозрачного анода, который при прохождении тока инжектирует дырки (ITO); слоев

органических материалов, один из которых проводит дырки (материал с дырочной проводимостью – hole injection layer), инжектируемые анодом, а второй – электроны (электрон-транспортный материал – light emitting polymer), инжектируемые катодом (в них происходит излучательная рекомбинация носителей заряда); катода (Ca и Al), инжектирующего электроны в излучающий слой при прохождении тока.

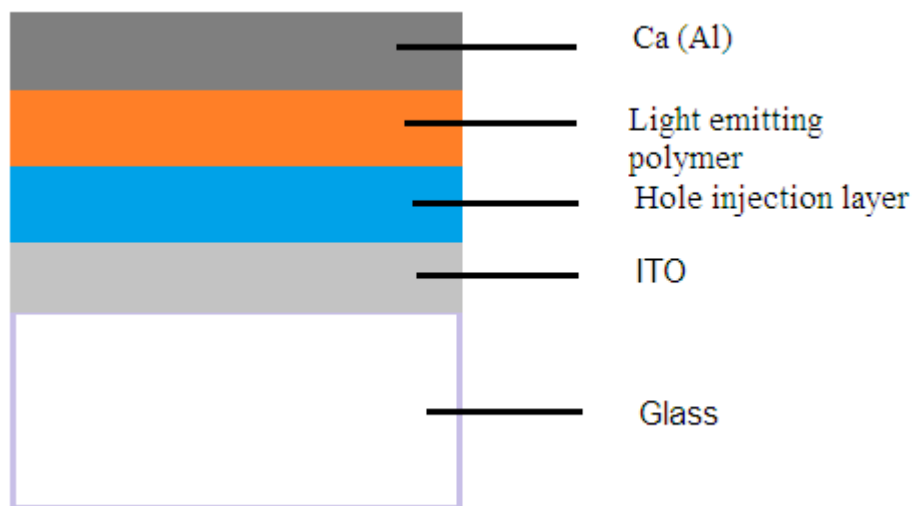


Рисунок 5.10 – Схема строения полимерного светодиода

В полимер органических светоизлучающих диодах электроны и дырки, инжектированные из электродов, мигрируют навстречу друг другу под действием электрического поля и могут с некоторой вероятностью встретиться на одном молекулярном центре. При этом возникает возбужденное молекулярное состояние с электроном на нижней свободной молекулярной орбитали (НСМО) и дыркой на верхней занятой молекулярной орбитали (ВЗМО), аналогичное тому, которое образуется при возбуждении фотолюминесценции квантом света. При излучательной рекомбинации электрон переходит с НСМО на ВЗМО с испусканием кванта света. Таким образом, в процессах электролюминесценции (ЭЛ) и фотолюминесценции (ФЛ) участвуют одни и те же квантовые уровни, что приводит к сходству спектров ЭЛ и спектров ФЛ молекул, составляющих PLED.

В некоторых светоизлучающих диодах взаимодействие молекул на поверхности раздела дырочно-транспортного и излучающего слоев приводит к образованию эксиплексного состояния. Эксиплекс – разновидность возбужденного комплекса, образованного между донорной и акцепторной молекулами, когда одна из них находится в возбужденном состоянии, а другая – в основном состоянии. В случае двухслойных PLED происходит взаимодействие молекулы излучающего слоя, содержащей электрон на

НСМО и молекулы дырочно-транспортного слоя, содержащей дырку на ВЗМО.

Важным параметром полимерного светодиода является срок службы [5.3]. Одной из причин изнашивания устройства считается аккумуляция электронных дыр в светоизлучающем слое [5.4-5.7]. Считается, что если избавиться от аккумуляции, то возможно сдержать изнашивание светоизлучающего диода. Также считается, что решающее значение в отношении того, легко ли электроны инжектируются со стороны анода во время таких периодов, имеет уровень НСМО. Если уровень НСМО высок, в течение тех периодов, в течение которых смещение подается в направлении, противоположном направлению во время эмиссии, то вероятно, что электроны легко инжектируются, и, соответственно, электронные дыры, аккумулярованные в светоиспускающем слое должны высвободиться. Если значение НСМО мало в течение этих периодов, электроны инжектируются с трудом, и электронные дыры, аккумулярованные в светоиспускающем слое, высвобождаются с трудом.

При значении НСМО 2.1 эВ полагается, что износ светоизлучающего слоя эффективно сдерживается. Такое значение обычно используется в промышленной области органических ЭЛ устройств, которое рассчитывается как значение, полученное вычитанием значения запрещенной зоны из значения ВЗМО, где ВЗМО является работой выхода, измеряемой фотоэлектронной спектроскопией в атмосфере, и значение запрещенной зоны является энергией в спектре ультрафиолетового поглощения [5.8-5.9].

Для дальнейшего усиления таких эффектов и уменьшения изнашивания, эффективно использование материала, имеющего превосходящие свойства переноса положительного заряда над свойством основного вещества как примеси, в комбинации с основой, с целью уменьшения аккумуляции носителя (заряда) в светоизлучающем слое. Также важно принять во внимание сопротивление примеси, т.к. она служит для переноса заряда, и предпочтительно использовать вещество с высокой термостойкостью. Для того чтобы уменьшить сохранение и аккумуляцию носителя в основном веществе, нежелательно чтобы оно испускало свет, и также нежелательно чтобы примесь сама испускала свет, так как примесь предназначена для переноса носителя.

Т.о. предпочтительно использовать отдельный светоизлучающий материал в соединении. В качестве такого светоизлучающего материала используют светоизлучающий материал, имеющий запрещенную зону меньше, чем запрещенная зона основного вещества, в качестве второй примеси, посредством этого подавить излучение основного вещества или вышеупомянутой примеси (первой примеси). В дальнейшем, вышеупомянутое основное вещество будет иногда называться основным веществом (А), вышеупомянутая первая примесь – примесью (В), и вторая примесь – примесью (С).

Вышеупомянутая предпочитаемая конструкция светоизлучающего слоя полимерного светоизлучающего диода используется в сочетании со слоем тонкой пленки с дырочной проводимостью, благодаря чему могут быть получены превосходные характеристики при активной работе и высоких температурах.

Полимерный светоизлучающий диод включает в себя, анодный слой, катодный слой, светоизлучающий слой между анодным и катодным слоями, слой тонкой пленки с дырочной проводимостью, находящийся между светоизлучающим слоем и анодным слоем. Слой тонкой пленки с дырочной проводимостью является слоем тонкой пленки в контакте со слоем анода. В случае конструкции, где слой тонкой пленки находится в контакте со слоем анода, он служит слоем с дырочной проводимостью, и в случае конструкции, где присутствуют слой с дырочной проводимостью и промежуточный слой анода находится в контакте со слоем анода, слой тонкой пленки служит промежуточным слоем анода.

В полимерном светоизлучающем диоде могут присутствовать также другие слои, кроме вышеупомянутых. Например, слой переноса электронов может находиться между светоизлучающим слоем и слоем катода, и промежуточный слой катода может присутствовать между слоем переноса электронов и слоем катода.

Слой с дырочной проводимостью кроме содержания полимерного соединения, может включать в себя низкомолекулярные органические соединения и комплексы. В случае, когда полимерное соединение является полимерным соединениям с дырочной проводимостью, слой с дырочной проводимостью может быть сделан исключительно из полимерного соединения с дырочной проводимостью. В таком случае, верхний предел содержания соединения с дырочной проводимостью в слое с дырочной проводимостью равен 100% (т.е. слой целиком). В случае, когда полимерное соединение является соединением, не имеющим или имеющим свойство дырочной проводимости в малой степени, слой с дырочной проводимостью содержит данное полимерное соединение и низкомолекулярное соединение с дырочной проводимостью.

Содержание полимерного соединения в таком слое с дырочной проводимостью должно равняться примерно 25%. Даже в случае, когда полимерное соединение является соединением с дырочной проводимостью, слой с дырочной проводимостью может содержать низкомолекулярное соединение с дырочной проводимостью, отличающееся от полимерного соединения. В случае, когда полимерное соединение является соединением с дырочной проводимостью не имеющим или имеющим свойства дырочной проводимости в малой степени, полимерное соединение является соединением с дырочной проводимостью и может содержать от 10 до 75 масс%, низкомолекулярного соединения.

Если необходимо достигнуть значения НСМО слоя с дырочной проводимостью равное 2.1 эВ, где верхний предел не ограничен, но равен около 3.5 эВ в случае, когда слой содержит материалы, которые уже доступны в настоящее время, значение НСМО слоя с дырочной проводимостью может по-разному изменяться подбором вышеупомянутого полимерного соединения или подбором соответствующих типов сочетания соединения с дырочной проводимостью и низкомолекулярного соединения.

Толщина слоя с дырочной проводимостью находится в пределах от 1 до 200 нм. В случае, когда слой с дырочной проводимостью является промежуточным слоем анода, его толщина находится в пределах от 1 до 40 нм, и в случае, когда слой с дырочной проводимостью является слоем с дырочной проводимостью, его толщина находится в пределах от 20 до 200 нм.

Вышеупомянутое полимерное соединение или низкомолекулярное соединение с дырочной проводимостью в слое с дырочной проводимостью является соединением, имеющим высокую термостойкость, и является соединением, имеющим высокую температуру стеклования. Предпочтительно использовать соединение, которое имеет температуру стеклования около 100-130 °С. Использование соединения, имеющего высокую термостойкость возможно получить полимерный светоизлучающий диод, имеющий высокую термостойкость [5.10-5.12].

Соединение примеси (С) – соединение, имеющее запрещенную зону, которая является меньшей, чем запрещенная зона основы и является люминесцентным красителем, который испускает свет, когда сочетается с вышеупомянутым соединением основы (А) и соединением примеси (В). Соединение примеси (С) особенно не ограничено, пока это соединение имеет такие характеристики, но это выбрано из соединений, известных как соединения примесей для светоизлучающих слоев полимерных светоизлучающих диодов [5.13-5.16].

При изготовлении светоизлучающего слоя предпочтительными являются соединения, включающие соединение основы (А), соединение примеси (В) и соединение примеси (С), и в светоизлучающем слое, эти соединения обычно однородно смешаны. Светоизлучающий слой может содержать соединения отличные от этих соединений, но это обычно делается отдельно от этих соединений (при условии, что каждое соединение может содержать два или больше компонента). В этом светоизлучающем слое, количество соединений примеси (В) - предпочтительно от 3 до 50 масс%, основанной на общем количестве соединений основы (А), соединения примеси (В) и соединения примеси (С). Самое предпочтительное количество соединения примеси (В) - от 10 до 40 масс%. В этом светоизлучающем слое, количество соединений примеси (С) - предпочтительно от 0.001

до 40 масс%.

Светоизлучающий слой, включающий в себя соединение основы (А), соединение примеси (В) и соединение примеси (С) может быть сформирован из смеси, имеющей эти соединения, предварительно смешанные, или может быть сформирован, смешиванием этих соединений во время формирования светоизлучающего слоя. Например, в случае, когда светоизлучающий слой должен быть сформирован методом центрифугирования, светоизлучающий слой может быть сформирован при использовании раствора, содержащего соединения основы (А), соединения примеси (В) и соединения примеси (С). Например, в случае, где светоизлучающий слой сформирован вакуумным осаждением, светоизлучающий слой, включающий эти соединения, может быть сформирован при сублимации соединения основы (А), соединения примеси (В) и соединения примеси (С), соответственно, из трех лодочек, содержащих соответствующие соединения, или светоизлучающий слой может быть сформирован, при сублимировании этих соединений из одной лодочки, содержащей смесь этих соединений. Также возможно сформировать светоизлучающий слой из смеси двух соединений среди этих трех соединений, и остающегося соединения.

### 5.2.5 Печатные технологии изготовления ОСИД

Технология ОСИД (OLED (Organic Light Emitting Diode)) начала своё развитие с публикации двумя учёными из исследовательской лаборатории Eastman Kodak статьи об органических люминофорах в 1987 году. Позже в 1989 году в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета были получены органические полимерные люминофоры. С этого времени начали независимо развиваться два направления OLED: SMOLED (микромолекулярное) и POLED (полимерное). Ключевые параметры, определяющие оптические



Рисунок 5.11 – ОСИД дисплей

свойства ОСИД экранов – долговечность и эффективность светоотдачи. В настоящее время обе технологии достигли определённых успехов в совершенствовании этих параметров.

Таблица 5.2– Сравнительные характеристики POLED и SMOLED органических экранов

Цвет	POLED		SMOLED	
	Эффективность Кд/А	Долговечность, часы (яркость 1500 Кд/м <sup>2</sup> )	Эффективность Кд/А	Долговечность, часы (яркость 1500 Кд/м <sup>2</sup> )
Красный	1-2	>20000	4-5	>40000
Зелёный	8-10	15000	8-9	>40000
Синий	4	3000	3	10000
Жёлтый	8-10	>30000	8	>30000
Белый	2-4	5000	6-8	20000

Таким образом, технология ОСИД является бурно развивающимся и перспективным направлением в секторе дисплейных технологий.

Рост параметров яркости лабораторных образцов ОСИД – структур и срока службы иллюстрируется рисунком 5.12 [5.17] .

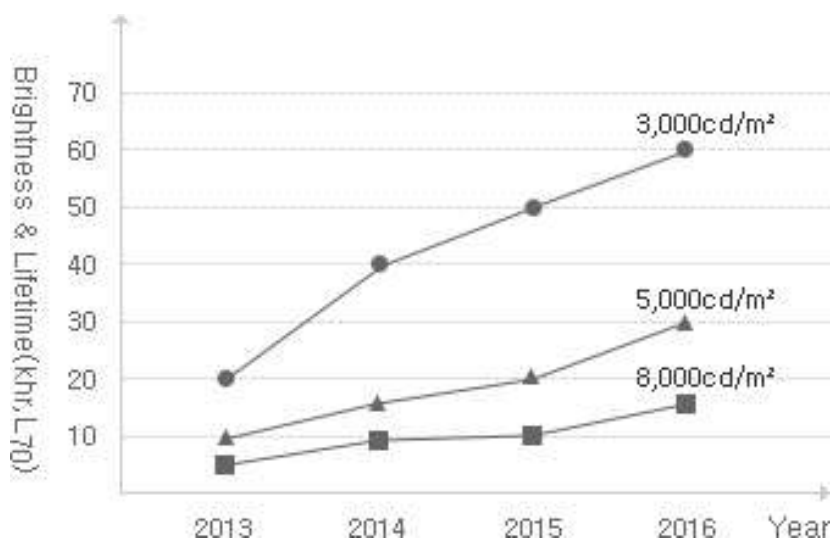


Рисунок 5.12 – Повышение эффективности и долговечности ОСИД устройств

Технологии изготовления ОСИД совершенствуются. Некоторые из разновидностей технологий, каждая из которых предоставляет оригинальные преимущества, приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Разновидности ОСИД технологий

Название технологии	Описание
SMOLED	Органические светодиоды на малых молекулах. Стартовая технология была разработана для придания свойства излучения света некоторым органическим веществам. В своё время она являлась основой большинства коммерческой продукции, но её недостатком является сложность и высокая стоимость производственных методов (например, вакуумного осаждения).
POLED/LEP/LEP-OLED/P-OLED/PLED/P-LED/P-Light/PolyLED	Полимерные органические светоизлучающие диоды. Бурно развивающаяся в настоящее время технология. Данная технология разработана после SMOLED.
TOLED	Прозрачные органические светодиоды. При производстве TOLED используются прозрачные контакты с целью создания экрана, который поддерживает различные варианты распространения



	света: только через анод, только через катод, через оба электрода.
SOLED	Сложенные органические светодиоды. При производстве SOLED используется новая архитектура организации пикселя, разработанная корпорацией Universal Display. Её отличительной её особенностью является расположение RGB подпикселей друг над другом, а не рядом друг с другом, что улучшает разрешающую способность экрана в три раза и повышает качество цветопередачи

Основное достоинство POLED заключается в применении более доступных простых и дешёвых технологий для их производства. Одна из самых привлекательных технологий нанесения слоя органического материала на подложку является технология струйной печати, разработанную компаниями Seiko Epson и CDT.

#### 5.2.6 Управление элементами ОСИД - дисплея

Цветное изображение представляет собой интегральную матрицу, представленную RGB элементами. Также у органического светодиода есть пороговое напряжение, ниже которого свечение отсутствует и значение которого зависит от типа органического материала. Для адекватного управления яркостью каждого пикселя ОСИД экрана требуется дозировать ток. Это можно сделать двумя способами. В первом при выборке строки используется фиксированное время для активной подачи тока, а на выходе драйвера столбца используется программируемый видеосигналом генератор тока. Во втором методе применяется генератор тока фиксированного максимального значения и используется устройство для модуляции этого тока. Первый способ обеспечивает более щадящие режимы для возбуждения светодиода, поскольку регулируется величина самого тока, но этот способ более дорогой в реализации и более капризный в работе. Второй способ более простой и надёжный, однако, в нём приходится использовать максимальные амплитудные токовые значения. Перегрузка по току приводит к стрессу органической структуры и к уменьшению срока службы дисплея.

В системах с пассивной адресацией каждая строка и каждый столбец дисплея имеет собственный драйвер, и для создания изображения выполняется быстрое сканирование с включением и выключением необходимых пикселей. В связи с возрастающими требованиями по увеличению яркости пикселей и размеров дисплеев данный метод становится затруднительным, поскольку через линии управления необходимо пропускать

повышенные токи. Кроме того при включении светодиода в линии управления протекает максимальный ток, что предъявляет повышенные требования по сечению проводников этих линий. Как следствие экраны с пассивной адресацией используются при производстве недорогих и небольших СОИ.

Экраны с активной матрицей решают проблему эффективной адресации каждого пикселя за счёт интегрирования тонкоплёночного транзистора (ТФТ) последовательно с каждым пикселем. Задачей этого транзистора является управление током через светодиод, а, следовательно, и яркостью каждого пикселя. В данном случае через линии управления могут протекать и пониженные токи, если требуется снижение яркости пикселя, поскольку величина тока задаётся программируемым ТФТ драйвером. Таким образом, сечение проводников строк и столбцов в данном случае может быть меньше и регулировочный транзистор может длительно удерживать установленную величину тока вплоть до получения следующего управляющего сигнала.

В современных драйверах ОСИД экранов кроме функции управления развёрткой по строкам и столбцам интегрированы и некоторые функции графического контроллера. Благодаря этому имеется возможность построения примитивных графических объектов, таких как отрезок прямой, прямоугольная область, круг. С помощью команд можно производить аппаратный скроллинг, стирание, перенос и копирование объектов на экране. Поддерживается также формирование курсоров нескольких типов. В большинстве драйверов-контроллеров имеется встроенный DC/DC-конвертор для формирования напряжений питания выходных каскадов схем управления строками и столбцами ОСИД. У драйверов-контроллеров, предназначенных для использования в цветных ОСИД дисплеях сотовых телефонов, имеется интерфейс для встроенной камеры. Видеосигнал изображения с камеры поступает непосредственно на ОСИД дисплей. Для предотвращения «прожигания» экрана в современных контроллерах-драйверах уже заложена функция скрин-сейвера. Программно можно выбрать режим этой функции, реализуемой посредством управляемой миграции рабочего изображения в поле всего экрана в пределах нескольких пикселей. Период смещения картинка составляет несколько минут, поэтому действие скрин-сейвера практически незаметно для глаз.

На сегодняшний день ни одна корпорация не выпускает серийных моделей полноцветных широкоформатных ОСИД дисплеев, активно ведутся поиски новых решений для совершенствования и удешевления технологии. За последние годы удалось достичь несомненного прогресса в области технологии ОСИД экранов. Расширяется рынок, растёт объём продаж изделий с ОСИД экранами. ОСИД технология впитывает не

только все достоинства предшественников (например, обзорные характеристики ЭЛТ дисплеев, безопасность ЖК дисплеев), но и наследует технологические наработки (например, активная матрица на TFT транзисторах), да ещё и порождает новые качества дисплеев, такие как послойное составление полноцветных пикселей, экономичность, гибкость, двухсторонний обзор и т.д. Это позволяет производить оригинальные отображающие устройства, например, дисплеи на поверхности автомобильного стекла, дисплеи-наклейки, рулонные дисплеи.

### **5.3 Технология изготовления ОСИД методом принтерной печати**

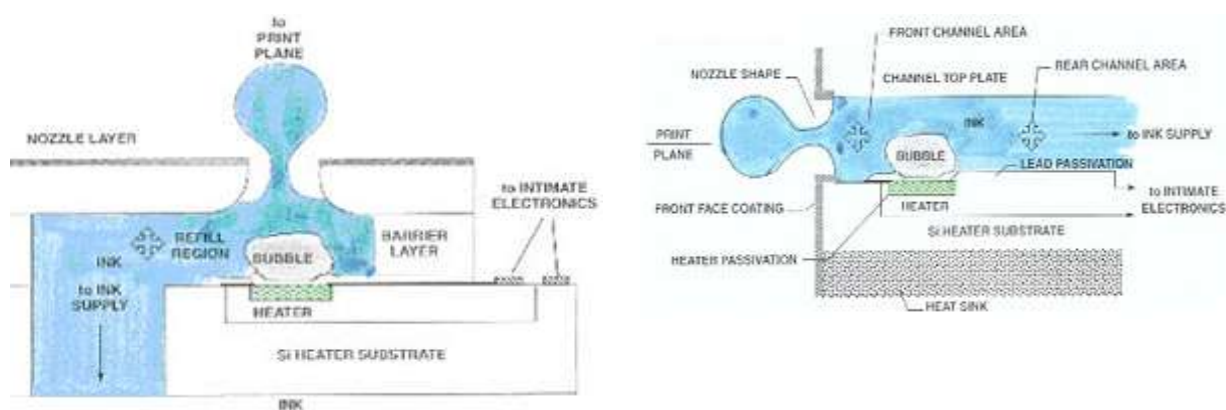
Все современные методы струйной печати построены по сходному принципу. Печатающая головка содержит в себе определенное количество микроскопических камер для чернил, каждая из которых соединена с собственной форсункой и одновременно с основным резервуаром чернил (картриджем). Сам процесс печати происходит достаточно просто: в требуемой камере создается избыточное давление, выталкивающее чернила через форсунку наружу, после чего камера заполняется новой порцией чернил, затем процедура повторяется вновь и вновь. Каждый цикл приводит к образованию точки на поверхности, соответственно, тысячи и тысячи таких точек формируют заветное изображение. Собственно, различие в технологиях струйной печати в первую очередь заключается в способе создания избыточного давления и в способе подкачки в камеру следующей дозы чернил.

Наиболее распространенными методами струйной печати являются термальный, пузырьковый и пьезоэлектрический.

Гиганты производства струйных принтеров, Hewlett-Packard Co, Canon Ink, Lexmark International, Ink, Seiko, Epson, Canon, используют разные технологии печати. Первые три производителя, из выше перечисленных, используют так называемый термоструйный метод печати. Термические печатающие головки таких принтеров, работают примерно по одному и тому же принципу: около сопла печатающей головки внизу чернильного канала находится нагреватель-резистор. На резистор подаются короткие электрические импульсы, нагревая его до температуры 400-600 °С, при этом чернила мгновенно нагреваются до температуры кипения. Процесс перехода чернил из жидкого состояния в парообразное создает давление, заставляя каплю вырываться из сопла. Фирмы HP и Lexmark используют именно эту технологию чернильной струи (ink jet).

Специалисты из Canon, разработали свою уникальную так называемую пузырьковую систему (bubble jet). Отличия этой системы заключается в том, что нагревательный элемент находится за пределами чернильной трубки. Удлиненный путь выброса чернил в этом варианте приводит к менее точному повторению выброса, но из-за более простой конструкции и меньшей цене производства, она популярна до сих пор.

Термальный и пузырьковый методы печати имеют несколько отличий от пьезоэлектрической струйной печати. В первую очередь, нагревательная система и по размеру меньше, и намного дешевле. Однако постоянные воздействия высоких температур не самым лучшим образом сказываются на сроке службы печатающей головки: оказывается, что она может продержаться немногим дольше нескольких картриджей.



а)

б)

Рисунок 5.13 – Термическая печатающая головка Ink Jet (HP, Lexmark) (а);  
пузырьковая система Bubble Jet (Canon, Xerox) (б)

Хотя на выручку приходит тот факт, что ее себестоимость настолько мала, что печатающую головку можно просто встроить в картридж и выкидывать вместе с ним по окончании чернил.

Компания Epson предложила изготовить микропьеzoпринтерная головку на основе пьезотехнологии (рисунок 5.14). Созданная на базе электромеханического устройства и доведена до коммерческой готовности компанией Epson Микропьеzoпринтерная головка использует свойство пьезокристаллов деформироваться под действием электрического тока. Это физическое свойство позволяет использовать некоторые материалы для создания миниатюрного "чернильного насоса". При этом размер капли будет определяется физическими характеристиками эжекционной камеры (firing chamber) и давлением, создаваемым в этой камере за счет деформации пьезокристалла.

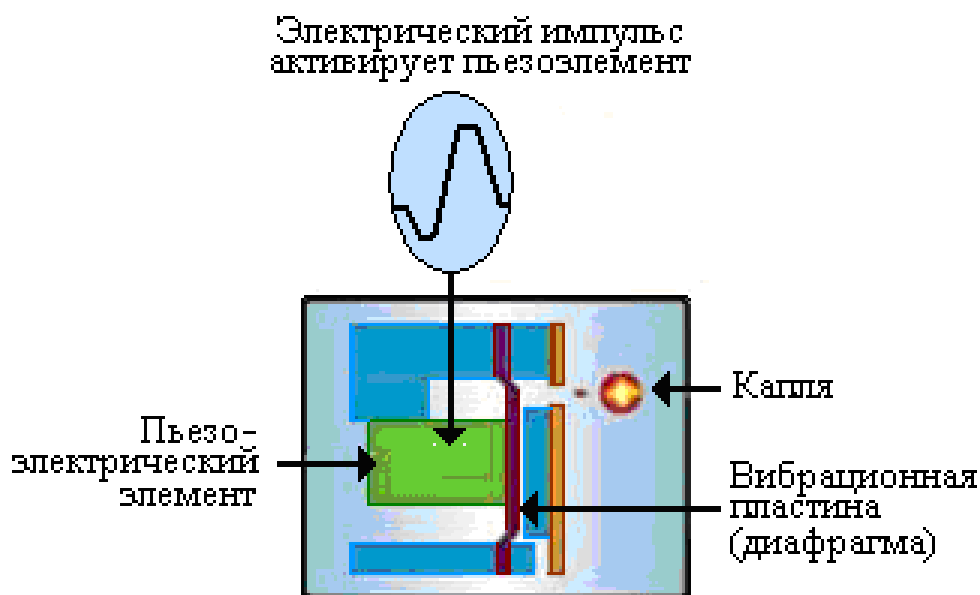


Рисунок 5.14 – Микропьезопринтерная головка;  
процесс активации пьезоэлемента

Пьезотехнология отличается высокой надежностью, что очень важно, потому что печатающая головка, по экономическим причинам, не может быть частью сменного картриджа с чернилами, как в термических системах, а обязательно должна быть жестко соединена с принтером и на нее также должны распространяться гарантийные обязательства.

Привлекательность пьезоэлектрической технологии обусловлена отсутствием нагрева органических «чернил» в пьезоэлектрической печатающей головке.

При термопечати, происходит нагрев чернил до 400 - 500 °С, в то время как температура плавления органолюминофоров составляет 250-300 °С).

Модуляция, т. е. изменение размера капли, осуществляется путем изменения величины тока, протекающего через эжекционный механизм. Частота выброса капли чернил под действием пьезоэффекта зависит от потенциальной частоты электрических импульсов, которая, в свою очередь, определяется временем возвращения камеры в "спокойное" состояние, когда она заполнена чернилами и готова к следующему рабочему циклу.

Преимуществом пьезоэлектрических головок является возможность изменения размеров капли чернил (до 6-и размеров), для сравнения, современные струйно-пузырьковые принтеры печатают каплями трех-четырёх размеров.

Число горизонтальных позиций, так называемое число капель на дюйм (dpi), является функцией от частоты, с которой выбрасываются капли, и скорости, с которой

печатающая головка перемещается по горизонтальной оси. Современные струйные принтеры при минимальном объеме капли 2 пл (размер точки 25 мкм) имеют разрешение печати 1440 dpi.

Основное преимущество пьезоэлектрического метода - более высокое качество печати. Качество печати очень сильно зависит от качества наносимых точек. Точки могут быть одинаковыми или разными по размеру, правильной круглой формы или неровными, с более или менее равномерным распределением чернил от центра точки к краям, а в худшем случае вокруг наносимой точки образуется несколько более мелких "спутников".

Если сравнить паспортные характеристики современных струйных принтеров и тех, которые предлагались 5-6 лет назад, то окажется, что разрешение печати возросло с 300 x 600 dpi (точек на дюйм) до 1200 x 4800 или даже 1440 x 5760 dpi.

Капля чернил, попавшая на бумагу, расплывается и образует точку, диаметр которой зависит от размера капли. Минимальный объем капли, достигаемый в современных принтерах Canon и Epson, составляет 2 пиколитра (пл). Объем самых крупных капель достигает 60-80 пл. Зависимость размера точки от объема чернильной капли показана на рисунках 5.15 и 5.16.



Рисунок 5.15 – Объем капли и площадь точки

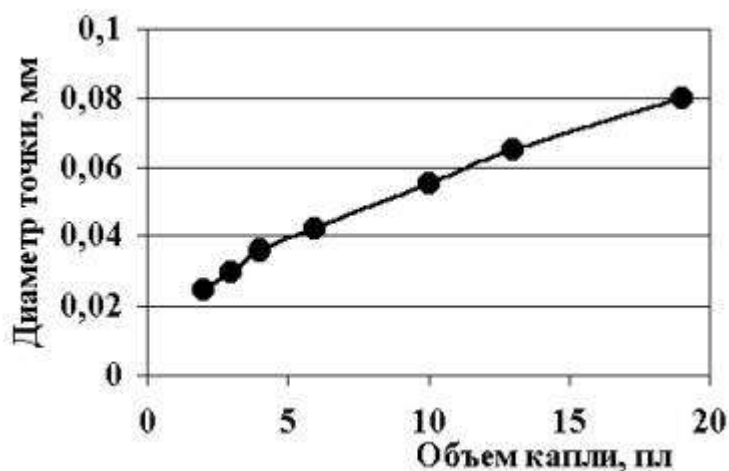


Рисунок 5.16 – Зависимость размера точки изображения от объема капли

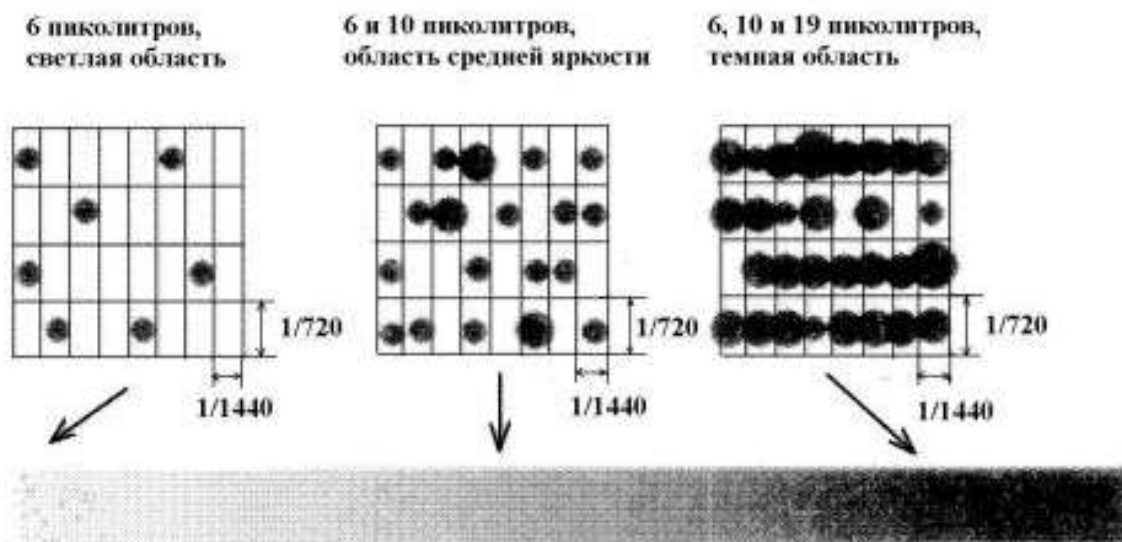


Рисунок 5.17 – Зависимость размера точки изображения от объема капли

Если принять минимальный объем капли за 2 пл, то размер точки составит 25 мкм, то есть 1/40 мм. Поскольку 1 дюйм содержит 25,4 мм, максимальное разрешение печати струйного принтера составит 1010 dpi, а не 1440 и не 5760. Современные струйно-пузырьковые принтеры печатают каплями трех-четырёх размеров. При печати по пьезоэлектрическому методу можно достичь даже шести.

С целью упрощения технологии и её удешевления нанесение металлических покрытий (анода и катода) можно проводить методом химического осаждения. Активные слои (полимерные) наносить методом пьезоэлектрической печати. Таким образом, технологическая схема базовых операций изготовления ОСИД-дисплеев имеет вид, показанный на (рисунок 5.18).

На предварительно очищенную подложку наносится слой ИТО (анод), затем проводится фотолитография и травление пленки анода.

Для формирования TFT-матрицы используются несколько вакуумных процессов. С помощью установок вакуумного напыления производится осаждение пленок a-Si, слоя подзатворного диэлектрика для транзисторов матрицы, а также напыление металлических шин проводников адресации.

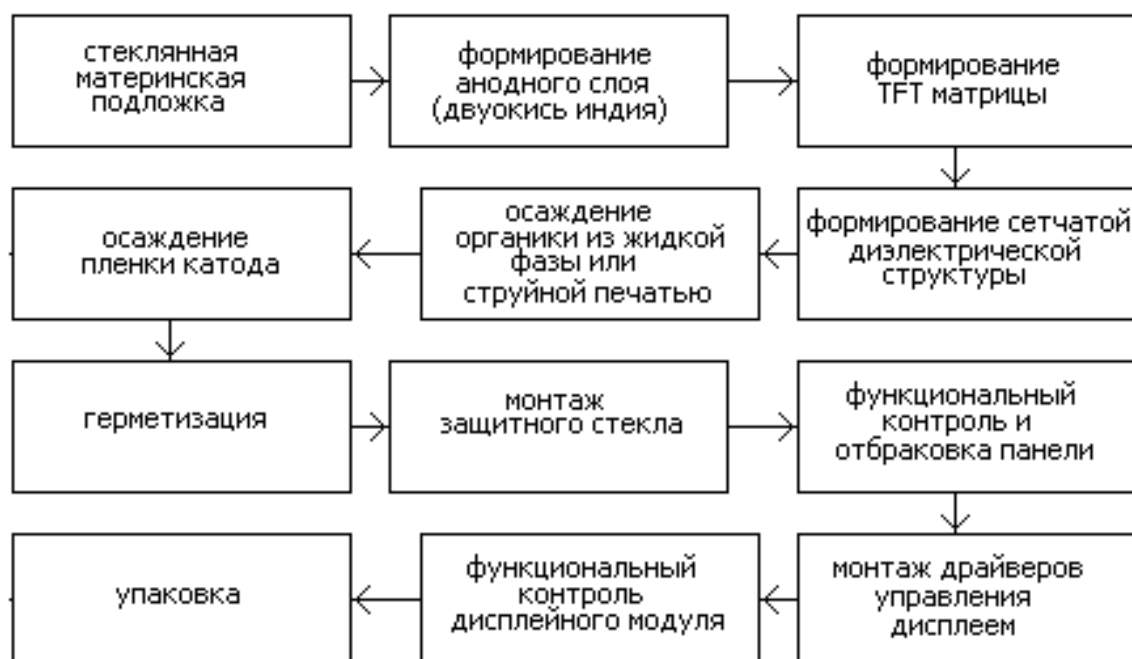


Рисунок 5.18 – Технологическая схема изготовления ОСИД -дисплея с активной матрицей и с отдельными цветными эмиттерами

Типовой процесс: осаждение металлической пленки для формирования шин строк (Ta, Al, MoTa), фотолитография, анодное распыление пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, осаждение нитрида кремния, фотолитография, осаждение пленки a-Si, фотолитография, осаждение пленок столбцовых и строчных электродов (Ti, Al), фотолитография, осаждение пленки электрода пикселя (ITO), фотолитография.

После формирования TFT матрицы, наносится пленка SiO<sub>2</sub>, необходимая для формирования сетки с апертурой равной площади субпикселя. Затем последовательно методом пьезоэлектрической струйной печати наносятся органические слои.

После чего, в соответствии с технологической схемой, осаждают катод, проводят герметизацию, монтаж защитного стекла, монтаж устройства управления, контрольные процедуры и упаковку.

#### Список литературы к разделу 5

- 5.1 Huang L.S., Tang C.W., Mason M.G. Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode // Applied Physics Letters. – 1997. – Volume 70.– P. 152-154.
- 5.2 Ильичев В.А. Комплексы редкоземельных металлов с гетероциклическими лигандами для органических светоизлучающих диодов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук // Нижний Новгород: НГУ. – 2011. – 178 с.
- 5.3 C. W. Tang and S. A. Van Slike. Organic electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. –



1987. – 51. – P. 913.

5.4 Ванников А. В., Гришина А. Д., Новиков С. В. Электронный транспорт и электролюминесценция в полимерных слоях. *Успехи химии*. – 1994. – 63, 107. – С.103-123.

5.5 Rothberg L, Lovinger J. Mater. Status of and prospects for organic electroluminescence // *Journal of Materials Res.* – 1996. – 11. – P. 3174-3187.

5.6 Mitschke U, Bauerle P. The electroluminescence of organic materials // *Journal of Materials Chem.* – 2000. – 10. – P. 1471-1507.

5.7 Braun D. Semiconducting polymer LEDs // *Materials Today*. – 2002. – Volume 5. – P. 32-39.

5.8 T. Sano, Y. Nishio, Y. Hamada, H. Takahashi, T. Uzuki, and K. Shibata, J. Design of conjugated molecular materials for optoelectronics // *Mater. Chem.* – 2000. – 10. – P.157-161.

5.9 Пивоваров А. П., Каплунов М. Г., Якущенко И. К., Белов М. Ю., Николаева Г. В., Ефимов О. Н. // *Изв. АН. Сер. хим.*, 2002, 65.

5.10 G. Giro, M. Cocchi, P. Di Marco, V. Fattori, P. Dembeck, and S. Rizzoli, *Synth. Met.*, 2001, 123, 529.

5.11 Burrows P., Shen Z., Bulovic V., McCarty D., Forrest S., Cronin J. Thompson M.E. Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light-emitting devices // *J. Appl. Phys.* – 1996. – V. 79. – P. 7991-8006.

5.12 Burrows P., Sapochak L., McCarty D., Forrest S., Thompson M. Metal ion dependent luminescence effects in metal tris-quinolate organic heterojunction light emitting devices // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – V. 64. – P. 2718-2720.

5.13 Tang C., VanSlyke S. Organic electroluminescent diodes // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – V. 51. – P. 913-915.

5.14 Hamada Y., Sano T., Fujita M., Fujii T., Nishio Y., Shibata K. Organic Electroluminescent Devices with 8-Hydroxyquinoline Derivative-Metal Complexes as an Emitter // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1993. – V. 32. – P.514-515.

5.15 Su W.M., Li W.L., Xin Q., Su Z.S., Chu B., Bi D.F., He H., Niu J.H. Effect of acceptor on efficiencies of exciplex-type organic light emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 91. – P. 043508.

5.16 Liao S.-H., Shiu J.-R., Liu S.-W., Yeh S.-J., Chen Y.-H., Chen C.-T., Chow T.J., Wu C.-I. Hydroxynaphthyridine-Derived Group III Metal Chelates: Wide Band Gap and Deep Blue Analogues of Green Alq3 (Tris(8-hydroxyquinolate) aluminum) and Their Versatile Applications for Organic Light-Emitting Diodes // *J. Am. Chem. Soc.* – 2009. – V. 131. – P. 763-777.

5.17 Эффективность осветительных панелей OLED достигла 100 люмен на ватт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/901776>, (дата обращения: 01.01.2017).

## 6. СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

### 6.1 Аналитический обзор светодиодных ламп

Обобщённо рынок источников света можно разделить на два сегмента: сегмент бытового освещения и сегмент коммерческого освещения. И если в коммерческом сегменте доминирующие позиции занимают светильники, то в сегменте бытового освещения, традиционно, основным источником света являются лампы: накаливания, компактные люминесцентные, галогенные, светодиодные.

Принято считать [6.1], что емкость российского рынка источников света составляет около 1 миллиарда ламп. В таблице 6.1 представлена структура российского рынка источников света по видам ламп в 2013 г.

Таблица 6.1. Структура российского рынка источников света по видам ламп в 2013 г.

<i>Виды ламп</i>	<i>Рыночная доля</i>	<i>Доля импорта</i>
<i>Лампы накаливания</i>	<i>50 %</i>	<i>45 %</i>
<i>Компактные люминесцентные лампы</i>	<i>26 %</i>	<i>100 %</i>
<i>Галогенные лампы</i>	<i>20 %</i>	<i>100 %</i>
<i>Светодиодные лампы</i>	<i>4 %</i>	<i>100 %</i>

В целом, как и в предыдущие годы, в сегменте бытового освещения доминирующие позиции занимают лампы накаливания. Доля этих ламп составляет 50%, однако, не смотря на это, по отношению к 2009 году их доля на рынке сократилась почти на треть. Основным фактором этого снижения стал неконтролируемый ввоз на территорию страны китайских компактных люминесцентных ламп сомнительного качества по достаточно низким ценам.

Что касается ламп накаливания, то после ликвидации в 2013 году Уфимского электролампового завода на территории России осталось всего три завода производящих эти лампы: Саранский электроламповый завод, Калашниковский электроламповый завод и Томский завод светотехники «Свет XXI века».

Всего по данным ассоциации «Российский свет» в 2013 году произведено 248,8 миллионов ламп накаливания, темп к 2012 году составил 72 процента.

Доля светодиодных ламп на российском рынке источников света пока еще мала, но

по оценке некоторых экспертов в 2013 год рост продаж светодиодных ламп в количественном эквиваленте составил 300%, а в денежном – 250%. Темпы светодиодного направления впечатляют, но пока это всего лишь не более 4% от рыночных возможностей.

Использование в сегменте бытового освещения энергетически неэффективных ламп по отношению к светодиодным лампам в первую очередь обусловлено такими факторами, как:

- отсутствие вынужденных государственных программ, направленных на вытеснение неэффективных технологий;
- недостаток или полное отсутствие информации о светодиодных источниках света;
- отсутствие полноценного производства светодиодных ламп на отечественных предприятиях;
- наличие огромного скептицизма у потребителей по поводу потенциальных преимуществ светодиодного освещения ввиду его большой стоимости;
- недостаток ресурсов у государства и потребителей.

Вместе с тем, ежегодное снижение розничных цен на светодиодные лампы и постоянное совершенствование конструкторских решений постепенно делают их вполне конкурентными, по отношению к компактным люминесцентным лампам, как по цене, так и по форме.

Во многом светодиодные лампы повторяют путь компактных люминесцентных ламп, когда после их массового выхода на рынок в 2006 году цены на них ежегодно снижались на 10-15%.

Как видно из таблицы 6.2, цены на светодиодные лампы вплотную приблизились к стоимости сопоставимых по световому потоку компактных люминесцентных ламп.

Таблица 6.2. Сравнительная стоимость ламп, применяемых в сегменте бытового освещения

№	Название	Мощность	Цена
1	Лампа накаливания	60 Вт	15 руб.
2	Китайская LED лампа образца 2012 г.	9 Вт	300 руб.
3	Китайская LED лампа образца 2014 г.	6 Вт	120 руб.
4	LED Навигатор	7 Вт	190 руб.

5	LED лампа Экономка	7 Вт	217 руб.
6	LED лампа ВВК	7 Вт	176 руб.
7	LED лампа Philips	7 Вт	240 руб.
8	LED лампа Старт	7 Вт	159 руб.
9	Компактная люминесцентная лампа Navigator	15 Вт	128 руб.

### 6.1.1 Лампы на единичных светоизлучающих диодах

Светодиодные лампы на российском рынке продаются почти под 50-тью торговыми марками, наиболее популярными из которых являются такие бренды как [6.2]:

- Ecola (КНР);
- Feron (КНР);
- Gauss (КНР);
- Jazzway (КНР);
- Kreonix (КНР);
- Navigator (КНР);
- Nichia (Япония);
- Cree Lighting (США);
- Seoul Semiconductor (Южная Корея);
- Sharp (Япония);
- Osram Opto (Германия);
- Edison (Тайвань).

Ассортимент светодиодных ламп, присутствующий на рынке под этими брендами, достаточно широк. В первую очередь это связано с быстрыми темпами технологического развития производства светоизлучающих диодов. В среднем раз в полгода происходит появление новых светодиодных ламп, которые по своим параметрам становятся ближе к параметрам ламп накаливания по световому потоку, а по цене к ценам компактных люминесцентных ламп с близким по значению световым потоком. Модели, фотографии и технические характеристики светодиодных ламп компаний, представленных выше, приведены в приложении А.

Представленные на рынке светодиодные лампы по своей форме стремятся быть максимально приближенными к формам лампы накаливания. Во многом это связано с устоявшимся мнением потребителей, за более чем 150-ти летнюю историю ламп накаливания, что это наиболее пригодная форма для источника света, но это лишь одна из

причин, вторая не менее важная связана с наличием на вторичном рынке различных светильников, сконструированных специально для установки в них ламп накаливания. Именно второй фактор до последнего времени являлся одним из сдерживающих факторов в продвижении светодиодных ламп, так как конструкция, состоящая из цоколя, массивного радиатора и колбы внутри которой находилась плата со светодиодами, давала возможность излучать свет в пределах 120-200 градусов. Установка таких ламп в обычный светильник, несмотря на все плюсы, связанные с энергосбережением, могла вызывать негативное восприятие у потребителей из-за отсутствия привычного для их восприятия «света вокруг», который излучает лампа накаливания. К тому же значительный вес радиатора мог вызвать деформацию хрупких частей люстр, рассчитанных на использование ламп накаливания.

### 6.1.2 Лампы с излучающими элементами ленточной структуры

Настоящим прорывом на рынке светодиодных ламп стало появление конструкции с использованием линейных излучающих элементов. Эти лампы визуально максимально приближены по форме и весу к лампам накаливания.

На рисунке 6.1 представлены фотографии макетов ламп с использованием линейных излучающих элементов.



Рисунок 6.1. Светодиодные лампы на линейных излучающих элементах




Эти лампы превратились в реальных конкурентов традиционным светодиодным лампам с пластиковой колбой и радиатором. Единственным сдерживающим фактором этих ламп в настоящее время является их стоимость, которая пока значительно выше стоимости традиционных светодиодных ламп. Но ситуация в данной области постоянно меняется и с наращиванием объемов серийного производства за счет использования модернизированных линий по производству ламп накаливания, их стоимость может снизиться на 20-40%.


Основным поставщиком на российский рынок дешевых китайских светодиодных аналогов в стеклянной колбе с излучающими элементами типа LED-filament является компания ASD (КНР). Базовый ассортимент ламп для замены традиционных ламп накаливания представлен лампами мощностью 6, 8 и 10 ватт, который рекомендуется для замены ламп накаливания мощностью 40, 60 и 75 ватт. Свои разработки также представляют фирмы Chinlighting (КНР), Ledora-led (КНР), LUCASLED (Греция), LumiLife (КНР), Sehon (КНР), ассортимент которых представлен в ниже.

### 6.1.3 Сравнительные характеристики ламп с излучающими элементами ленточной структуры

В таблице 6.3 представлена продукция компании ASD [6.3].





Таблица 6.3. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании ASD

Модель	Фото	Мощность, Вт	Цветовая температура	Габариты, мм <sup>2</sup>	Световой поток, лм	Срок службы, ч
LED- СВЕЧА НА ВЕТРУ- PREMIU M		5	3000К 4000К	35x121	450	30 000
LED- СВЕЧА- PREMIU M		5	3000К 4000К	35x105	450	30 000
LED- A60- PREMIU M		6	3000К 4000К	85x60	540	30 000
LED- A60-		8	3000К 4000К	85x60	720	30 000



PREMIUM						
LED-A60-PREMIUM		10	3000K 4000K	104x60	900	30 000
M						

В таблице 6.4 представлена продукция компании Chinlighting [6.4].

Таблица 6.4. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании Chinlighting





Модель	Фото	Мощность, Вт	Цветовая температура	Габариты, мм <sup>2</sup>	Световой поток, Лм	Световая отдача, лм/Вт	Срок службы, ч
LF-G45-FG		2/4	2500K-5500K	45x78	200/400	100	25 000
LF-ST45-FG		2/4	2200 K-5500K	45x88	220/450	110	25 000
LF-R80-FG		4	2200K-5500K	80x115	450	110	25 000
LF-T45-FG		2/4	2200-5500	45x108	200/400	100	25 000



LF- G125- FG		2/4/6	2200-5500	125x175	220/450/ 700	110	25 000
LED- A60- FLT		2/4/6	2700K, 3000K	60x106	200/420/ 650	120	25 000

В таблице 6.5 представлена продукция компании LEDORA [6.5].

Таблица .5. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании LEDORA

Модель	Фото	Мощность, Вт	Цветовая температура	Световой поток, лм	Срок службы, ч
LD- GG80		3,5	2000K-2800K; 2850K-3150K; 6000K-6500K;	400	25 000
LD- GT45		3,5	2000K-2800K; 2850K-3150K; 6000K-6500K;	400	25 000
LD- GB55		3,5	2000K-2800K; 2850K-3150K; 6000K-6500K;	400	25 000
LD- GST45		3,5	2000K-2800K; 2850K-3150K; 6000K-6500K;	400	25 000




В таблице 6.6 представлена продукция компании LUCASLED [6.6].

Таблица 6.6. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании LUCASLED

Модель	Фото	Мощность, Вт	Цветовая температура	Световой поток, Лм	Срок службы, ч
Led Bulb E27 4W WW Filament		4	2700K	320	30 000
Led Bulb E27 4W WW Filament Dimmable		4	2700K	320	30 000







В таблице 6.7 представлена продукция компании LUMILIFE [6.7].

Таблица 6.7. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании LUMILIFE

Модель	Фото	Мощно сть, Вт	Цветовая температура	Световой поток, лм	Световая отдача лм/Вт	Габариты, мм <sup>2</sup>	Срок службы, ч
LF- BF01- 4W		4	3000K	440	110	35x105	25 000
LF- BF02- 5W		5	3000K/4000 K/6000K	550	110	45x70	25 000
LF- BF03- 5W		6	3000K/4000 K/6000K	600	100	60x10	25 000

В таблице 6.8 представлена продукция компании SEHON-LED [6.6].

Таблица 6.8. Лампы на основе светодиодных линеек производства компании SEHON-LED

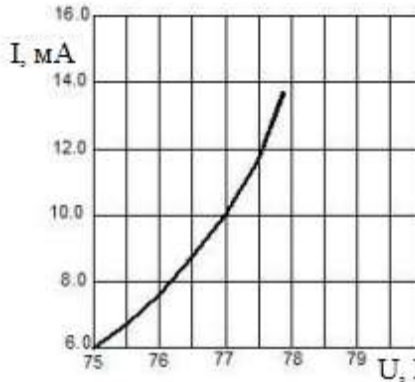
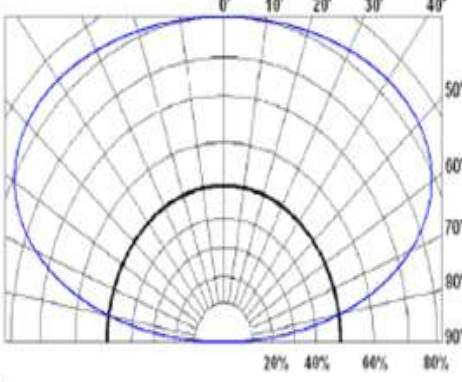
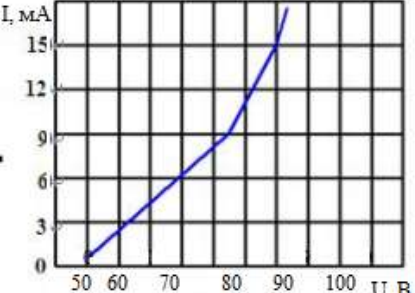
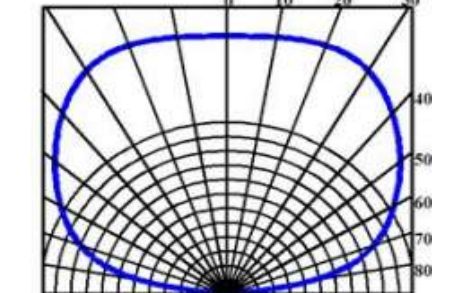
Модель	Фото	Мощность, Вт	Цветовая температура	Световой поток, лм	Габариты	Срок службы, ч
SH-ST64-4W		4	2700-6500K	470	64x145	25 000
SH-R63-4W		4	2700-6500K	470	63x102	25 000
SH-G125-4W		4	2700-6500K	470	125x175	25 000
SH-A60-4W		4	2700-6500K	470	60x105	25 000
SH-A60-6W		6	2700-6500K	750	60x105	25 000
SH-A60-8W		8	2700-6500K	950	60x115	25 000

Среди проанализированных светодиодных ламп было выявлено, что 90 % ламп имеют цилиндрический радиатор и полимерное основание цокольной части, тем самым увеличивая стоимость лампы и урезая угол освещения. Так же было понято, что средний срок службы светодиодных ламп равен 30 000 часов.

#### 6.1.4 Излучающие элементы ленточной структуры

Были выявлены и проанализированы 2 основных производителя элементов ленточной структуры (таблица 6.9) [6.8, 6.9].

Таблица 6.9. Производители элементов ленточной структуры

Наименование компании	Вольт-амперная характеристика	Кривая силы света
Huizhou Engled Optoelectronics Tech Co., Ltd.		
Hangzhou Linan Star (HESUNNY) Lighting Electric Co Ltd		

Так же известны следующие производители элементов ленточной структуры:

- Zhejiang Xinguangyuan Lighting Co. Ltd (KHP);
- Le Diamond Opto Corporation,LTD (KHP);
- Dasanyuan Lighting Co. ltd (KHP);
- Beishidi Lighting Co Ltd (KHP);
- Zhejiang My-Lighting tech Co. Ltd (KHP);
- Dongguan Sunlead Opt-eletech Ci Ltd (KHP).

Анализ показал, что российские производители светоизлучающих элементов ленточной структуры отсутствуют.

## 6.2 Устройства питания светодиодных ламп

Источник питания или драйвер является неотъемлемой частью любого светодиодного осветительного устройства. Грамотный выбор светодиода позволяет улучшить характеристики лампы, однако такие параметры, как колебания светового потока, срок службы, сохраняемость и стабильность светового потока определяется не светодиодами, а качеством тока, проходящего через них [6.10].

Специально разработанные осветительные светодиоды дают гарантию выполнения многих технических требований к лампе, таких как интенсивность светового потока, коррелированная цветовая температура, световая отдача и др. Осветительные светодиоды представляют собой прибор со сроком службы до 50000 часов и питающийся постоянным током. Следовательно, основное назначение источника питания обеспечить преобразование переменного напряжения осветительной сети в постоянный ток и обладать заданным сроком службы.

Диапазон токов современных светодиодов находится в широком диапазоне — от 1 мА до 3 А. До недавнего времени на рынке осветительных светодиодов доминировали приборы с током 350 мА. И на рынке сейчас присутствует огромное количество источников питания с токами от 350 мА и выше. Задачи же разработки источников питания на токи от 10 мА до 350 мА решены не окончательно.

Светодиод - прибор безынерционный и в случае, когда источник питания имеет какие-либо пульсации тока, они моментально превращаются в пульсации светового потока.

Ниже рассматриваются преобразователи переменного напряжения 220 В в постоянный ток, значение которого, в соответствии с таблицей 6.9 находится в интервале 9-16 мА и предназначено для питания излучающих элементов ленточной структуры.

В первую очередь нужно обращать внимание на схему построения: изолированный или неизолированный вход/выход, т.е. имеет ли источник питания гальваническую развязку.

Также важно определить требуется ли корректор коэффициента мощности (ККМ) в данном случае. Коэффициентом мощности называется отношение активной (полезной) мощности к суммарной (активная + реактивная). Активная мощность полностью потребляется нагрузкой и совершает полезную работу. Реактивная же сперва запасается, а затем снова возвращается в сеть. В этой ситуации в сети текут большие токи, чем требовалось бы для данной нагрузки. Таким образом, главная задача ступени ККМ —

сократить значение реактивной составляющей мощности до минимума.

Обеспечение максимально возможного КПД одно из основных требований к источнику питания для светодиодов. Помимо потерь на преобразование при разработке источника со стабилизацией тока также необходимо учесть потери в цепи обратной связи. Дело в том, что в качестве датчика тока обычно используется резистор. Через него протекает тот ток, который подлежит стабилизации. Потери зависят от того, какое значение внутреннего опорного напряжения у микросхемы, которая выбрана в качестве преобразователя. Минимальные потери имеет микросхема с опорным напряжением 200...300 мВ [6.10].

Типовая структурная схема блока питания светодиодной лампы показана на рисунке 6.2.

Сетевое переменное напряжение проходит через фильтр электромагнитных помех (ЭМП) на выпрямитель. Затем выпрямленное напряжение проходит через ступень ККМ и питает, собственно, импульсный стабилизатор тока, к выходу которого подключены светодиоды [6.11].

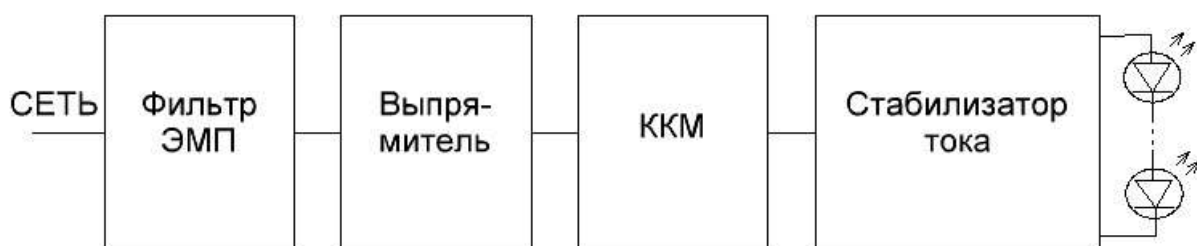


Рисунок 6.2. Типовая структурная схема устройства питания светодиодной лампы

Входной фильтр ЭМП обладает свойством двунаправленного помехоподавления, то есть предотвращает проникновение высокочастотных импульсных помех как из сети в блок питания, так и наоборот из блока питания в сеть.

Выпрямитель выполняется по схеме диодного моста. Диоды выпрямителя испытывают нагрузку импульсным током заряда конденсатора выпрямителя [6.12].

Яркость светодиода сильно зависит от тока, через него протекающего. Ток же, в свою очередь, зависит от многих возмущающих воздействий, поэтому основная функция блока питания светодиодной лампы - обеспечить стабильный ток, вне зависимости от изменения внешних параметров.

Существует две основные разновидности стабилизатора тока: линейный и импульсный стабилизатор. Выбор конкретной схемы зависит от многих факторов, рассмотрим основные преимущества и недостатки каждой схемы.

Линейный стабилизатор напряжения является делителем напряжения постоянного тока. Суть его работы заключается в том, что на вход подается нестабильное напряжение, а с нижнего плеча делителя снимается стабилизированное выходное напряжение. Принципиально такого рода стабилизация осуществляется благодаря изменению сопротивления одного из плеч делителя напряжения, в роли которого и выступает стабилизатор напряжения. Эта система регулирует сопротивление в динамическом заданном диапазоне для стабилизации выходного напряжения. При питании светодиода от стабилизатора напряжения не исключаются такие дестабилизирующие воздействия на ток светодиода, как температура кристалла, изменение значений контактных сопротивлений, старение элементов светодиода и т.д.

При большом отношении входного и выходного напряжений уменьшается КПД стабилизатора напряжения, так как энергия рассеивается в виде тепла на регулирующем элементе стабилизатора. По этим причинам в линейных стабилизаторах тока особое внимание необходимо уделить вопросам охлаждения, тем самым увеличивая срок службы и предотвращая регулирующий элемент стабилизатора от перегрева.

По этим причинам блоки питания со стабилизацией выходного тока, а не напряжения являются более предпочтительными.

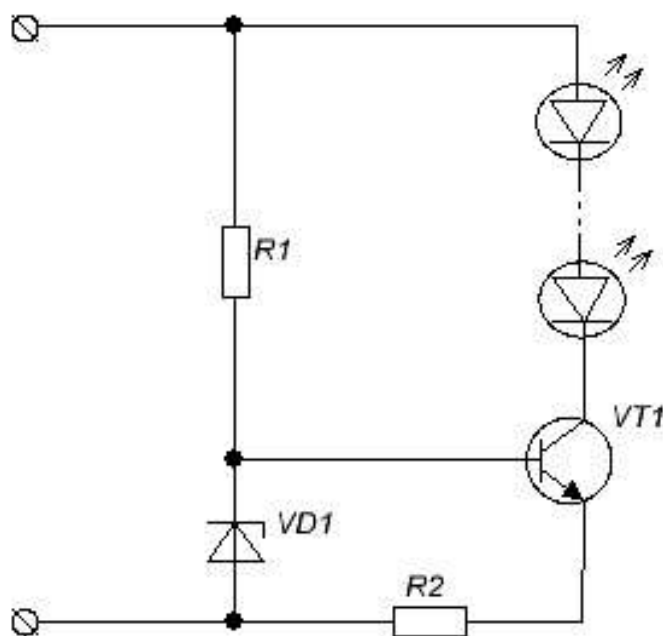


Рисунок 6.3. Схема линейного стабилизатора тока

Главными достоинствами линейных стабилизаторов тока являются отсутствие помех в выходном сигнале и простое конструктивное исполнение. Пример простейшего

линейного стабилизатора тока приведен на рисунке 6.3.

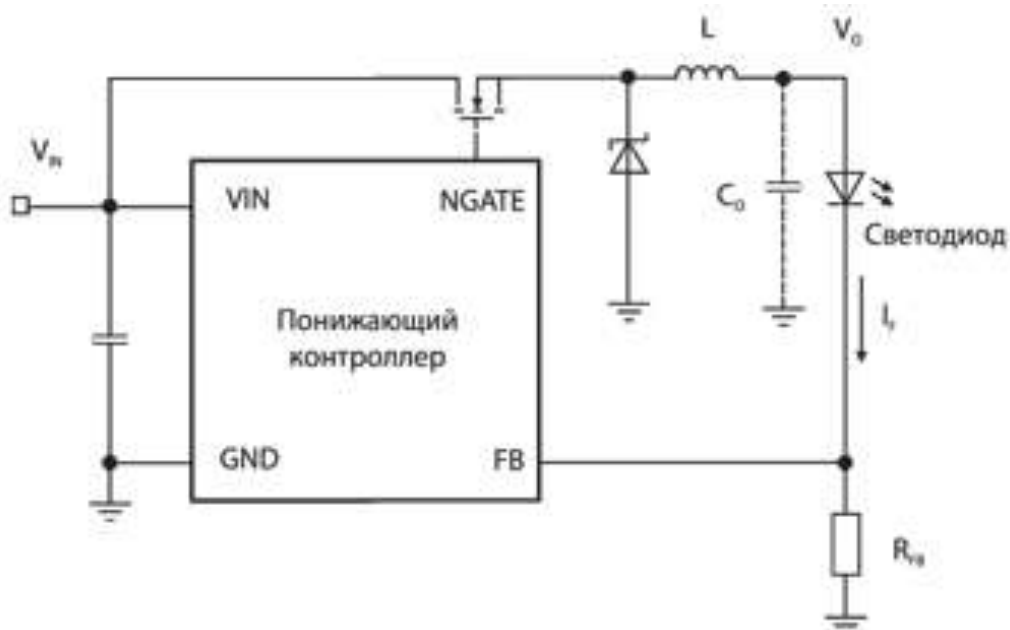


Рисунок 6.4. Схема импульсного стабилизатора тока с понижающим контроллером

Импульсный стабилизатор, как правило, выполняется по схеме понижающего преобразователя и работает по принципу широтно-импульсного регулирования. В первый момент времени открывается силовой транзистор, и ток в цепи светодиодов линейно нарастает. Как только напряжение на резисторе-датчике достигает порогового значения понижающий контроллер закрывает транзистор и ток линейно снижается. Чем меньше время открытого состояния транзистора, тем ниже среднее значение тока через светодиоды [6.13, 6.14].

Линейный стабилизатор тока может быть выполнен как на дискретных компонентах, так и на специализированных микросхемах. Для импульсного стабилизатора целесообразно использовать только специализированные микросхемы. Рассмотрим наиболее распространенные на рынке микросхемы, подходящие для использования в источнике питания для светодиодных ламп. Микросхемы и их функциональное назначение перечислены в таблице 6.10 [6.15, 6.16].

Таблица 6.10. Микросхемы для источников питания

Тип микросхемы	Функциональное назначение
CL2	Линейный стабилизатор тока светодиодов
MCA1504	Линейный стабилизатор тока светодиодов
SDS3108	Линейный стабилизатор тока светодиодов
AIC6621	Линейный стабилизатор тока светодиодов



AP1513	Линейный стабилизатор тока светодиодов
DCL2118	Линейный стабилизатор тока светодиодов
BP2831A	Драйвер светодиодов понижающего типа
BP2325	Драйвер светодиодов понижающего типа
VIPER07	Обратноходовый контроллер с постоянной частотой работы
VIPER17LN	Обратноходовый контроллер с постоянной частотой работы
MP4050	Драйвер светодиодов со стабилизацией выходного тока
MP1570DN	Контроллер понижающего преобразователя с выходом для управления синхронным выпрямителем
HV9910	Драйвер светодиодов понижающего типа
MCA1602	Драйвер светодиодов понижающего типа
MCA1503	Драйвер светодиодов понижающего типа
MCA1505	Обратноходовый контроллер с постоянной частотой работы
AP3766	Обратноходовый контроллер с постоянной частотой работы
NCL30051	Контроллер полумостового резонансного преобразователя
SL4120	Контроллер полумостового резонансного преобразователя
UCC25600	Контроллер полумостового резонансного преобразователя

Перечисленные микросхемы относятся к двум основным классам: специализированные драйвера для светодиодов и контроллеры для импульсных преобразователей. Выбор конкретной микросхемы для каждого случая требует дополнительных экспериментов.

## **6.3 Методы теплового анализа светодиодных ламп**

### **6.3.1 Аналитический (теплофизический) метод**

Метод основан на численном решении уравнений нестационарной теплопроводности при оценке тепловых характеристик. Такой подход позволяет учитывать взаимосвязи внутренних элементов, их геометрические размеры и константы применяемых материалов. Аналитические методы используемые для решения нестационарных задач теплопроводности, успешно применялись только на ранних стадиях развития полупроводниковой техники. Это обуславливалось тем, что объектами

исследования являлись маломощные транзисторы с тянутыми переходами, конструкция которых представляла собой явно выраженное объёмное тело кристалла. Такой конструктив позволял моделировать его в виде однородного стержня (бруска) правильной геометрической формы с простыми граничными условиями [6.18]. На рисунке 6.11 приведен пример геометрии подходящей для моделирования теплофизических процессов аналитическим методом.

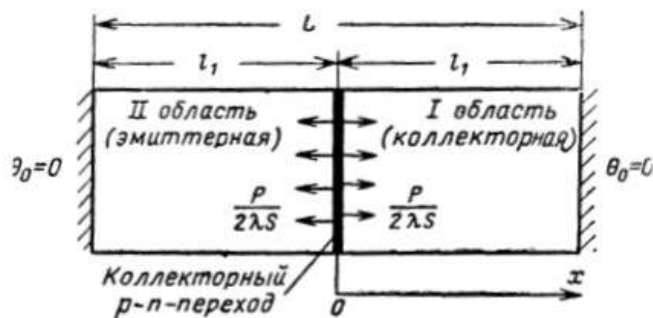


Рисунок 6.11. Симметричная теплофизическая модель сплавного транзистора (по Мартенсону)

Для возможности существенного упрощения математического анализа была проведена идеализация теплофизических процессов, связанная со спецификой режима работы транзистора с тянутыми переходами, особенностями конструкции. Идеализация подразумевала исключение конвективного и лучевого способа передачи тепловой энергии, коэффициенты теплопередачи и теплоёмкости принимаются постоянными величинами и, наконец, вся мощность, подводимая к прибору, рассеивается в плоскости *p-n*-перехода. Анализируя аналитические методы моделирования теплофизических процессов, протекающих в полупроводниковых (ПП) приборах, необходимо отметить, что полученные таким способом результаты носят исключительно частный характер и не обеспечивают решение задачи в удобном для практической реализации виде [6.18]. Основное неудобство заключается в том, что один и тот же тип прибора представляется различными эквивалентными схемами в зависимости от режимов его работы. Кроме того, использование аналитических методов, применимых только для однородной модели, в качестве основного инструмента моделирования тепловых процессов в многослойной структуре реального ПП прибора не только не способствует успешному решению задачи, а наоборот, значительно её усложняет [6.19].

### 6.3.2 Графический (экспериментальный) метод

Ввиду очевидного факта, что строгий теоретический анализ нестационарной

теплопроводности реальных многослойных структур весьма затруднителен, всё чаще стали выдвигаться предположения о том, что аналитический метод не имеет практического смысла, и как следствие – тепловые характеристики ПП приборов должны определяться чисто экспериментальными способами, т.е. по характеру их реакции на типовые возмущения [6.20].

В этом случае количественная оценка тепловых характеристик ПП приборов представляется в виде графика переходной тепловой характеристики. График представляет собой зависимость, которая была экспериментально выявлена, мгновенного значения общего теплового сопротивления от времени работы. Для большинства ПП приборов в технической документации приводится график переходной тепловой характеристики [6.21, 6.22]. На рисунке 6.12 приведен пример графика переходной тепловой характеристики.

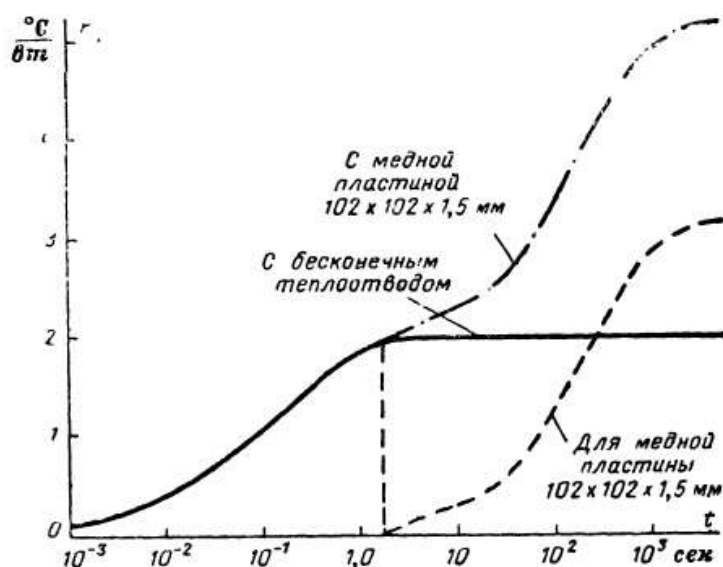


Рисунок 6.12. График переходного теплового сопротивления тиристора (2N681), снабженного медным теплоотводом

Таким образом, представленный метод отличается использованием экспериментальных данных, которые в свою очередь представляют собой единственное средство представления в количественной форме исходной информации для последующих расчётов. Такой подход упрощает задачу, стоящую на первом этапе расчёта (сбор информации), но сильно затрудняет её решение на втором этапе (непосредственный расчёт). Графическое представление информации при дальнейшем её использовании пригодно только для расчёта графо-аналитическими методами, которые не отличаются точностью и при этом слишком громоздки [6.23].

### 6.3.3 Метод поэтапного моделирования

Сущность метода сводится к разложению конструкции ПП прибора на отдельные элементы в иерархической последовательности с дальнейшим просчетом каждой отдельной представленной в виде математической модели. Полученное конечное число моделей затем моделируются при помощи наиболее подходящих аналитических и численных методов. Отличительной особенностью моделирования тепловых процессов является необходимость рассмотрения процесса одной и той же физической природы для всего прибора или приборного комплекса. Следует учитывать тепловые связи между элементами, принадлежащими подсистемам более высоких уровней иерархии, в которых протекают функциональные процессы различной физической природы. Тепловая модель подобной сложной системы является комбинацией многочисленных областей сложной конфигурации с источниками и стоками теплоты, в которых движутся потоки теплоносителей (газов или жидкостей). Наиболее полная математическая модель теплового режима объекта записывается в виде системы многомерных нестационарных уравнений теплопроводности для твёрдых тел и уравнений энергии для потоков теплоносителей с граничными условиями 1, 2, 3-го родов либо с условиями сопряжения на границах раздела элементов.

### 6.3.4 Метод конечных разностей (МКР)

Известно, что нестационарный тепловой режим описывается дифференциальным уравнением Фурье-Кирхгофа,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + Q_w(x, y, z, t, T),$$

где,  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, °К;  $t$  – время, сек;  $x, y, z$  – координаты;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $Q_w$  – количество теплоты, Дж.

Уравнение Фурье-Кирхгофа описывает связь между временным и пространственным распределением температуры в любой точке тела. С заданными краевыми условиями (начальными и граничными) его можно решить при помощи вычислительной машины и получить численное решение. Сущность метода конечных разностей заключается в том, что вместо производных в дифференциальном уравнении используются их конечноразностные аппроксимации. При построении дискретных аппроксимаций краевых дифференциальных задач, центральным вопросом является противоречие: необходимость получения хорошего качества аппроксимации и

эффективного устойчивого решения производных алгебраических систем.

Метод конечных разностей при решении задач теплопроводности подразумевает представление твёрдого тела в виде совокупности узлов. В результате аппроксимации частных производных дифференциального уравнения Фурье-Кирхгофа конечными разностями имеют систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры, как локальной характеристики в каждом узле сетки. Такая система является незамкнутой и для того, чтобы её замкнуть применяют разностное представление граничных условий [6.24].

### 6.3.5 Метод конечных элементов (МКЭ)

Метод конечных элементов представляет собой численный метод, который основан на замене объекта моделирования совокупностью подобластей (элементов), затем для каждой отдельной подобласти отыскивается приближенное решение задачи теплообмена. Метод подразумевает запись дифференциального уравнения переноса и граничные условия для каждого элемента, определяющие процессы теплообмена на граничных поверхностях конкретного элемента, и затем получить решение в каком-либо виде. Суммирование результатов отдельных вычислений с учётом определённых правил предоставляет решение общей задачи поставленной для всего объекта.

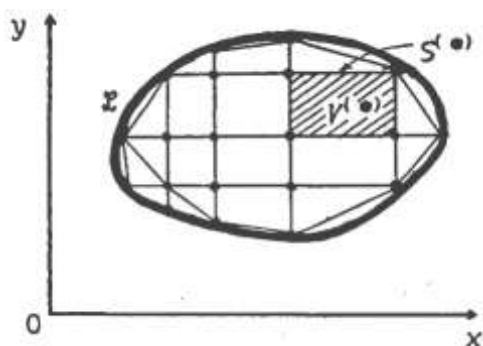


Рисунок 13. Разбиение области на элементы

Общую концепцию МКЭ можно проиллюстрировать следующим образом. Пусть имеется некоторая область определения задачи, ограниченная контуром  $L$ , как это изображено на рисунке 13.

Внутри этой области и на ее контуре можно задать произвольное количество точек с координатами  $X_i (i = 1, 2)$ . Значения искомой функции в этих точках пусть будут  $U_i$ . Соединяя точки прямыми линиями, получим подобласти, совокупность которых аппроксимирует область в целом. При этом криволинейные участки контура  $L$  заменяются прямолинейными. Важно отметить, что полученная сетка из элементов, с помощью

которой моделируется область определения задачи, не является регулярной ни геометрически, ни топологически. Это означает, что размеры и формы подобластей (элементов) могут изменяться произвольно, их взаимные соединения не обязательно должны следовать какой-либо регулярной структуре. Последнее обстоятельство обеспечивает геометрическую гибкость метода.

Также целесообразно привести перечень преимуществ МКЭ приведенных в [6.25], которые позволили обеспечить применение этого метода в большинстве программных решений, посвященных решению задач теории поля и моделированию тепловых режимов.

- обеспечивается широкая вариация задания граничных условий на отдельных участках границы (внешней и внутренней) области;
- криволинейные участки границ области могут быть аппроксимированы прямыми линиями;
- размеры и геометрическая форма элементов могут быть разными;
- взаимные соединения элементов не обязательно должны следовать какой-либо регулярной структуре;
- свойства материала каждого элемента могут быть индивидуальными и, к тому же, анизотропными;
- обеспечивается возможность повышения точности решения задачи путем увеличения количества элементов, ограничиваемого лишь мощностью используемой ЭВМ;
- вследствие наличия общих узловых точек, глобальные матрицы являются ленточными, т.е. содержат большое число нулей, не заносимых в память.

Трёхмерное геометрическое моделирование объекта исследований

Трёхмерное твердотельное геометрическое моделирование представляет собой задачу построения компьютерной 3D модели по средствам систем автоматизированного проектирования (САПР). Модель является набором данных объекта реального мира и может использоваться для решения различных технических задач, таких как: визуализация, разработка конструкции, построение расчетных сеток, моделирование различных физических процессов и явлений (механические напряжения, деформации, распространение электромагнитных волн, распределение температурных полей и др.). Основное предназначение трёхмерной модели обозначено как хранение информации о форме объектов и их взаимном расположении, и предоставлении ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде [6.26].

## Список литературы к разделу 6

- 6.1 Официальный сайт Gauss [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gauss-russia.ru/catalog/>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.2 Официальный сайт Jazz-way [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jazz-way.com/catalog/lampy/lampy-svetodiodnye/>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.3 Официальный сайт Kreonix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kreonix.net/katalog-tovarov/svetodiodnyie-lampyi-g4/svetodiodnyie-lampyi-e27svetodiodnyie-lampyi-e27/>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.4 Официальный сайт Navigator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.navigator-light.ru/products/lamps/led.html>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.5 Официальный сайт ASD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.asd-electro.ru/products/svetodiodnye\\_lampy/](http://www.asd-electro.ru/products/svetodiodnye_lampy/), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.6 Официальный сайт Ledora [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ledora.de/produkte/>, свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.7 Официальный сайт Tradekey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tradekey.com/product\\_listall/uid/8829978/Shenzhen-Chinlighting-Technology-Co-Lt.htm](http://www.tradekey.com/product_listall/uid/8829978/Shenzhen-Chinlighting-Technology-Co-Lt.htm), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.8 Официальный сайт Lucasled [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://lucasled.gr/products\\_new.php/en?page=5](http://lucasled.gr/products_new.php/en?page=5), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.9 Официальный сайт lumilife [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.lumilife.com/index.php?\\_m=mod\\_product&\\_a=prdlst&cap\\_id=138](http://www.lumilife.com/index.php?_m=mod_product&_a=prdlst&cap_id=138), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.10 Proper driver design optimizes LED lighting By Robbie Paul This article was published in the June 2013 issue of LEDs Magazine. Официальный сайт LEDs magazine [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.LEDsmagazine.com](http://www.LEDsmagazine.com), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.11 Миронов С. Особенности построения источников питания для светодиодного оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.lightingmedia.ru/reviews/reviews\\_18.html](http://www.lightingmedia.ru/reviews/reviews_18.html), свободный (дата обращения: 01.01.2017).

- 6.12 Махлин А. Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 1 – С. 30-33.
- 6.13 Сергеев Б.С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания / Б.С. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.
- 6.14 Берёзин О. К. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры / О.К. Берёзин – М.: «Три Л». – 2000. – 400 с.
- 6.15 Каталог компонентов МТ-систем: «Решения для светодиодных светильников. Часть 1. Светодиоды. Драйверы. Источники питания» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.mt-system.ru/sites/default/files/docs/documents/mt-system\\_lighting](http://www.mt-system.ru/sites/default/files/docs/documents/mt-system_lighting), свободный (дата обращения: 01.01.2017).
- 6.16 Цвелюк Е., Котов В. Обзор интегральных микросхем светодиодных драйверов // Современная электроника – 2014. – №8. – С. 32-37.
- 6.17 Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича.– М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
- 6.18 Давидов П.Д. Анализ и расчёт тепловых режимов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1967. – 144 с.
- 6.19 Emeis R., Herlet A., Spence E. The Effective Emitter area of Power Transistors. // Proc I.R.E. – 1958– V.46. – №6. – P. 1220-1229.
- 6.20 Murray R. Silicon Controlled Rectifiers Designers Handbook. Jonwood, 1964.
- 6.21 Kennedy D.P. Spreading Resistance in Cylindrical Semiconductor Devices // Journal of Applied Physics. – Volume 31. – Issue 8. – P.1490-1497.
- 6.22 Теплотехнический справочник. Т. I. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
- 6.23 Давидов П.Д. К теории инженерного расчета нестационарных тепловых процессов в мощных полупроводниковых приборах // Изд. 4-е, Электричество. – 1966. – С.46-52.
- 6.24 Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчёта теплового режима приборов // М.: Радио и связь. – 1990. – 312 с.
- 6.25 Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Изд. Томск. политехнич. ун-та. – 2007. – 172 с.
- 6.26 Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие / Изд. 3-е, перераб. – Российский госуниверситет им. И. Канта. – Калининград. 2010. – 95 с.