

*В.С. Солдаткин, А.А. Вилисов, В.И. Туев*

**ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА  
МОЩНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ**

Томск 2016

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

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)

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

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА МОЩНЫХ  
СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств

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

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

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

Томск 2016

Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 33с.

Настоящие учебное пособие составлено с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Технология электронных средств». Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих специальную дисциплину по выбору вариативной части профессионального цикла БЗ.В.ДВ.4.1 «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий» и содержат необходимую информацию и курс лекций для изучения дисциплины. При изучении материалов данного учебного пособия, студенты должны расширить свои знания по изучаемой дисциплине, а также данное учебное пособие направлено на формирования у студентов следующих компетенций:

ОК-6 – способностью стремиться к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства;

ПК-3 – готовностью учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности.

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать:**

- о светотехнических, энергетических и монтажно-эксплуатационных характеристиках мощных световых приборов на основе твердотельных источников света

**Уметь:**

- разрабатывать технологические процессы на световых приборы различной сложности под руководством специалистов более высокой квалификации;

**Владеть:**

- навыками расчета теплового режима светового прибора при его проектировании.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Состояние и перспективы развития энергоэкономичных и экологически чистых источников излучения	5
2. Основные проблемы, решаемые при проектировании конструкции и технологии изготовления световых приборов на основе твердотельных источников света	12
3. Основы теплового менеджмента при проектировании мощных светоизлучающих изделий на основе твердотельных источников света	16
4. Технологические материалы для производства мощной светоизлучающей техники	21
5. Технологические процессы изготовления, сборки и монтажа светодиодных световых приборов	27

# **1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рост количества потребителей электроэнергии в секторах систем освещения (промышленный, общественный, уличный, жилой и сельскохозяйственный) приводит к увеличению потребляемой мощности, вследствие чего требуется увеличение генерируемой мощности или её высвобождения за счет проведения мероприятий по внедрению новых технологий для экономии энергоресурсов.

Высокие показатели экономии электроэнергии могут быть достигнуты при помощи внедрения интеллектуальных систем освещения.

Начиная с конца прошлого века в Японии, США, Европе были приняты программы энергосбережения, внедрения светодиодного освещения, ресурсосбережения. В настоящее время в мире идет рост потребления светодиодного освещения. Ведущие мировые производители светодиодов (СД) демонстрируют хорошие финансовые результаты даже в условиях кризиса, совершенствуют технологии производства, повышая световые характеристики выпускаемой продукции.

В корпоративной дорожной карте развития крупносерийного светодиодного производства и внедрения энергосберегающих систем освещения в организациях Государственной корпорации «РОСТЕХНОЛОГИИ» отмечается следующее:

«В России разработка мощных светодиодов и устройств отстает от развитых стран на 5-7 лет, а рынок находится на стадии формирования. Количество «участников» рынка – не более 50, причем, в основном, это мелкие компании, занимающиеся перепродажей или конструированием различных изделий с использованием импортных светодиодов».

Рынок светодиодной светотехники в области освещения только начинает формироваться в России и пока занимает незначительную долю. Но

именно этот сегмент имеет огромный потенциал в будущем.

По оценкам Группы компаний «Церс» объем российского рынка светодиодного освещения в 2008 г. составил 447,84 млн. руб. (\$18 млн.), что от общего российского рынка светотехники составляет только 0,9%.

Российский рынок светодиодного освещения начал формироваться в сегментах уличного и промышленного освещения в 2006 г., а по прочим сегментам, в том числе декоративному освещению только начинали появляться зарубежные предложения. В 2006 г. весь объем светодиодного освещения в России составлял около 67,95 млн. руб. (\$2-3 млн.).

Серийное производство светотехники на основе мощных светодиодов для освещения в России началось только в 2007 г., что не в последнюю очередь было связано с усовершенствованием самих светодиодов – выпуском на рынок западными производителями светодиода со светоотдачей 100 лм/Вт».

Замена традиционных источников на светодиодные, тем не менее, порождает и другие проблемы. Как известно, разрядные источники света обладают большим коэффициентом пульсации светового потока, что также неизбежно ведет к немалой утомляемости человека, работающего в условиях искусственного освещения. Создание высокоэффективных электронных пускорегулирующих аппаратов стало настоящим прорывом в области освещения, поскольку позволило значительно снизить пульсации света и повысить эффективное использование электрической энергии (коэффициент мощности порядка 0,97). Ситуация со светодиодными светильниками носит приблизительно похожий характер в силу того, что питание светодиодов должно осуществляться качественными надежными устройствами. Широкому внедрению полупроводниковых источников света на рынок светотехники мешает их высокая стоимость, которую можно снизить за счет повышения эффективности их работы, надежности, отработки и упрощения технологии, увеличением массовости выпуска.

Обобщенно 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, что емкость российского рынка источников света составляет около 1 миллиарда ламп. В таблице 1 представлена структура российского рынка источников света по видам ламп в 2013 г.

Таблица 1. Структура российского рынка источников света по видам ламп в 2013 г.

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

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 2, цены на светодиодные лампы вплотную приблизились к стоимости сопоставимых по световому потоку компактных люминесцентных ламп.

Таблица 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.

### Лампы на единичных светоизлучающих диодах

В настоящее время светодиодные лампы на российском рынке продаются почти под 50-тью торговыми марками, наиболее популярными из которых являются такие бренды как: 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

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 оптимальная 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.

Сравнение ламп с излучающими элементами ленточной структуры и ламп на единичных светоизлучающих диодах

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 1 представлены фотографии макетов ламп с использованием линейных излучающих элементов.



Рисунок 1. Светодиодные лампы на линейных излучающих элементах

За последние полгода 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%.

На сегодняшний день ни один из российских производителей не выпускает лампы такого типа.

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.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока. Зонная структура является моделью для изучения свойств твёрдого тела. Твёрдое тело может быть металлом, диэлектриком или полупроводником в зависимости от ширины запрещённой зоны. В полупроводнике ширина запрещённой зоны, как правило, не превышает 3 эВ, а концентрация электронов или дырок в соответствующих зонах обычно не превышает  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Полупроводниковый материал для светодиода синего и белого (синий цвет свечения кристалла плюс люминофор) цвета свечения представляет собой гетероэпитаксиальную структуру GaN/InGaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ).

1. Для светодиодов одной из проблем является формирование омического контакта к *p*-типу GaN. Существующие технологии формирования *p*-контакта позволяют получать контакты с удельным сопротивлением от  $5 \times 10^{-4}$  до  $2 \times 10^{-3}$ , это на один порядок хуже, чем для контактов к *n*-типу GaN. Основными проблемами для контактов к *p*-типу являются:

- высокая энергия активации акцепторной примеси (Mg – 160 эВ),
- тенденция поверхности GaN к формированию вакансий азота.

Указанные проблемы приводят к увеличению высоты барьера Шотки и повышают сопротивление СД. Повышение сопротивления приводит к увеличению напряжения на структуре, перегреву омических контактов, потере мощности излучения, а так же может привести к выходу из строя СД.

2. Для мощных светодиодов характерен эффект стягивания тока («current crowding») под омическими контактами, который также оказывает негативное влияние на надёжность и срок службы СД.

3. Помимо металлизации золото-никель в качестве омических контактов применяют полупрозрачные контакты на основе *ITO* (indium tin oxide), такие контакты позволяют увеличить вывод излучения из кристалла, но создают дополнительное сопротивление на омических контактах.

4. Излучательная рекомбинация – единственный физический механизм генерации света в светоизлучающих диодах. Повышение уровня легирования активной области повышает вероятность излучательной рекомбинации. Однако приближение уровня легирования к пределу растворимости примеси приводит к возникновению структурных дефектов, образующих безызлучательные центры рекомбинации. В связи с этим, оптимальный уровень легирования активной области подбирают экспериментально.

5. Основные потери при выводе излучения:

- 1) Потери на поглощение в материале кристалла.
- 2) Френелевские потери.
- 3) Потери за счёт полного внутреннего отражения от границы раздела сред с различающимися показателями преломления, определяемые так называемым критическим углом.

Часть сгенерированных фотонов поглощается материалом кристалла, омическими контактами и подложкой полупроводника. При распространении света из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$  часть света отражается обратно от границы раздела. Эти потери света называются френелевскими. Потери, связанные с критическим углом. Этот вид потерь, приводящих к значительному уменьшению эффективности, обусловлен полным внутренним отражением фотонов, падающих на поверхность кристалла под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины кристалла к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля.

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

1) Одной из проблем, связанных с получением белого цвета свечения СД является равномерность цвета свечения которая зависит от равномерности нанесения люминофорной композиции и её однородности. Причём известно, что тяжёлые частицы люминофора оседают на поверхность кристалла, а лёгкие остаются на поверхности светодиода в процессе его изготовления.

2) При температуре 120 °С у *YAG* распадается активатор церий, что приводит к существенной деградации по световому потоку и СД начинает светить в синей области оптического спектра.

3) Связующая составляющая люминофорной композиции – оптически прозрачный компаунд при низких температурах может стекловаться и растрескиваться, а при высоких, более 120 °С желтеет.

7. При работе мощных светодиодов выделяется больше количество тепла, которое приводит:

1) к изменению ширины запрещённой зоны и смещению спектра, что в свою очередь приводит к изменению светового потока и цвета белого светодиода, так как люминофор чувствителен к изменению спектра кристалла;

2) в следствии перегрева активной области происходит деградация структуры полупроводника и возникающие дефекты приводят к снижению доли излучательной рекомбинации и генерации фотонов и увеличению доли безизлучательной рекомбинации и увеличению генерации фононов;

3) в следствии перегрева контактной области происходит диффузия

золота в омических контактах в глубь полупроводника, что может привести к закарачиванию его активной области, так же высокая температура приводит к миграции индия и вызывает дефекты полупроводникового материала.



### 3. ОСНОВЫ ТЕПЛООВОГО МЕНЕДЖМЕНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОЩНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

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

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

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

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

$R_t$  – тепловое сопротивление.

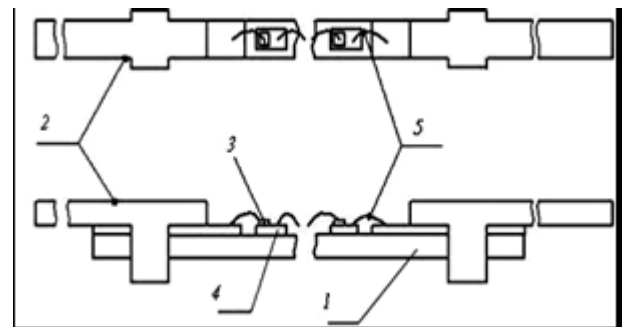
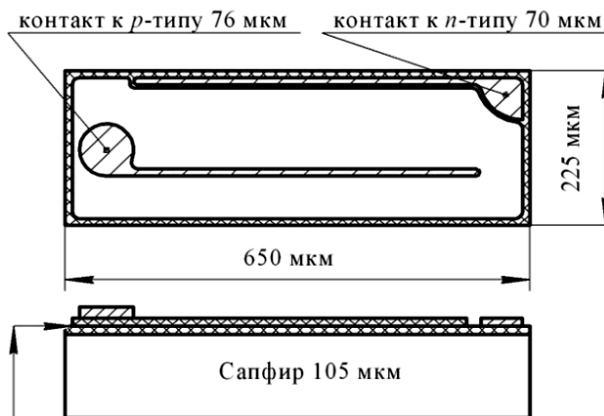
Для слоистой структуры тепловое сопротивление каждого слоя приблизительно оценивается по формуле:

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

где  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

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



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

Рассмотрим оценочный тепловой расчёт на примере светодиодного излучающего элементе (СИЭ), который состоит из основания (1), торцевых выводов (2), последовательно соединённых светодиодных кристаллов (кристаллы планарного типа на основе твёрдых растворов GaN, выращенные на сапфировой подложке) (3), приклеенных теплоэлектропроводящим клеем на металлизированные площадки (4). Светодиодные кристаллы соединены последовательно металлическими проволоками (5). Основание с кристаллами окружено люминофорной композицией.

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

Основное выделение тепла происходит в активной области кристалла GaN со значением теплопроводности  $\sim 1,3$  Вт/м·К, тепловой поток проходит от активной области через *n* тип и *p* тип полупроводника со значениями толщины, указанными на рис. 5, затем через сапфир (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> теплопроводность 46 Вт/м·К), металлизацию и теплопроводящий клей на металлическое основание СИЭ. Рассчитаем тепловое сопротивление кристалла, представив светодиодный кристалл в виде схемы, подобной электрической

эквивалентной, последовательных сопротивлений, где каждый слой (в зависимости от материала) является сопротивлением. На основе данных значений теплопроводности материалов и их толщин по формуле (2) проведён расчёт теплового сопротивления кристалла (*p-n*-переход – металлизация), которое составляет 31 К/Вт. Далее из кристалла тепловой поток проходит через теплопроводящий клей на металлическое основание. Теплопроводность клея составляет примерно 60 Вт/м·К, толщина клея не более 30 мкм, тогда тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт. По данным от производителя (фирма Engled) аналогичных СИЭ тепловое сопротивление их изделий составляет 45 К/Вт, что косвенно подтверждает достоверность проведённых оценочных расчётов.

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

$$T_{p-n} = T_{окр} + R_{СИЭ} \cdot P, \quad (3)$$

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

При  $T_{окр} = 25$  °С температура *p-n*-перехода  $T_{p-n} = 25 + (33,87 \times 0,029) = 25,9$  °С.

Соответственно по формуле (3) определим значения температуры *p-n*-перехода, которая составляет для варианта лампы с двумя СИЭ 51,8 °С, а с четырьмя СИЭ 102,7 °С.

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

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

$$K_y = \left[ \frac{T_2}{T_1} \right]^{E_a / k} \quad (4)$$

где  $K_y$  – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

$E_a$  – энергия активации отказов, эВ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T_{p-n}$  – температура  $p$ – $n$ -перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С;

$T_{p-n y}$  – температура  $p$ – $n$ -перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

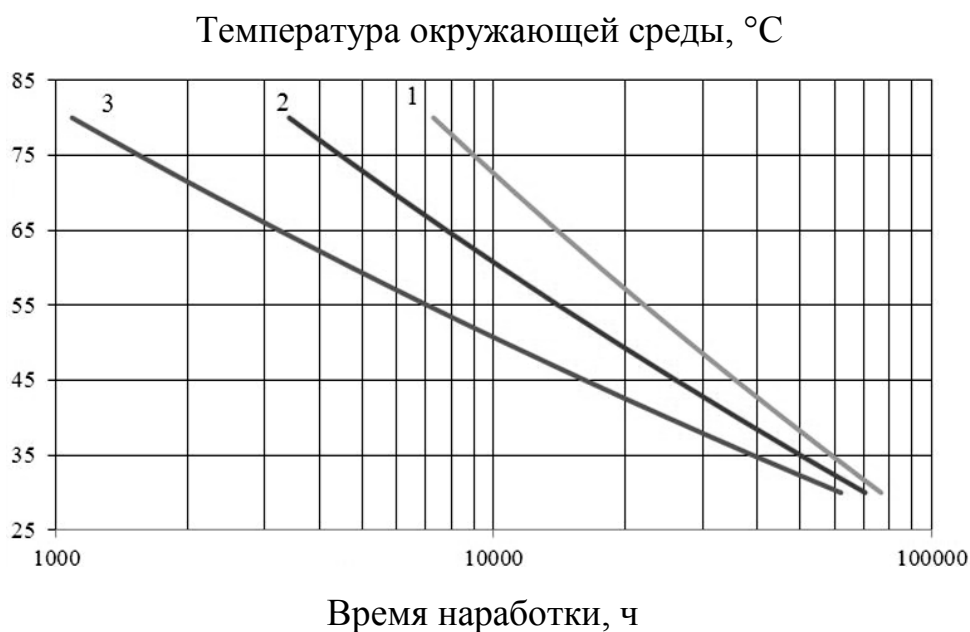
Номинальное время наработки  $t_{ном}$  (срок службы СД) определяют по уравнению (5), задав коэффициент форсирования  $K_y$ , исходя из режимов ускоренных испытаний:

$$T_{ном} = \dots \quad (5)$$

где  $t_y$  – время испытаний в ускоренном режиме.

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

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



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

Из рисунка видно, что для всех вариантов лампы срок службы

превышает шестьдесят тысяч часов. Это соответствует мировому уровню разработок в данной области.

#### 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЩНОЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

Полупроводниковый материал для светодиода синего и белого (синий цвет свечения кристалла плюс люминофор) цвета свечения представляет собой гетероэпитаксиальную структуру GaN/InGaN с множественными квантовыми ямами (МКЯ).

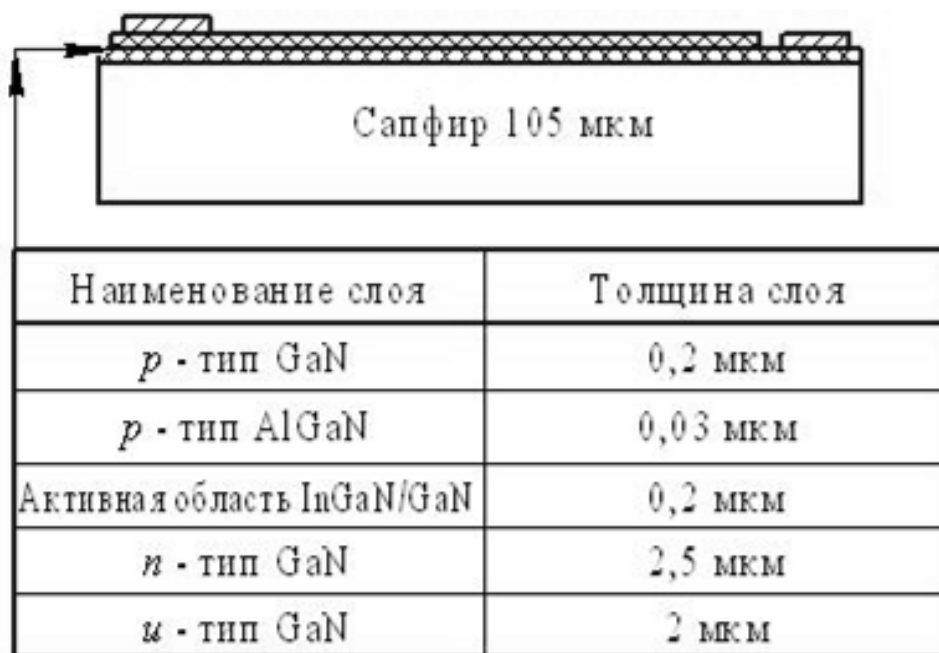


Рисунок 1 Гетероструктура GaN/InGaN

Когда образуется *p-n* переход, носители зарядов в его окрестности распределяются так, чтобы выровнять уровень Ферми. В области контакта слоев *n* и *p*-типов образуется дипольный слой, состоящий из ионизованных положительных доноров на *n*-стороне и ионизованных отрицательных акцепторов на *p*-стороне. Электрическое поле дипольного слоя создаёт потенциальный барьер, препятствующий дальнейшей диффузии электрических зарядов. При подаче на *p-n*-переход электрического смещения в прямом направлении потенциальный барьер понижается, вследствие чего в *p*-область войдет добавочное количество электронов, а в *n*-область *p*-дырок. Такое введение неосновных носителей заряда называется инжекцией.

Концентрация инжектированных носителей заряда зависит только от равновесной концентрации неосновных носителей и приложенного напряжения.

Полупроводниковые кристаллы, выращенные на сапфировой подложке, представлены многими производителями, например, корпорацией Epistar. Кристалл планарного типа с рабочим током 350 мА с размерами  $965 \times 965 \times 150$  мкм<sup>3</sup> излучает с оптической мощностью ~300 мВт в спектре с длиной волны максимума интенсивности 460 нм. Максимально допустимая температура р-п перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 115<sup>0</sup>С. Альтернативой ростовой подложки из сапфира является кремний и карбид кремния. Технологией выращивания эпитаксиальных структур GaN на карбиде кремния обладает корпорация Cree, которая с 80-х годов занималась разработкой и изготовлением элементов на GaN для применения их в космической отрасли. На сегодня Cree является монополистом в изготовлении кристаллов GaN, выращенных на карбиде кремния. Кристаллы Cree с рабочим током 350 мА и размерами  $980 \times 980 \times 100$  мкм<sup>3</sup> вертикальной конструкции излучают ~450 мВт, в спектре с длиной волны 460 нм. Максимально допустимая температура р-п перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 145<sup>0</sup>С. Также на рынке представлены кристаллы, выращенные на кремнии. Корпорация Lattice Power производит кристаллы, выращенные на кремнии, при рабочем токе 350 мА кристаллы с размерами  $960 \times 960 \times 200$  мкм<sup>3</sup> вертикальной конструкции излучают в спектре с длиной волны 460 нм оптическую мощность до 420 мВт. Вертикальные кристаллы изготавливают по различным технологиям. Корпорация SemiLEDs изготавливает кристалл по технологии *lift-off*. Суть технологии *lift-off* заключается в отделении сапфировой подложки от структуры GaN при помощи лазерного сканирования и перенос GaN на теплопроводящую подложку из меди. При рабочем токе 350 мА вертикальные кристаллы SemiLEDs, с размерами

1070×1070×145 мкм<sup>3</sup> излучают оптическую мощность до 500 мВт, с длиной волны 460 нм. Максимально допустимая температура *p-n*-перехода 125<sup>0</sup>С.

Кристалл для монтажа методом *flip-chip* – это планарный кристалл, омические контакты которого, как правило, расположены на одной поверхности кристалла, а излучение выводится через противоположную поверхность. Излучение такого кристалла выводится либо через сапфир, либо производится удаление сапфира уже в готовом не залитом диоде методом термооблации по технологии *lift-off*.

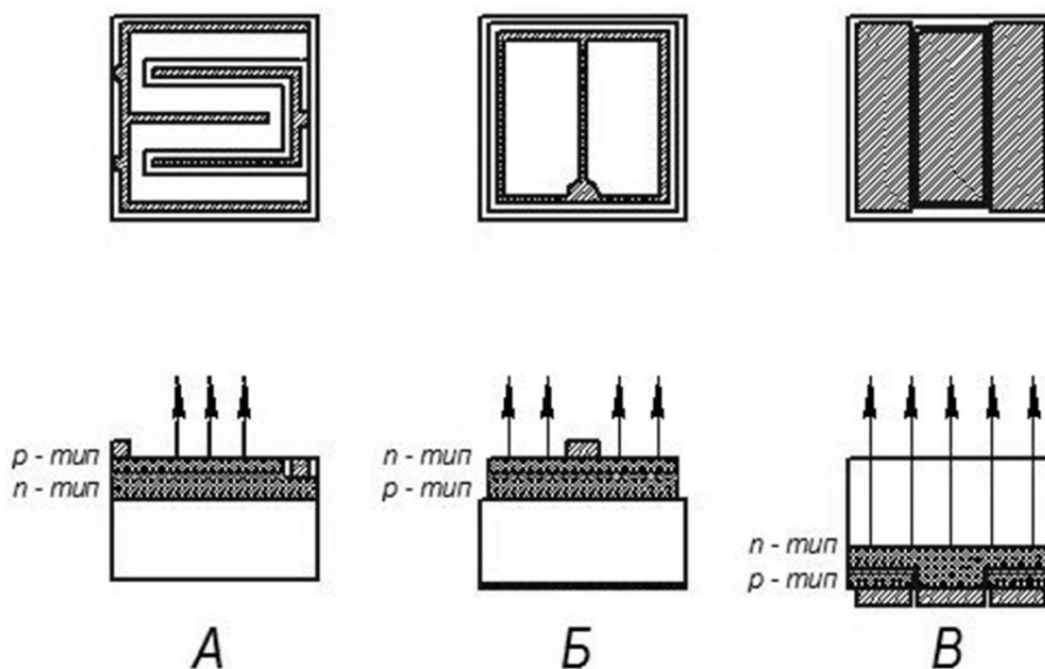


Рисунок 10. Основные виды конструкции кристаллов СД

На рисунке: А – планарная конструкция, вывод света осуществляется через плоскость, на которой находятся контакты к *n*- и *p*- слою. Полупроводниковые нитридные слои с общей толщиной 5 мкм расположены на ростовой подложке из сапфира толщиной 100 мкм; Б – вертикальная конструкция, где свет выводится через поверхность с контактом, при этом второй контакт расположен на противоположной поверхности; В – разновидность планарного кристалла предназначенного для обратного монтажа (*flip-chip*), вывод света осуществляется через подложку а контакты находятся на противоположной к ней поверхности.



Планарный кристалл с подложкой из сапфира (производители: Epistar, Epiled) имеет основные недостатки: требуется дополнительное электрическое соединение проволокой омического контакта; отвод тепла через сапфировую подложку. Вертикальный кристалл с подложкой из карбида кремния, меди и кремния (производители: Cree, Semileds, Osram) имеет основные недостатки: для медной и кремниевой подложек требуется сложная технологическая операция обратной литографии (*lift-off*), которая может привести к увеличению числа дефектов в полупроводнике; для карбид кремниевой подложки высокая стоимость материала. Планарный кристалл для обратного (*flip-chip*) монтажа (производители: Philips-lumiled, ЗАО «Светлана-оптоэлектроника», ЗАО «ИФ Тетис») имеет основные недостатки: для монтажа кристалла требуется автоматизированная установка с высокой точностью позиционирования (погрешность не более 10 мкм).

Представленные выше кристаллы можно разделить по материалу подложки: Epistar (планарный тип кристалла) – сапфир теплопроводность ~ 30 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 115<sup>0</sup>С; Cree (вертикальный тип кристалла) – карбид кремния теплопроводность ~ 58 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 145<sup>0</sup>С; Lattica Power (планарный тип кристалла) – кремний теплопроводность ~ 149 Вт/м×К; SemiLEDs (вертикальный тип кристалла) – медь теплопроводность ~ 390 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 125<sup>0</sup>С. Теплопроводность GaN ~ 1,3 Вт/м×К.

#### Люминофор для светодиода

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов  $(Y_{1-a} Gd_a) Al_5 O_{12} \times Ce^{3+}$  (YGG). Кристаллическая решетка  $YAl_5O_{12}$  активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической

решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Два основных механизма работы люминофора:

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

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

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

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

Для люминофора характерно температурное тушение и концентрационное.

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

Теплопроводящие клеи для светодиодов и кристаллов

Клей ТОК-2, ШКФЛО.028.002 ТУ

Срок сохраняемости при температуре 25 °С 60 суток, режимы полимеризации 170 °С 2 часа или 200 °С 1 час.

Удельное объёмное электрическое сопротивление  $5 \times 10^{-4}$  Ом·см.

Предел прочности при сдвиге на паре золото-кремний 7,0 МПа.

Теплопроводность 2,0 Вт/м·К.

Коэффициент линейного теплового расширения  $5,6 \times 10^{-5}$  °С<sup>-1</sup>.

Клей DM6030

Теплопроводность 12-60 Вт/м·К.

Удельное объёмное электрическое сопротивление 5-40 мкОм·см.

Клей DM5030

Теплопроводность 25-30 Вт/м·К.

Удельное объёмное электрическое сопротивление 25-30 мкОм·см.

Прозрачный клей KER-3000-M2

Режимы полимеризации 100 °С 1 час + 150 °С 2 часа или 160 °С 2 часа.

Удельное электрическое сопротивление 100 ТОм·м.

Предел прочности при сдвиге 270 МПа.

Теплопроводность 0,2 Вт/м·К.

Эпоксидный электро- и теплопроводящий клей Ablebond.

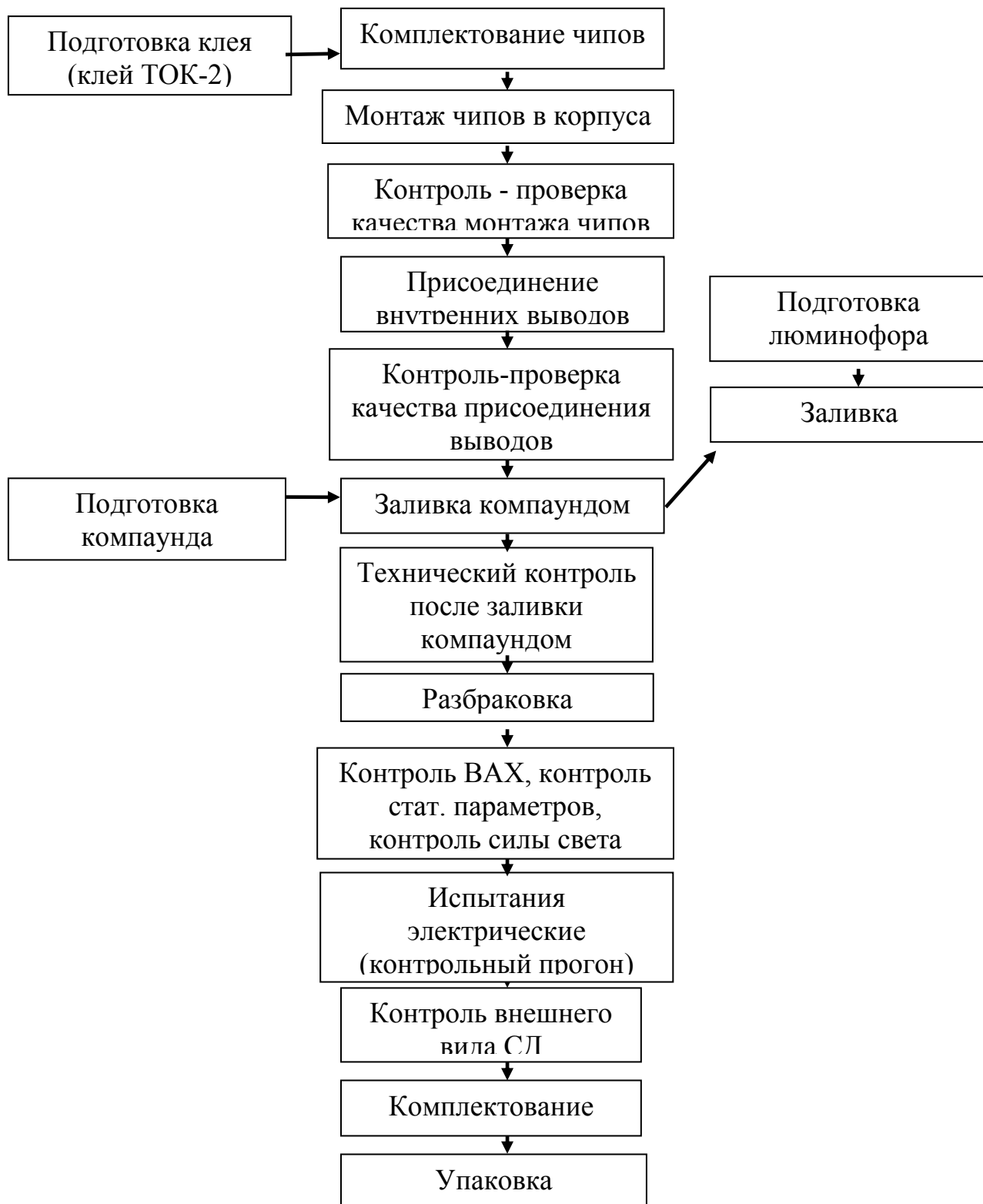
Вязкость 22 сП. Теплопроводность 3,6 Вт/м·К.

Удельное объёмное электрическое сопротивление 0,0006 Ом/см<sup>2</sup>.

Предел прочности при сдвиге 13 МПа. Режимы полимеризации 150 °С 1 час.

## 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, СБОРКИ И МОНТАЖА СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ

Блок схема технологического процесса изготовления светодиода:



Как видно из блок-схемы технологического процесса (ТП), существуют основные и дополнительные технологические операции (ТО).

1. ТО (основная) Комплектования кристаллов (чипов) и корпусов.

1.1 ТО (дополнительная) Подготовка клея. Электро- и теплопроводящие клеи как правило состоят из двух компонентов – основы и отвердителя, которые необходимо смешать в нужной пропорции.

2. ТО (основная) монтаж Кристаллов в корпуса. Состоит из нанесения клея в корпус, установки в корпус кристалла и сушки клея.

3. ТО (основная) Контроль - проверка качества монтажа кристаллов. Осуществляется либо автоматически, либо визуальным осмотром для проверки того, что кристалл приклеен в корпусе, либо проверкой кристалла на сдвиг.

4. ТО (основная) Присоединение внутренних выводов. Осуществляется методом сварки контактов кристалла и внутренних контактов корпуса проволокой. Методы сварки проволокой: ультразвуковая (УЗС) и термозвуковая сварка (ТЗС). Два основных способа соединения – «шарик-клин» и «клин-клин».

5. ТО (основная) Контроль-проверка качества присоединения выводов. Осуществляется либо автоматически, либо визуальным осмотром, либо проверкой на отрыв проволоки.

6. ТО (основная) Заливка компаундом, или герметизация люминофорной композицией. В случае заливки компаундом требуется дополнительная ТО по приготовлению компаунда, в случае герметизации люминофорной композицией требуется дополнительная ТО по приготовлению люминофорной композиции. Сушка компаунда или композиции.

6.1.1 ТО (дополнительная) Приготовлению компаунда.

6.1.2 ТО (дополнительная) Приготовлению люминофорной композиции.

7. ТО (основная) Технический контроль после заливки компаундом.

Проверка качества заливки, автоматизировано или визуальным осмотром на наличие трещин и пузырей, а также проверка полимеризации компаунда: полимеризовался или нет.

8. ТО (основная) Разбраковка. Проверка СД: рабочий или нерабочий.

9. ТО (основная) Контроль ВАХ, контроль стат. параметров, контроль силы света. Контроль основных параметров: электрических, светотехнических и колориметрических.

10. ТО (основная) Испытания электрические (контрольный прогон). Проводится при необходимости, СД включают на некоторое время, чтобы стабилизировать основные параметра: электрических, светотехнических и колориметрических.

11. ТО (основная) Контроль внешнего вида СД. Проводится автоматически или визуальным осмотром на наличие трещин и сколов пузырей.

12. ТО (основная) Комплектование. Разделение СД по диапазонам электрических, светотехнических и колориметрических характеристик на группы.

13. ТО (основная) Упаковка СД.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496 с.
2. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diod (Springer, Berlin). – 1997. – С. 335.
3. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / пер с англ. Ж. Панков; под ред. Ж.И. Алфёрова и В.С. Вавилова – М.: Мир, 1973. – 456 с.
4. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
5. Берг А., Дин П. Светодиоды // Пер с англ. А. Э. Юнович. – М.: Мир, 1979. –687 с.
6. 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).
7. Шмидт Н.М., Аверкиев Н.С., Бауман Д.А., Закгейм А.Л., Левинштейн М.Е., Петров П.В., Черняков А.Е., Шабунина Е.И. Причины неоднозначного развития деградационного процесса в синих InGaN/GaN светодиодах // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2011. – С. 109-110.
8. ОСТ11-336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. – 1983.
9. РД II 0216-85. Приборы полупроводниковые. Методы испытаний по определению конструкторско-технологического запаса.
10. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 июля 2011 г. N 602 г. Москва «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях

переменного тока в целях освещения».

11. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р.

12. ГОСТ 27299-87 Приборы полупроводниковые оптоэлектронные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

13. ГОСТ 7601-78 Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.

14. Крутик М.И., Майоров В.П. Люмены, канделы, ватты и фотоны. Различные единицы - различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС // Специальная техника. – 2002. – №5.

15. ГОСТ 18986.3-73 Приборы полупроводниковые. Метод измерения постоянного прямого напряжения и постоянного прямого тока. – 1973. – 3 стр.

16. ПР 50.2.006 Правила по метрологии. Порядок проведения поверки СИ. – 1994. – 10 стр.

17. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.

18. ГОСТ 25024.4-85 Индикаторы знаков синтезирующие. Методы измерения яркости, силы света, неравномерности яркости и неравномерности силы света. – 1985. – 33 стр.

19. ГОСТ 8.332 - 78 Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. – 1978. – 8 стр.

20. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.

21. ГОСТ 19834.3-76. Излучатели полупроводниковые. Метод



измерения распределения энергии излучения и ширины спектра излучения. – 1976. – 7 стр.

22. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова и др.; под. ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 стр.

23. Мешков В.В. Основы светотехники, ч.1 – М.: Энергия, 1979.

24. Мешков В.В., Матвеев А.Б, Основы светотехники, Ч-2. – М.: Энергоатомиздат, 1989

25. В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.

26. Солдаткин В.С. Модернизация и исследование характеристик светодиода белого свечения для поверхностного монтажа. Автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.07 / гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН. Томск, 2013

27. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 211000.62 – Конструирование и технология электронных средств / Туев В.И., Солдаткин В.С., Вилисов А.А. – 2015. 46 с.