

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

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

**УПРАВЛЕНИЕ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебное пособие

Зав. кафедрой РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 г.

Томск 2018

Туев В.И. Управление в светотехнических системах: учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2018. – 63 с.

Учебное пособие предназначено для магистрантов направления подготовки 27.04.04 Управление в технических системах, профиль «Управление в светотехнических системах», изучающих дисциплину «Управление в светотехнических системах» и также может быть полезно студентам иных профилей и направлений подготовки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 История создания источников света .....	6
2 Физические принципы работы светодиода .....	9
3 Аналитический обзор светодиодных излучающих элементов .....	12
3.1 Общие сведения .....	12
3.2 Светодиодный кристалл.....	16
3.3 Люминофорная композиция .....	19
3.4 Теплопроводящий клей .....	23
3.5 Технология монтажа кристалла.....	27
4 Обзор светодиодных ламп.....	33
4.1 Конструкция ламп.....	33
4.2 Колба лампы.....	38
4.3 Цоколь лампы.....	41
4.4 Устройство питания.....	44
4.5 Технология изготовления и монтажа ножек .....	46
4.6 Технология заварки, откачки и наполнения ламп .....	50
4.7 Технология припайки источника питания .....	52
4.8 Технология цоколевания ламп .....	53
5 Обзор нормативно-методической литературы .....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	58

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДК	Диэлектрические композиции
ДП	Диэлектрические подложки
ИП	Индустриальный партнёр
КД	Конструкторская документация
ККМ	Корректор коэффициента мощности
КМ	Композиционные материалы
КПД	Коэффициент полезного действия
Кристалл	Полупроводниковый светодиодный кристалл, излучающий свет
КСС	Кривая силы света
ЛОН	Лампы общего назначения
Люминофор	Материал, обладающий свойством фотолюминесценции
МКР	Метод конечных разностей
МКЭ	Метод конечных элементов
НТИ	Научно-техническая информация
НТО	Научно-технический отчёт
ПМ	Программы и методики
ПО	Программное обеспечение
ПНИЭР	Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки
СД	Светодиод
СИЭ	Светодиодный излучающий элемент
ТД	Технологическая документация
ТЗ	Техническое задание
ТЗС	Термозвуковая сварка
ТО	Технологическая операция
ТП	Технологический процесс
УЗС	Ультразвуковая сварка
ЭМП	Электромагнитные помехи

## ВВЕДЕНИЕ

Светодиодная лампа на основе светодиодных излучающих элементов представляет собой конструкцию, в которой в колбе установлены светодиодные излучающие элементы, а в цоколе расположено миниатюрное устройство питания [1].

Принцип работы светодиодных излучающих элементов аналогичен принципу работы светодиода белого цвета свечения. На светодиодный кристалл из полупроводникового материала *GaN*, излучающего в синей области оптического спектра, нанесён люминофор из кристаллов *YAG*, который за счёт Стоксовского эффекта переизлучает в жёлто-зелёной области оптического спектра [2].

Известно из работы [3], что максимальное значение световой отдачи светодиодного осветительного прибора белого цвета свечения с комфортной коррелированной цветовой температурой и индексом цветопередачи составляет 250-370 лм/Вт [3]. Совершенствование конструкции лампы светодиодной, включая компонентную базу – светодиодный излучающий элемент направлено на увеличение световой отдачи от 90-100 лм/Вт для доступной на рынке продукции до 125 лм/Вт для разрабатываемых ламп.

## 1 История создания источников света

Как известно [4], освещение бывает: естественное, совмещенное, искусственное.

Искусственное освещение делится:

- освещение помещений производственных и складских зданий;
- освещение помещений общественных, жилых и вспомогательных зданий;
- освещение площадок предприятий и мест производства работ вне зданий;
- освещение селитебных зон:
  - освещение улиц, дорог и площадей;
  - освещение пешеходных переходов;
  - освещение автотранспортных тоннелей;
  - освещение пешеходных пространств;
  - освещение территорий жилых районов;
- наружное архитектурное освещение зданий и сооружений:
  - витринное освещение;
  - рекламное освещение;
- аварийное освещение;
- аварийное освещение автотранспортных тоннелей;
- охранное и дежурное освещение.

Для освещения помещений общественных, жилых и вспомогательных зданий нужны источники света с высокой световой отдачей, высоким значением индекса цветопередачи, тёплым комфортным светом, характеризующиеся низкой стоимостью, общедоступностью, надёжностью и безопасностью. Таким требованиям отвечают полупроводниковые (светодиодные) источники света. Создание светодиодной лампы неразрывно связано с созданием светодиода белого цвета свечения.

Впервые английским инженером Г.Д. Раундом было обнаружено свечение вокруг точечного контакта радиочастотного детектора в 1907 году. В 20-е годы XX века О.В. Лосевым обнаружено явление излучательной рекомбинации носителей тока в кристаллах карбида кремния и открыта электролюминесценция полупроводников. В 1946 году В.Е. Лошкаревым открыта биполярная диффузия неравновесных носителей заряда в полупроводниках. В 1947 году американскими учёными Дж. Бардиным, У. Бреттейном и У. Шокли был создан первый транзистор. Инженер А.В. Красилов и его группа разработали германиевые диоды для радиолокационных станций в НИИ «Исток», совместно с С.Г. Мадоян впервые обнаружили транзисторный эффект. Образцы германиевых транзисторов разработаны Б.М. Вулом, А.В. Ржановым, В.С. Вавиловым и

др. (ФИАН), В.М. Тучкевичем, Д.Н. Наследовым (ЛФТИ), С.Г. Калашниковым, Н.А. Пениным и др. (ИРЭ АН СССР). В 1951 году в Америке на основе «эффекта Лосева», организован центр разработки «полупроводниковых лампочек», действовавший, под руководством К. Леховец. В 1955 году У. Шокли основал в Санта Кларе компанию "Shockley Semiconductor Laboratories" по разработке германиевых и кремниевых транзисторов [2]. В 1954 году, в Томском СФТИ В.А. Пресновым была открыта лаборатория полупроводников, томские исследователи пристыкнули к исследованию арсенида галлия. Совместная работа коллективов ТГУ, СФТИ и НИИ ПП позволила создать на основе арсенида галлия приборы для СВЧ-электроники и ИК-оптики. Определяющую роль в разработке данных приборов сыграли профессора С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, В.Г. Воеводин, Н.П. Криворотов, А.А. Вилисов, В.Г. Божков, А.В. Войцеховский [5].

В 1962 году в лабораториях Иллинойского Университета на основе структур GaAsP/GaP Н. Холоньяком (США) созданы первые промышленные светодиоды. Первая светодиодная лампочка для индикатора Monsanto создана в 1968 году. В 60-е годы были созданы светодиоды из GaP с красным и желто-зеленым свечением. Внешний квантовый выход составлял не более 0,1%, спектр излучения 500-600 нм, что было достаточные для индикации. Световая отдача светодиодов при этом составляла 1-2 лм/Вт. В 1968 году в США изготовлен первый рекламный светодиодный экран от Hewlett-Packard.

В 70-е годы прошлого столетия Ж.И. Алферов с сотрудниками разработал многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие значительно увеличить внешний квантовый выход (до 15%) за счет ограничения активной области рекомбинации для полупроводниковых материалов GaAs и AlGaAs. Для красной части спектра значение световой отдачи достигло 10 лм/Вт и более 30% КПД – для инфракрасной. В 70-х годах группа Дж. Панкова из компании IBM создала фиолетовые и голубые диоды на основе полупроводникового материала GaN. В 1976 году компанией Hewlett Packard разработаны светодиоды на основе полупроводниковых материалов фосфидов алюминия-галлия-индия которые излучали красно-оранжевый, желтый и желто-зеленый свет. С 1985 года световой поток светодиодов увеличился до 1-100 лм. В 1991 года Ш. Накамура из японской компании Nichia Chemical с помощью гетероструктуры на основе нитрида индия-галлия InGaN создал светодиод синего цвета свечения. С 1993 г. организовано серийное производство светодиодов на основе InGaN корпорацией Nichia. В 1996 году корпорацией Nichia разработан и внедрён в массовое производство светодиод белого цвета свечения на основе кристалла InGaN и фотолюминофора YAG [2].

Для масштабного применения светодиодов в освещении необходимо было решить

две основные задачи:

- повысить световую отдачу светодиодов белого цвета свечения,
- снизить тепловое сопротивление светодиодов для повышения отвода тепла с целью повышения плотности их монтажа в источнике света.

С 1999 года произошёл переход от светодиодов с выводными корпусами (тепловое сопротивление 250-75 Вт/м·К) к светодиодам с корпусами для поверхностного монтажа (тепловое сопротивление не более 15 Вт/м·К). Это позволило увеличить плотность монтажа светодиодов на печатную плату и применять автоматизированные средства технологического процесса производства светодиодных источников света.

С 2009 года появились COB (Chip-on-Board) конструкции – кристалл на плате, где на керамической основе монтируется большое количество светодиодных кристаллов и герметизируется люминофорной композицией [6].

Следующим шагом стала технология Glob Top изготовления светодиодных источников света, суть которой заключается в монтаже кристаллов на металлическую печатную плату и последующей герметизации каждого кристалла [7].

В настоящее время самым перспективным направлением развития светодиодных технологий является создание светодиодных ламп в форм-факторе лампы накаливания, где вместо нити накаливания используются светодиодные источники света (LED filament bulb).

27 февраля 2017 г. в Мюнхене в Германии компания Seoul Semiconductor, занимающая пятое место на мировом рынке по производству светодиодов, заявила о начале массового производства светодиодных ламп. Так по оценке компании мировой рынок ламп составляет 7 миллиардов штук ежегодно, из которых 2,5 миллиарда единиц светодиодные лампы на основе светодиодных излучающих элементов [8].

6 декабря 2017 г. Компания Cree (США) анонсировала светодиод белого цвета свечения с рекордным значением светового потока с единицы площади – 284 лм/мм<sup>2</sup> – светодиод XLamp XD16 [9].

Ключевыми тенденциями развития полупроводниковой светотехники в настоящее время являются:

- повышение световойдачи при комфортной коррелированной цветовой температуре и значениях индекса цветопередачи;
- повышение светового потока с единицы площади кристалла.



## 2 Физические принципы работы светодиода

Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока.

Полупроводниковый материал для светодиода белого и синего (синий цвет свечения кристалла плюс люминофор) цвета свечения представляет собой гетероэпитаксиальную структуру  $GaN/InGaN$  с множественными квантовыми ямами (МКЯ) (рисунок 2.1).

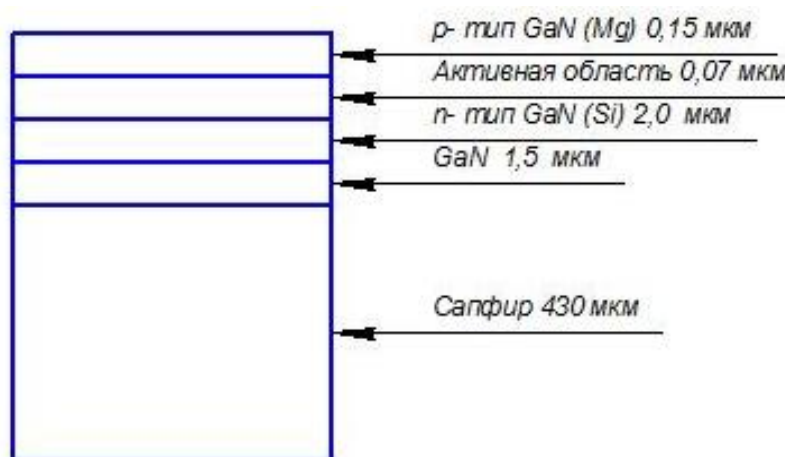


Рисунок 2.1 – Гетероструктура  $GaN/InGaN$

На рисунке 2.1 видно, что на подложке из сапфира выращена полупроводниковая структура, состоящая из ростового слоя  $GaN$ , слоя  $n$ -типа  $GaN$  легированного  $Si$ , активной области и  $p$ -типа  $GaN$  легированного  $Mg$  [10, 11].

При  $p$ - $n$  переходе, носители зарядов 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. Концентрация инжектированных носителей заряда зависит только от равновесной концентрации неосновных носителей и приложенного напряжения [12-15].

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 [16].

Для светодиодов характерен эффект стягивания тока («current crowding») под омическими контактами, который также оказывает негативное влияние на надёжность и срок службы СД [17].

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 [18-20].

Таким образом, падение напряжения на современном СД составляет от 2.9 до 3.5 В. Характеристиками эффективности работы кристалла СД являются внешний квантовый выход и КПД. Внешний квантовый выход (характеризует кристалл):

$$n_{ext} = (P / (hv)) / (I/e) = n_{int} \times n_{extract},, \quad (2.1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) светодиода:

$$n_{power} = P / (I \times U), \quad (2.2)$$

где  $P$  – мощность оптического излучения вышедшего за пределы светодиода,  $(I \times U)$  – потребляемая электрическая мощность (прямой постоянный ток, помноженный на прямое постоянное напряжение).

На сегодняшний день КПД кристалла СД составляет на промышленных образцах ~ 50%, а на лабораторных ~ 80% [2, 21-23].

Излучательная рекомбинация – единственный физический механизм генерации света в светоизлучающих диодах. Виды рекомбинации:

Межзонная рекомбинация, при которой электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону на место дырки непосредственно, излучая энергию, несколько большую ширины запрещенной зоны.

Рекомбинация свободных носителей заряда на примесных центрах: электрон – акцептор или дырка – донор, при которой носители захватываются примесными центрами, а затем рекомбинируют со свободным носителем противоположного знака.

Межпримесная, или донорно – акцепторная, рекомбинация, при которой носители захватываются примесными центрами, а затем электрон переходит с донора на акцептор в процессе акта излучательной рекомбинации; для такого перехода необходимо частичное перекрытие волновых функций электрона и дырки.

Рекомбинация связанных экситонов, при которой примесный центр захватывает электрон и дырку, так что возбуждение целиком локализуется вблизи центра, после чего осуществляется излучательная рекомбинация.

Экситонная рекомбинация, при которой электрон и дырка перед актом излучения связываются в свободный экситон, освободив часть энергии, равную энергии связи экситона.

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 [2, 14-18].

Внутренний квантовый выход гетероструктуры в современных СД близок к единице. Внутренний квантовый выход светодиода:

$$n_{int} = (P_{int} / (hv)) / (I/e), \quad (2.3)$$

где  $P_{int}$  – мощность оптического излучения, генерируемого в активной области светодиода,

$I$  – ток инжекции [2, 14, 15].

Таким образом, для повышения эффективности и надёжности светодиодных нитридных кристаллов ключевыми направлениями научных исследований являются:

- дизайн гетероструктуры, исследования МКЯ;
- работы по технологии создания и оптимального легирования  $p$ -области  $GaN$ ;
- исследования материалов, технологии нанесения и конфигурации омических контактов для снижения электрического сопротивления, снижения эффекта стягивания тока и увеличения площади вывода света.

### 3 Аналитический обзор светодиодных излучающих элементов

#### 3.1 Общие сведения

По определению, «Светодиод, СД (light emitting diode, LED) – полупроводниковый прибор с *p-n* переходом, испускающий некогерентное видимое излучение при пропускании через него электрического тока» [24].

Светодиодный излучающий элемент представляет собой интегральную сборку из герметично залитых люминофорной композицией последовательно соединённых кристаллов. Основные технические характеристики и состав испытаний должны соответствовать ГОСТ 11630-84 Приборы полупроводниковые. Общие технические условия. В соответствии с ГОСТ 11630-84 и ТЗ на выполнение работ по теме: «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» п. 4.3:

К важнейшим электрическим параметрам относится прямое напряжение  $U_{np}$ . В при заданном значении прямого тока  $I_{np}$ , мА [25].

Прямое напряжение – это контактная разность потенциалов, возникающая на выводах светодиода при протекании через него прямого тока заданного значения при температуре окружающей среды 25 °С.

Прямое направление тока – это направление тока, при котором к контактной площадке области *p*-типа полупроводникового кристалла приложен положительный потенциал относительно контактной площадки области *n*-типа.

Измерение постоянного прямого напряжения  $U_{np}$  проводят в соответствии с ГОСТ 25024.3 [26].

К важнейшим светотехническим параметрам относятся световой поток  $\Phi$ , лм при заданном значении прямого тока  $I_{np}$ , мА.

Световой поток – это величина, образуемая от лучистого потока  $\Phi_e$  при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО. В общем виде световой поток можно выразить в следующей форме:

$$\Phi = 683 \text{ (лм/Вт)} \cdot k(\lambda) \cdot P_e, \quad (3.1)$$

где  $P_e$  – оптическая мощность излучения,

$k(\lambda)$  – коэффициент чувствительности человеческого глаза к оптическому излучению с длиной волны  $\lambda$  [26].

Световой поток ламп и светодиодных модулей измеряется в фотометрическом шаре. Метод основан на сравнении освещенности, создаваемой измеряемым источником света, с освещенностью, создаваемой контрольной или светоизмерительной лампой по

ГОСТ 10771 [27] с известными световыми потоками. Источник света, светоизмерительная или контрольная лампы должны иметь близкие цветовые или коррелированные цветовые температуры, световые потоки и распределения силы света.

Для измерения светового потока применяют фотометрический шар, фотоприемное устройство, светофильтры, светоизмерительные или контрольные лампы.

Световая отдача – отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света [24], выражается в люмен делёный на Ватт (лм/Вт). Зависит от квантового выхода.

Срок службы – время, за которое измеряемые световые параметры при температуре окружающей среды 25 °С и номинальном прямом токе составляет не менее  $n\%$  от измеренных начальных значений в зависимости от температуры, выражается в часах. Зависит от способности конструкции отводить тепло [27].

Критерием, определяющим способность конструкции СД отводить тепло от активной области кристалла, является тепловое сопротивление [28]. Можно представить тепловое сопротивление СД как сумму последовательных тепловых сопротивлений активной области кристалла,  $p$ - и  $n$ - слоёв, подложки кристалла, омических контактов, клея для монтажа кристалла в корпус, корпуса, компаунда с люминофором [29]. Т.к. компаунд имеет очень низкую теплопроводность по сравнению с другими элементами (не более 0,1 Вт/м×К), считают, что всё тепло отводится через подложку кристалла, клей и корпус СД. Для каждого слоя приближённо:

$$R_t = \delta / (\lambda \times S), \quad (3.2)$$

где  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

$\lambda$  – теплопроводность вещества.

Данная формула является вполне приемлемой для проведения расчётов и моделирования.

Для практических измерений используют формулу:

$$P_e = (T_1 - T_2) / R_b, \quad (3.3)$$

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

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

Для измерения теплового сопротивления полупроводника существуют четыре метода. Для измерения теплового сопротивления СД применяют два метода. Первый заключается в подаче на СД импульсного греющего тока, а затем по изменению напряжения при малом токе вычисляют температурный коэффициент напряжения,

определяют тепловое сопротивление. Второй метод заключается в нагреве СД с помощью внешнего источника и определении его температуры активной области [27].

СД состоит из кристалла, корпуса, люминофорной композиции, клея для монтажа кристалла и проволоки для соединения контактов кристалла и корпуса.

На протяжении прошедших 25 лет конструкция СД существенно модернизировалась. Изначально широкое применение получили СД с кристаллом на металлической рамке с выводами и эпоксидной линзой с тепловым сопротивлением порядка 250 К/Вт. Современные СД имеют как правило металлокерамический корпус для поверхностного монтажа, тепловое сопротивление составляет порядка 5 К/Вт.

Внутренний квантовый выход СД близок к 100%, внешний квантовый выход 80%, а световая отдача 180 лм/Вт.

Современные достижения позволили создать светодиодный излучающий элемент (filament) и на его основе создать светодиодную лампу. Принципиальными отличиями от светодиодных модулей и светодиодных матриц является отвод тепла за счёт конвекции – без установки радиатора [30, 31].

Светодиодный излучающий элемент (СИЭ) состоит из несущей конструкции, выполненной в форме ленты с размерами, примерно,  $40 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$ , на который с помощью теплопроводящего клея смонтированы кристаллы из *InGaN* планарного типа прямоугольной формы порядка 30 шт., кристаллы соединены проволокой по последовательной электрической схеме и герметично залиты люминофорной композицией из люминофора *YAG* и оптически прозрачного компаунда.

СИЭ работает от постоянного прямого тока 10-15 мА, благодаря последовательной схеме, постоянное напряжение составляет от 65 до 80 В, световой поток одного СИЭ превышает 100 лм. В зависимости от типа лампы накаливания – аналога по световому потоку, светодиодная лампа комплектуется СИЭ в количестве, указанном в таблице 3.1.

Количество СИЭ в колбе лампы ограничивается:

- геометрическими размерами колбы,
- способностью конструкции лампы отвести тепло от СИЭ с помощью конвекции через колбу.

Таблица 3.1 Зависимость количества СИЭ от типа лампы накаливания – аналога по световому потоку для СИЭ со световым потоком 90 лм

Мощность лампы накаливания, Вт [ГОСТ Р 52706-2007]	Световой поток, лм [ГОСТ Р 52706-2007]	Количество СИЭ в СД лампе, шт.	Мощность светодиодной лампы, Вт
25	235	3	2,25
40	415	5	3,75
60	710	8	6
75	935	10	7,5
100	1250	14	10,5
150	2070	23	17,25
200	3040	34	25,5

Таким образом, чем выше световая отдача СИЭ, тем меньше их количество в лампе (рисунок 3.1), тем ниже себестоимость лампы [27].

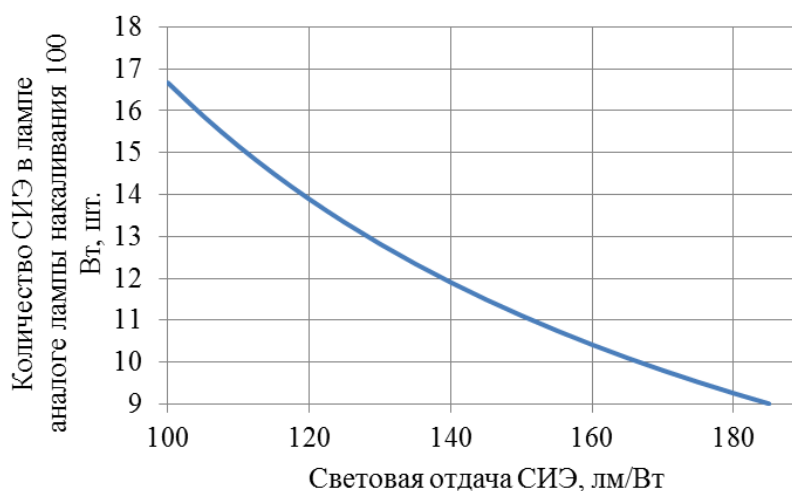


Рисунок 3.1 – График зависимости количества СИЭ в лампе, для лампы – аналога лампы накаливания мощностью 100 Вт

В соответствии с ТЗ необходимо провести аналитический обзор и сравнительный анализ по комплектности и техническим характеристикам функциональных аналогов СИЭ мировых производителей, провести аналитический обзор и сравнительный анализ составных частей СИЭ: светодиодный кристалл, люминофорная композиция, теплопроводящий клей; а также технологических операций монтажа кристалла,

микросварки контактов кристалла проволокой, нанесения люминофорной композицией.

### 3.2 Светодиодный кристалл

Светоизлучающий диод представляет собой кристалл полупроводника с электронно-дырочным переходом и омическими контактами и элемент конструкции, предназначенный для сбора излучения, увеличения внешней оптической эффективности, улучшения восприятия свечения и формирования необходимой диаграммы направленности излучения, а также обеспечения электрического контактирования с внешней цепью и удобного монтажа прибора в аппаратуре. Светоизлучающий диод – это такой прибор, в котором осуществляется генерация света и перераспределение его в пространстве [2, 5].

Появление света возникает при рекомбинации электронов и дырок в области *p-n*-перехода. Для того чтобы образовался *p-n*-переход, необходим контакт двух полупроводников с разными типами проводимости. При этом приконтактные слои полупроводникового кристалла легируют разными примесями: с одной стороны акцепторными, с другой – донорными. Но не всякий *p-n*-переход излучает свет [2].

Ширина запрещенной зоны в активной области светодиода близка к энергии квантов света видимого диапазона. Вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой для этого полупроводниковый кристалл должен иметь мало дефектов.

По своей конструкции светодиодные кристаллы разделяются на планарные (lateral) и вертикальные (vertical) светодиодные кристаллы [32].

Производство планарных и вертикальных кристаллов начинается с роста гетероструктуры на выбранном материале подложки. В дальнейшем подложка остаётся в структуре планарных светодиодных кристаллов, тогда как из структуры вертикальных кристаллов подложка либо удаляется, либо остаётся в структуре и исполняет роль электрического контакта в случае высокой электропроводности материала подложки.

Сапфир является самым распространённым материалом для подложки. Поскольку он является диэлектриком, оба электрических контакта латерального кристалла располагаются на верхней поверхности сформированной гетероструктуры. Конструкция вертикальных кристаллов формируется так, чтобы электрические контакты находились по обеим сторонам гетероструктуры: сверху и снизу. В этом случае можно обеспечить более равномерное растекание тока, а также уменьшить количество излучения, поглощённого поверхностями контактов. Площадь верхнего контакта делают гораздо меньше площади нижнего, за счет чего поглощение и переотражение также снижается по сравнению с



поглощением контактами планарных чипов. Кристалл имеющий размеры  $300 \times 300 \text{ мкм}^2$ , при этом участок  $100 \times 100 \text{ мкм}^2$  занимают контактные площадки, то на четырёхдюймовой пластине 10% поверхности займут контакты. Конструкция вертикальных чипов обеспечивает лучший отвод тепла из активной области кристалла [32].

По способу монтажа светодиодные кристаллы подразделяются на монтируемые микросваркой проволокой и flip-чипы.

Flip-Chip («перевернутый кристалл») – метод монтажа кристаллов на печатные платы и другие подложки, при котором кристалл устанавливается на выводы, выполненные непосредственно на его контактных площадках. Выводы Flip-Chip выполняются различными способами: приваренными золотыми шариками, оплавлением паяльной пасты, из проводящего клея и др [33].

В большом количестве выращиваются светодиодные чипы на сапфировых подложках. Эти чипы имеют характеристики ниже, чем чипы, выращенные на *SiC*, но при этом они значительно выигрывают у них в стоимости.

Светодиодные чипы, выращенные на *SiC*, получают ростом светоизлучающих структур *InGaN* на подложках *SiC*. Эти подложки обладают высокой тепло- и электропроводностью и поэтому используются как нижний контакт, что приводит к следующим положительным эффектам:

- к отводу тепла от *p-n* перехода (тепловое сопротивление *p-n* переход – корпус чипа составляет всего  $2\text{--}5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ );

- к увеличенной площади излучения, в 4 раза бóльшей, чем у чипа на подложке из сапфира;

- к тому, что нижний электрический контакт занимает всю площадь нижней грани, так что вся площадь активной области работает при одинаковой плотности тока, и нет локализации излучения и тока;

- к высокой механической прочности эвтектического соединения чипа и корпуса светодиода;

- к тому, что светодиодный чип имеет большой динамический диапазон и запас по импульсным токовым нагрузкам. Линейность люмен-амперной характеристики сохраняется вплоть до тока 120 мА, что соответствует его плотности почти в  $200 \text{ А}/\text{см}^2$ . Едва достигнув плотности тока  $100\text{--}120 \text{ А}/\text{см}^2$ , латеральные чипы теряют линейность.

Корпорация Cree является известной компанией, занимающейся разработкой и производством светодиодных чипов *GaN* на *SiC*. Теоретически и практически светодиоды *GaN/SiC* достигают лучшей производительности и эффективности [9].

Преимуществом системы *GaN* на *Si* перед чипами на сапфире является потенциальное снижение стоимости изготовления светодиодных чипов (стоимость подложки сейчас составляет 30% себестоимости чипа на сапфире). Обычный размер сапфировых подложек – 2 дюйма, в то время как в кремниевой технологии используются подложки диаметром до 8 дюймов. Увеличение площади ростовой поверхности за один производственный цикл существенно увеличивает количество производимых чипов, что снижает их цену. К основным компаниям, развивающим технологию *GaN* на *Si* для светодиодов, относятся следующие:

– Osram Opto Semiconductor, Германия. В 2012 г. эта компания изготовила прототипы белых и синих светодиодов *InGaN* на 150 мм кремниевых подложках [34];

– Azzurro Semiconductors, Германия. Эта компания выращивает *GaN* светодиоды на 150 мм *Si* подложках по запатентованной технологии, которая позволяет создавать слой *GaN* толщиной 8 мкм. Изгиб 150 мм подложки при этом не превышает 20 мкм, что позволяет использовать стандартный процесс CMOS для массового производства светодиодов [35].

– Bridgelux, США. Эта компания разрабатывает технологию *GaN* на *Si* и планирует перейти к серийному производству [38].

– Siltronic AG, Бельгия, совместно с Исследовательским институтом нанoeлектроники разрабатывает процесс роста устройств на подложках *Si* диаметром 200 мм [37].

Одна из трудностей развития данной технологии заключается в разных коэффициентах термического расширения *Si* и *GaN* при температуре роста 1000 °C. При охлаждении эти материалы начинают растрескиваться. Введение дополнительного слоя, сжимающего *GaN* перед нагревом, позволяет выращивать светодиодные структуры без трещин. Светодиодные чипы, выращенные на *GaN*. Такие чипы обладают в 1000 раз меньшей плотностью дислокаций по сравнению с выращенными на сапфире. Рабочая плотность тока увеличена в них до 250 А/см<sup>2</sup> (в чипах на сапфире она составляет всего 100 А/см<sup>2</sup>). Стоимость подложки из *GaN* существенно превышает стоимость подложки из сапфира. Компания Soraа изготавливает чипы с площадью – 0.07 мм<sup>2</sup>. Площадь поверхности чипа во много раз больше площади поверхности перехода, что обеспечивает повышенный вывод генерируемого излучения [38].

Таким образом, для изготовления СИЭ наиболее применимы кристаллы малой мощности планарного типа, т.к. для маломощных кристаллов не требуется специальных радиаторов для отвода тепла, а планарный тип кристалла позволит соединять кристаллы по последовательной электрической схеме что обеспечит их равномерную нагрузку в СИЭ

и планарный тип кристалла не требует специальной электрической разводки контактов на несущей конструкции СИЭ.

### 3.3 Люминофорная композиция

Люминофорная композиция состоит из люминофора и оптически прозрачного компаунда. «Люминофор – вещество, способное преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение (люминесцировать)» [39].

По химической природе люминофоры разделяются на неорганические, большинство из которых относится к кристаллофосфорам, и органические.

Как правило люминофор имеет порошкообразную консистенцию, его используют для получения источника белого света. Люминофор переизлучает поглощенную энергию от коротковолнового излучения кристалла, в длинноволновую область спектра. Люминофоры, длина волны излучения которых меньше длины волны максимума поглощения, называются антистоксовыми люминофорами. Они имеют низкую эффективность преобразования. Максимум эффективности от светодиода, в конструкции которого использован люминофор, можно получить в случае, если пиковая длина волны излучения кристалла совпадет с длиной волны максимума поглощения люминофора, и при этом и кристалл, и люминофор являются высокоэффективными. Если координаты цветности кристалла и люминофора пересекают область белого света на диаграмме цветности, подобранная должным образом концентрация люминофора позволяет изготовить источник белого света [40].

Для получения источников белого света на основе систем «светодиодный кристалл – люминофор» используются силикатные, алюминатные, нитридные люминофоры, легированные металлами редких земель:  $YAG:Eu$ ,  $CaMoO_4:Eu$ ,  $Y_3(Al,Si)_5(O,N)_{12}:Ce$ ,  $Sr_2Si_5-xAl_xO_xN_8-x:Eu$  и другие. Цвет свечения таких люминофоров – зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. В светодиодной промышленности наиболее распространены люминофоры на основе иттрий-алюминиевых гранатов (ИАГ), легированных трёхвалентным церием, и на основе силикатов щелочно-земельных металлов, легированных европием. Активно развиваются люминофоры на основе оксинитридных соединений. Люминофоры на основе ИАГ обладают на данный момент квантовым выходом более 90% в отличие от силикатных [41, 42].

К гранатам относятся соединения, имеющие общую формулу состава типа  $A_3B_5O_{12}$  или  $A_3B_2(BO_4)_3$  где  $A$  – ионы иттрия или лантаноидов;  $B$  – алюминий, галлий, железо, индий, хром и др. Эти соединения имеют кубическую решетку структурного типа граната. Пространственная группа  $B$  элементарную ячейку входят 8 формул. Алюминий,

галлий или железо занимают два типа узлов с различной кислородной координацией: 16 октаэдрических положений и 24 тетраэдрических положения; а – узлы образуют объемноцентрированную кубическую решетку. 24 иона *A*-типа (иттрий или лантаноиды) обладают додекаэдрической координацией (с-положения). Ионы типа *A* и тетраэдрические атомы типа *B* расположены на средних линиях граней куба. Кислородные октаэдры, координирующие узлы, искажены и повернуты таким образом, что образуются 8 неэквивалентных а-положений. Кислородные тетраэдры также искажены и повернуты и образуют 6 неэквивалентных -положений. Ионы *A*, координированные восемью ионами размещенными в вершинах искаженного куба, также имеют 6 неэквивалентных положений.

Иттрий–алюминиевые гранаты могут быть выращены различными методами. Однако в промышленных масштабах кристаллизация их осуществляется в основном из расплавов методом Чохральского и направленной кристаллизации (зонной плавки) и в меньшей степени из раствора в расплаве.

Спектры поглощения и возбуждения – зависимости относительной величины энергии, поглощённой люминофором от  $\lambda_{возб}$ . Эти спектры определяются свойствами активатора (активаторов) и кристаллической решётки основы люминофора. Часть спектра, обусловленная поглощением активаторами, называется активаторной областью (полосой), а обусловленная поглощением в основе (решётке) – основной или фундаментальной полосой поглощения. Спектр поглощения состоит из спектра активного поглощения, вызывающего люминесценцию, и полосы поглощения, не приводящего к возникновению свечения [42].

Спектр возбуждения – это спектр активного поглощения.

Спектр излучения – распределение энергии излучения (люминесценции) по длинам волн. Полосы излучения как правило широкие и только у люминофоров с РЗМ-активаторами – узкие. Причиной большой ширины полос излучения является воздействие ионов основной решётки на энергетические состояния ионов активатора. Спектр излучения зависит от химической природы активатора и основы люминофора и их взаимодействия, а если имеется несколько активаторов – то и от их взаимодействия. Концентрация активатора влияет не только на интенсивность полосы, но и на положение полосы излучения.

Квантовый выход люминесценции:

$$B_{кв} = N_l / N_n, \quad (3.4)$$

где  $N_l$  – число излученных квантов,

$N_n$  – число поглощённых квантов.

Энергетический выход люминесценции:

$$B_{эн} = E_l / E_n, \quad (3.5)$$

где  $E_l$  – энергия люминесценции,

$E_n$  – поглощённая энергия. Эта величина характеризует полноту преобразования энергии и зависит от потерь на тепло. Связь  $B_{эн}$  и  $B_{кв}$  можно выразить формулой:

$$B_{эн} = E_l / E_n = (\eta \nu_l N_l) / (\eta \nu_n N_n) = (\nu_l / \nu_n) B_{кв} = (\lambda_n / \lambda_l) B_{кв}, \quad (3.6)$$

где  $\nu_l / \nu_n$  – отношение частот фотона люминесценции и поглощённого фотона,

$\lambda_n / \lambda_l$  – отношение длин волн. Это выражение говорит о том, что  $B_{эн}$  растёт с приближением полос излучения и поглощения.

Значения величин  $B_{эн}$  и  $B_{кв}$  зависят от состава и технологии изготовления люминофора, при этом очень большое влияние оказывает присутствие посторонних примесей и концентрация активатора, а также условия возбуждения и температура. Для ртутных ЛЛ низкого давления  $B_{эн}$  мал из-за большой разницы  $\lambda_{возб}$  (254 и 185 нм) и  $\lambda_{люм.}$  Для безртутных ЛЛ (разряд в инертных газах)  $B_{эн}$  ещё меньше.  $B_{эн}$  можно повысить при применении вместо ртути  $Cd$  (326 и 224 нм), но при этом возникают большие проблемы с получением оптимального давления паров  $Cd$  (~ 1 Па) [41].

Ученые Сколковского института науки и технологий (Сколтех) вместе с коллегами из Саутгемптонского университета (University of Southampton, Англия), корпорации Luxtaltek (Luxtaltek Corporation, Тайвань) и Национального университета Цзяотун (National Chiao Tung University, Тайвань) спроектировали новую белую светодиодную структуру с рекордными показателями эффективности.

Чтобы получить белый светодиод, используют полупроводник на основе нитрида галлия  $GaN$ , который при пропускании электрического тока излучает свет в синем и ультрафиолетовом диапазоне. Фотоны этого излучения поглощаются люминофорами – веществами, которые преобразуют часть излучения светодиода в свет уже в относительно широкой спектральной полосе с максимумом в области жёлтого. При смешивании излучение светодиода и люминофора даёт белый свет различных оттенков.

Группа ученых Массачусетского Технологического института (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge) предложила использовать в качестве люминофора квантовые точки – часть полупроводника, носители заряда которого ограничены во всех трех измерениях. Выгода использования квантовых точек заключается в возможности ими управлять. Чем меньше размер кристалла-полупроводника, тем больше расстояние между энергетическими уровнями. При переходе электрона на энергетический уровень ниже испускается фотон. Поскольку можно регулировать размер квантовой точки, то оказывается возможным изменять энергию испускаемого фотона, следовательно,

изменять цвет испускаемого квантовой точкой света [41, 43].

В первых прототипах белых светодиодов люминофор наносился отдельным слоем поверх синего светодиода нитрида галлия (*GaN*). Большая часть излучения нитрида галлия отражалась от границы раздела слоев, не доходила до квантовых точек, и устройство показывало низкую эффективность.

В новом исследовании авторы предложили использовать другую гибридную структуру. В ней квантовые точки оказались расположены внутри синего светодиода с определенной периодичностью. Это значительно улучшило эффективный квантовый выход (отношение числа излученных фотонов к числу поглощенных): эффективный квантовый выход нового устройства составил 110 % [44-46].

Оптически прозрачный компаунд представляет собой оптически прозрачное вещество на основе эпоксидной смолы или полидиметилсилоксана с функциональными группами и вспомогательными веществами (для аддитивного сшивания) и отвердителем на основе полидиметилсилоксана с водородными группами.

Оптически прозрачный компаунд со стандартным показателем преломления позволяет создавать светодиоды высокой мощности с заданными оптическими свойствами.

Силиконовые компаунды могут использоваться отдельно, либо в смешанном с люминофором виде. После термообработки силиконовые компаунды отверждаются в гелях, эластомеры или твердые смолы [3].

Основные характеристики

Коэффициент пропускания – безразмерная физическая величина, равная отношению потока излучения, прошедшего через компаунд, к потоку излучения, упавшего на его поверхность.

Спектральный коэффициент светопропускания – в процентах для определённой длины волны излучения.

Показатель преломления – отношение скоростей света в вакууме и в компаунде.

Доля вышедшей из светодиода оптической мощности может быть определена по формуле:

$$P_{\text{внеш}} / P_{\text{внутр}} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2), \quad (3.7)$$

где  $P_{\text{внеш}}$  – оптическая мощность вышедшая из светодиода, Вт;

$P_{\text{внутр}}$  – оптическая мощность прошедшая из кристалла в компаунд, Вт;

$n_1$  и  $n_2$  – показатель преломления для компаунда и для воздуха соответственно.

Для воздуха показатель преломления составляет 1, показатель преломления компаунда составляет от 1,41 до 1,5.

Твёрдость по Шору – метод измерения твёрдости низкомолекулярных материалов по принципу вдавливания в материал индентора – закаленного стального стержня с определённым диаметром.

Например, для силиконового герметика твёрдость по Шору составляет 10-25, для автомобильной шины 60-70. Компаунды после затвердевания могут иметь значения твёрдости по Шору от 25 до 75.

Вязкость компаунда при нанесении кистью должна быть 30 - 40 с, а при нанесении краскораспылителем 18 - 22 с.

Время, в течение которого вязкость компаунда нарастает до загустевания и потери жидкотекучего состояния (отрыв нити), считается временем жизнеспособности компаунда.

Пластификатор – вещество, понижающее вязкость компаунда и придающее ему после отверждения эластичность и ударную вязкость.

Заливка обмоточных изделий этими компаундами обычно сочетается с пропиткой, так как вязкость компаунда незначительна. Отвердевание компаунда происходит в результате его полимеризации в течение примерно 8 - 10 ч при температуре около 120 °С.

Эпоксидный компаунд при пропитке обмоток старится, поэтому следует по возможности сократить время пропитки путем снижения вязкости компаунда (до 20 – 40 с), что достигают рациональной технологией, при которой обеспечивается его постоянное обновление [47, 48].

Для изготовления люминофорной композиции СИЭ наиболее подходят люминофоры типа YAG имеющие спектр возбуждения в диапазоне длин волн оптического излучения 450-460 нм, и излучающие в широком оптическом спектре с максимумом 445-455 нм. Компаунд необходимо выбирать такой, чтобы его показатель преломления составлял 1,41, что подходит для эффективного вывода света при переходах оптических сред кристалл – люминофорная композиция и люминофорная композиция – воздух. Температура полимеризации компаунда не должна превышать 125 °С, так как более высокая температура приводит к разрушению активатора люминофора YAG.

### 3.4 Теплопроводящий клей

Клей предназначен для монтажа кристаллов планарного и вертикального типа в корпус светодиода или на несущую конструкцию светодиодной матрицы. При скреплении деталей теплопроводящий клей обеспечивает отвод тепла от элементов, которые нагреваются во время работы. Во время использования раствор выдерживает большие температуры, что позволяет элементам оставаться на своих местах, не деформироваться и

не перегреваться.

По физико-химическому состоянию и (или) принципу склеивания клеи подразделяют на следующие классификационные группировки:

- растворные;
- дисперсионные;
- эмульсионные;
- активируемые растворителем;
- активируемые теплом;
- расплавы;
- порошкообразные;
- пленочные;
- чувствительные к давлению;
- липкие;
- контактные;
- 12)капсулированные;
- анаэробные;
- герметики.

Для монтажа светодиодных кристаллов клеи можно разделить на следующие группы:

- диэлектрические;
- с УФ отверждением;
- электропроводящие [49].

Клей представляет собой полимерную композицию, состоящую из полимерной матрицы, наполненной микрочастицами металла (в основном, серебра).

Состоит, как правило, из двух компонентов: основного и отвердителя. При смешивании этих компонентов получается вязкое вещество [49].

Плотность – это отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму.

$$\rho = m / V \quad (3.8)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – масса, кг;  $V$  – объём, м<sup>3</sup>.

Тиксотропный индекс – способность клея уменьшать вязкость при механическом воздействии и увеличивать вязкость в состоянии покоя. Для клеев в микроэлектронике составляет от 2 до 7.

Показатель вязкости – свойство текучих веществ оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.



Переход в стеклообразное состояние происходит при значениях вязкости  $10^{11} - 10^{12}$  Па·с (1 Паскаль в секунду = 1000 сантипуаз).

Динамическая вязкость определяется по формуле Бачинского:

$$n = c/(VM - b) \quad (3.9)$$

где  $n$  – динамическая вязкость, Па·с;

$c$  и  $b$  – константы;

$VM$  – молярный объём вещества.

Для клеев в микроэлектронике значение динамической вязкости составляет от 7 до 55 Па·с.

Температура стеклования – температура, при которой не кристаллизующееся или не успевающее закристаллизоваться вещество становится твёрдым, переходя в стеклообразное состояние.

Для клеев в микроэлектронике составляет от 40 до 175 °С.

Прочность на сдвиг – максимальная разрушающая сила при растяжении образца, склеенного внахлест, усилиями, стремящимися сдвинуть одну половину образца относительно другой.

Для клеев в микроэлектронике составляет от 7 Н/мм<sup>2</sup> до 620 Н/см<sup>2</sup>.

Модуль упругости – общее название нескольких физических величин, характеризующих способность твёрдого тела упруго деформироваться при приложении к нему силы.

Модуль упругости определяется по закону Гука:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3.10)$$

где  $E$  – модуль упругости (1 МПа = 10 кгс/см<sup>2</sup>),

$\sigma$  – механическое напряжение, вызываемое в образце действующей силой (Па),

$\varepsilon$  – упругая деформация образца, вызванная напряжением.

Теплопроводность – это способность материала передавать тепло от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела.

В соответствии с тепловым законом Ома физически влияние теплопроводности материала на передачу тепла можно описать следующей формулой:

$$P_{ab} = \lambda_{ab} (T_a - T_b) \quad (3.11)$$

где,  $P_{ab}$  – тепловой поток между плоскостями  $a$  и  $b$  с температурами  $T_a$  и  $T_b$ ,

$\lambda_{ab}$  – теплопроводность, измеряется в единицах мощности делёной на произведение единиц расстояния и температуры. Примерные значения теплопроводности для материалов, используемых в электронике приведены в таблице 3.2.

Прозрачность – свойство вещества направленно пропускать свет; характеризуется

отношением величины потока излучения, прошедшего без изменения направления через слой среды единичной толщины, к величине потока излучения, вошедшего в эту среду в виде параллельного пучка (то есть при исключении влияния поверхностей раздела), характеризуется безразмерным коэффициентом пропускания.

Электропроводность – способность тела проводить электрический ток, а также физическая величина, характеризующая эту способность и обратная электрическому сопротивлению.

$$G = \sigma (S / L), \quad (3.12)$$

где  $G$  – электрическая проводимость (См/м),

$\sigma$  – удельная проводимость,

$S$  – площадь поперечного сечения проводника,

$L$  – длина проводника.

Таблица 3.2 Примерные значения теплопроводности для материалов, используемых в электронике

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Графен	5300
Алмаз	1000
Графит	278
Карбид кремния	490
Серебро	430
Медь	401
Оксид бериллия	370
Золото	320
Алюминий	202
Нитрид алюминия	200
Нитрид бора	180
Кремний	150
Латунь	97
Железо	92
Платина	70
Олово	67
Сталь	47

Удельное электрическое сопротивление – способность тела проводить электрический ток, а также физическая величина, характеризующая эту способность и обратная электрическому сопротивлению.

Единица измерения удельного сопротивления Ом·м.

$$\rho = (R \cdot S) / l, \quad (3.13)$$

где,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление (Ом·мм<sup>2</sup>/м),

$R$  – электрическое сопротивление,  
 $S$  – площадь поперечного сечения проводника,  
 $l$  – длина проводника.

Твёрдость по Шору – метод измерения твёрдости низкомодульных материалов по принципу вдавливания в материал индентора – закаленного стального стержня с определённым диаметром [49].

Для СИЭ целесообразно использовать теплопроводящие клеи диэлектрические с теплопроводностью порядка 2 Вт/(м·К) и более, а также желательно чтобы теплопроводящий клей был прозрачный.

### 3.5 Технология монтажа кристалла

Посадка (монтаж) кристаллов может осуществляться двумя способами — с помощью эвтектических сплавов или с использованием адгезивов. Операция должна обеспечить прочное закрепление кристалла на знакоместе, надежное электрическое соединение и необходимый теплоотвод.

Для монтажа на эвтектику применяют сплавы золото-германий и золото-кремний. Сплав золото-германий состоит из 88% золота и 12% германия, температура плавления составляет 356 °С. Сплав золото-кремний представляет собой 94% золота и 6% кремния, температура плавления 370 °С. Наиболее применимым в производстве является сплав золото-германий, в силу того, что золото-кремний сложен в приготовлении и часто наблюдается расслоение. Пайка происходит при температурах около 410 °С в нейтральной атмосфере (азот) для уменьшения окислительных процессов припоя.

Монтаж кристаллов на адгезивы осуществляют с применением разных полимеров в чистом виде, либо с различными наполнителями (например эпоксидные смолы). По составу полимеры подразделяются на токопроводящие и диэлектрические. Токопроводящие клеи в качестве наполнителя содержат металл (серебро, алюминий) в виде порошка с микро- и наноразмерными частицами. Отверждается такой клей в течение часа при температуре около 170–180 °С. Диэлектрические адгезивы полимеризуются на протяжении того же времени при температуре около 130–150 °С.

Наиболее распространенным является метод посадки кристалла на адгезив ввиду его простоты и экономичности, позволяющий получать соединения различных материалов и не требующий сложного технологического оборудования [52].

### 3.6 Технология микросварки проволокой контактов кристалла

Образование сварного соединения (по материалам статей [53-56]). Для разварки

выводов полупроводникового кристалла возможно использование двух методов микросварки: ультразвуковая (УЗС) и термозвуковая сварка (ТЗС). А также 2 основных способа соединения – «шарик-клин» и «клин-клин».

Ультразвуковая сварка – метод микросварки, при котором присоединение проволоки происходит под совместным влиянием ультразвуковых (УЗ) колебаний и силы прижима сварного инструмента. При помощи ультразвуковой энергии происходит сухое трение свариваемых поверхностей и очищение их от неорганических загрязнений, обеспечивая соединение. Для УЗС характерно соединение типа «клин-клин». Частота генерируемого УЗ лежит в пределах от 18 до 180 кГц.

Процесс УЗС без нагрева в общем случае подчиняется трехстадийной кинетике. Образование физического контакта между свариваемыми поверхностями. На первой стадии проволока деформируется в под действием приложенной нагрузки к инструменту. Оксидные пленки на свариваемых поверхностях частично разрушаются. Свариваемые поверхности сближаются на расстояния атомного взаимодействия, происходит схватывание в отдельных точках. Активация поверхностей. На второй стадии под действием УЗ-колебаний (приложение тангенциальной составляющей нагрузки) в проволоке возникает напряжение сдвига, приводящие к увеличению разрыва поверхностной оксидной пленки, а также колебательное перемещение проволоки параллельное плоскости контактной площадки. Эти перемещения способствуют вытеснению оксидной пленки и других загрязнений с контактирующих поверхностей во впадины микрорельефа. На это расходуется большая часть энергии колебаний. Вследствие разогрева проволоки трением о контактную площадку возникает пластическая деформация, в результате чего точки схватывания разрастаются в пятна и создаются условия для диффузии в объеме соединения. Колебания увеличивают площадь контакта трущихся поверхностей, вызывая рост температуры в месте касания. Металлы притираются до тех пор, пока расстояние между кристаллическими решетками станет равное межатомному. Температура пятна касания достигает максимума и стимулирует взаимную диффузию атомов в дислокации решеток, происходит термический отпуск металлов в зоне сварки и объемное развитие взаимодействия. На последней стадии происходит уплотнение зоны соединения за счет образования прочных химических связей как в плоскости контакта, так и в его объеме вследствие процесса диффузии. Теплота, выделяемая при трении клина о поверхность приваренной проволоки, расходуется на нагрев пятна сварки, что вызывает дальнейший отпуск металла в месте сварки. Процесс отпуска стабилизирует зону сварки, поскольку из-за постепенного отверждения металлов в зоне диффузии соединение получается пластичным. Далее приложенные нагрузки

снимаются и происходит релаксация напряжений в сварной зоне.

Процесс термозвуковой сварки аналогичен процессу УЗС. Отличие заключается в постоянном воздействии температуры подогрева в зоне сварки. Рабочая область нагревается в среднем от 100 °С до 150 °С, время образования сварного соединения лежит в пределах 20–200 мс.

ТЗС способом «шарик-клин» начинается с формирования шарика на конце проволоки методом электрического разряда *EFO* (Electric Flame Off). Для возникновения пробоя между проволокой и электродом необходимо подать напряжения порядка 3,5–4,5 кВ при токе около 40 мА. Разряд разогревает воздух до необходимой температуры оплавления проволоки (температура около 1063 °С) и вокруг кончика проволоки возникает плазменная оболочка. Расположение оболочки зависит от полярности подаваемого напряжения – при положительном потенциале на электроде плазма охватывает весь кончик проволоки, а при отрицательном – только ее нижнюю часть. Системы с подачей отрицательного потенциала на электрод (*NEFO* – Negative Electric Flame Off) технически сложнее и, соответственно, дороже, чем с подачей положительного потенциала.

Но главным преимуществом системы *NEFO* является меньший износ сварного инструмента (капилляра) из-за отсутствия контакта его с плазменной оболочкой. После формирования шарика сварной инструмент опускается и совершает соединение проволоки в первой точке. Затем он поднимается и движется ко второй точке сварки, формируя петлю. Она может быть образована прямоугольным либо реверсивным движением инструмента. Выбор движения зависит от размера петли, который определяется расстоянием и разностью высот между точками сварки. Затем создается соединение во второй точке. Инструмент поднимается и обрывает проволоку, оставляя небольшой кончик для создания нового соединения. К достоинствам ТЗС для соединений типа «шарик-клин» и «клин-клин» следует отнести возможность получения соединения разнородных материалов. Особенно эффективно применение этого способа для приварки золотой проволоки к алюминиевым, золотым и серебряным покрытиям контактных площадок кристаллов и корпусов изделий электронной техники. Также постоянное воздействие температуры в зоне сварки дает возможность снизить величины значений других параметров процесса формирования соединения. Это преимущество делает термозвуковую сварку более привлекательной для работы с полупроводниковыми кристаллами, чем ультразвуковую.

### 3.7 Технология нанесения люминофорной композиции

Пространственное расположение люминофора сильно влияет на однородность цвета и эффективность источников белого света. Существует несколько способов расположения люминофора внутри светодиода: ближнее, ближнее конформное и удаленное. На рисунках 3.2–3.3 показаны схематичные представления расположения люминофора внутри светодиода.

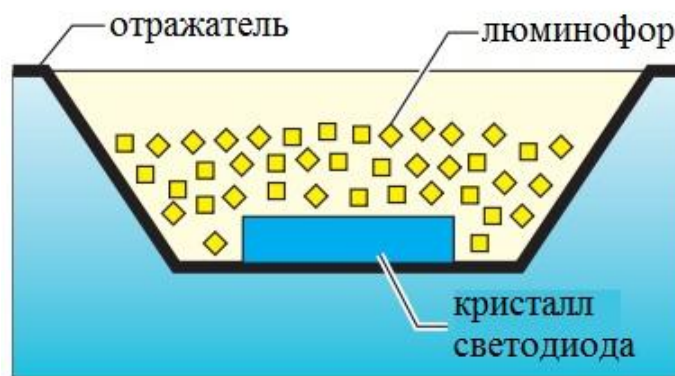


Рисунок 3.2 – Ближнее расположение люминофора

При ближнем расположении люминофор размещается в непосредственной близости от светодиодного кристалла или на его поверхности. При удаленном расположении люминофор пространственно отделен от кристалла светодиода некоторым расстоянием, чаще всего оптически прозрачным компаундом. Схематично это представлено на рисунке 3.3.

Частицы люминофора смешиваются с оптически прозрачным компаундом. Затем данной композицией заполняется чашка отражателя, в которую помещен кристалл светодиода. На частицы люминофора действует сила тяжести, сила Архимеда (выталкивающая сила) и сила трения, которые определяют пространственное распределение частиц люминофора (рисунок 3.3).

Частицы люминофора смешиваются с оптически прозрачным компаундом. Затем данной композицией заполняется чашка отражателя, в которую помещен кристалл светодиода. На частицы люминофора действует сила тяжести, сила Архимеда (выталкивающая сила) и сила трения, которые определяют пространственное распределение частиц люминофора. В результате действия этих сил ближе к поверхности кристалла оказываются более тяжелые частицы люминофора [2,44].



Рисунок 3.3 – Ближнее конформное расположение люминофора

При ближнем конформном расположении (рисунок 3.3) люминофор наносится непосредственно на сам кристалл, а не на всю поверхность как на рисунке 3.3. Источники света с конформным расположением люминофора характеризуются малой площадью излучения и высокой яркостью, что делает их пригодными для использования в различных оптических системах.

Такое нанесение люминофора можно производить в процессе формирования полупроводниковой структуры, а не сборки светодиода, что позволяет снизить как затраты на изготовление источников света, так и себестоимость всего изделия.

Но, несмотря на все преимущества, такая система расположения люминофора имеет свои существенные недостатки. Основным недостатком является поглощение излучения кристаллом. Излучение люминофора, направленное на кристалл может быть поглощено, так как ни кристалл, ни контакты не имеют высокого коэффициента отражения [2].

Чтобы устранить недостаток ближнего конформного расположения, был создан способ удаленного расположения люминофора (рисунок 3.4). При таком способе существенно снижается вероятность попадания излучения на полупроводниковый кристалл с низкой отражающей способностью.

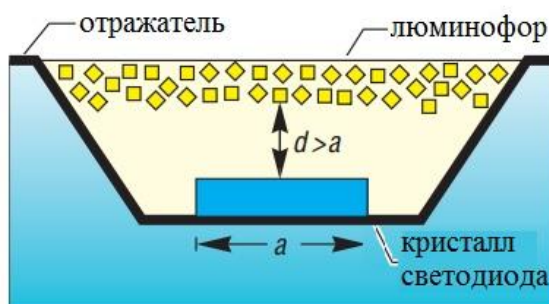


Рисунок 3.4 – Удаленное расположение люминофора

При удаленном расположении люминофора первичный источник (кристалл светодиода) пространственно удален от вторичного источника (люминофора) оптически прозрачным компаундом. Если расстояние между кристаллом и люминофором  $d$  превышает поперечные размеры кристалла  $a$ , то есть  $d > a$ , как показано на рисунке 5, то вероятность попадания излучения люминофора на поверхность полупроводника значительно снижается. В результате значительно повышается эффективность источника.



## 4 Обзор светодиодных ламп

### 4.1 Конструкция ламп

Светодиодные лампы для общего освещения можно разделить на лампы с единичными светодиодами, лампы с мощными светодиодными матрицами типа COB и лампами со светодиодными излучающими элементами. По оценке Seoul Semiconductor на 27 февраля 2017 г. мировой рынок ламп оценивается в 7 миллиардов штук ежегодно, из которых 2,5 миллиарда единиц светодиодные лампы на основе светодиодных излучающих элементов.

Светодиодные лампы – это твердотельные источники света, самые современные источники света. Светодиодные лампы представляют собой технические устройства, состоящие из следующих основных конструктивных элементов: светодиоды; светодиодные драйверы; цоколь; корпус; радиатор, оптическая система из отражателя и рассеивателя. К отличительным особенностям такого светодиодного источника света относятся: форма рассеивателя, отражателя и радиатора, а также устройство светодиодного модуля. Светодиодные модули для светодиодных ламп выполняются либо на дискретных светодиодах, либо на светодиодах, выполненных по технологии «чип на плате» (COB). Таким образом, светодиодная лампа представляет собой конструкцию, соединяющую в одном корпусе полупроводниковый источник излучения света, оптическую систему, радиатор для отвода излишков тепла и блок питания (драйвер) (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Составные части светодиодной лампы

Форма и внешний вид светодиодов различаются у разных производителей. Но отдельные светодиоды являются лишь элементной базой для конструирования светодиодных ламп и светильников – световых приборов. Лампы и светильники должны обеспечивать нужный для каждого конкретного применения световой поток. Поэтому, как правило, они содержат несколько светодиодов. Кроме того, они должны обеспечивать определенное угловое распределение света (кривую силы света). Для формирования нужного светораспределения применяется вторичная линзовая оптика [57].

На данный момент нет единой системы классификации светодиодов и LED ламп. Рассмотрим несколько вариантов.

1. По способу получения белого света светодиодные лампы подразделяются на лампы, использующие:

- светодиоды белого света системы «синий чип – жёлтый люминофор», полученные на основе преобразования длины волны излучения «синего чипа» в длины волн жёлтого диапазона видимого спектра посредством люминофора и аддитивного смешивания данных цветов для получения белого света. При этом люминофор может быть нанесён непосредственно на чип или удалён от него на некоторое расстояние, например, путём введения люминофора в пластик [2].

- светодиоды белого света системы «синий чип» – «жёлтый люминофор» – «красный люминофор», позволяющие перекрыть большую часть видимого диапазона и таким образом повысить качество света

- светодиоды белого света системы «синий чип» – «красный чип» – «жёлтый люминофор», которые также увеличивают качество света; при этом красный чип может находиться под слоем люминофора совместно с синим или отдельно

- светодиоды белого света системы «ультрафиолетовый чип» – «жёлтый люминофор»

- мощные светодиодные сборки «чип на плате», белый свет которых получают такими же способами, как описано выше для светодиодов

2. По используемым компонентам светодиодные лампы подразделяются на:

- светодиодные лампы на единичных светодиодах;

- светодиодные лампы на интегрированной системе COB.

3. По виду рассеивателя светодиодные лампы подразделяются на:

- светодиодные лампы с полупрозрачным рассеивателем. В таких лампах используются белые светодиоды или COB [6], свет которых отражается от внутренних стенок рассеивателя и перемешивается, что особенно важно при использовании в одном светодиодном модуле светодиодов белого и красного цвета излучения; в этом случае

рассеиватель служит смешивающей камерой;

– светодиодные лампы с рассеивателем из пластика с включёнными частицами люминофора. Теоретически такая система может обеспечить лучшую эффективность лампы за счет отсутствия рассеивателя и термических потерь в люминофоре.

4. Светодиодные лампы различаются по виду цоколей и ламп.

Светодиодные лампы повторяют все возможные виды ламп накаливания, галогенных и люминесцентных ламп.

Винтовые виды. Эти цоколи предназначены для винтового соединения с патроном, разница заключается в диаметре, который определяет название (цифра определяет диаметр в миллиметрах) основных видов цоколей — E27 (самый распространенный цоколь), E14, E40, E10, E12 и других. «Миньон» или же E14, имеет немного меньший диаметр и применяется реже (в основном в многорожковых люстрах и настольных лампах). Самые редкие типы винтовых цоколей светодиодных ламп называются E40. Лампы с таким типом цоколя в основном применяются для освещения улиц, производственных помещений. Что же касается E10/E12, то такие цоколи более характерны для ночников и бытовых приборов. светодиодные лампы с таким цоколем достаточно редко можно встретить в продаже (рисунок 4.2).

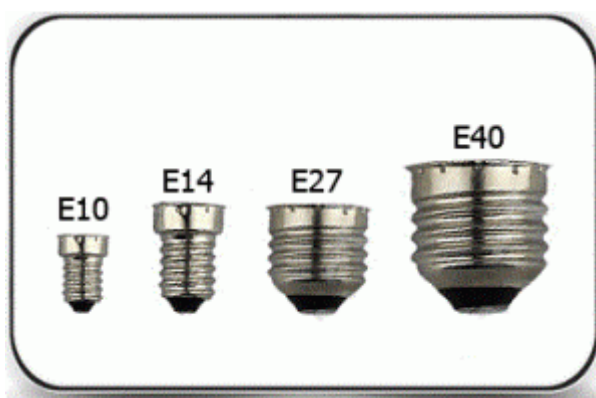


Рисунок 4.2 – Разновидности винтовых цоколей ламп

Двухштырьковые цоколи. Цоколи светодиодных ламп, имеющие подобный разъем, легко отличить по характерным особенностям наконечников. GU10 легко отличить от других наличием на концах штырьков своеобразных утолщений. Подобные разновидности устанавливаются в поворотные светильники (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Разновидности двухштырьковых цоколей светодиодных ламп

Цоколь GU5.3 — один из самых распространенных цоколей светодиодных ламп, которые пришли на смену галогенным лампам с таким же цоколем. Светильники с этим цоколем наиболее часто используются в подвесных и многоуровневых потолках. Самыми миниатюрными из двухштырьковой серии являются лампы со стеклянным цоколем G4. Цоколь G5 имеет место в трубчатых люминесцентных лампах, у которых диаметр колбы равен 12,5 или 16 мм. В быту используется редко.

Колба может быть матовой или прозрачной, в форме шара или свечки. Существует множество различных форм колб для светодиодной лампы. Наиболее распространенные виды: лампы грушевидной формы, лампы в форме свечи, лампы в форме шара, лампы трубчатой (цилиндрической) формы и другие.

#### 5. Виды ламп по используемым светодиодам

В светодиодных лампах используются различные типы светодиодов. В самых первых светодиодных лампах использовались обычные светодиоды в пластиковом корпусе. Такие лампы получили название "кукуруза" (Corn) за визуальное сходство с кукурузным початком (рисунок 4.4) [58].



Рисунок 4.4 – Светодиодная лампа серии «кукуруза»

В настоящее время светодиоды в корпусах используются в лампах довольно редко, и, как правило, это мощные светодиоды. В большинстве современных ламп используются бескорпусные светодиоды и светодиодные сборки. В последнее время всё чаще используются светодиодные излучатели COB (chip on board). В них множество светодиодов покрыты единым люминофором (рисунок 4.5) [59, 60].



Рисунок 4.5 – Светодиодные лампы со светодиодным излучателем COB

Разновидность COB — светодиодные нити (led filament), в которых множество светодиодов размещено на металлической, стеклянной или сапфировой полоске, покрытой люминофором. Появилось даже русское слово "филамент", которое начали использовать некоторые производители.

Ещё одна новейшая технология – Crystal Ceramic MCOB. На пластине из прозрачной керамики располагается множество светодиодов. Пластина с обеих сторон покрывается люминофором, поэтому такой излучатель практически равномерно светит во все стороны (рисунок 4.6) [61-64].



Рисунок 4.6 – Светодиодная лампа со светодиодным излучателем MCOB

Далее ПНИЭР необходимо провести аналитический обзор и сравнительный анализ по комплектности и техническим характеристикам функциональных аналогов светодиодных ламп мировых производителей, провести аналитический обзор и сравнительный анализ составных частей светодиодных ламп: колба, цоколь, устройство питания. Так же следует провести аналитический обзор технологических операций: штамповки ножек, монтажа ножек, заварки, откачки и наполнения ламп, припайки источника питания, цоколевания ламп.

## 4.2 Колба лампы

Колба и конструкция опорная входят в состав светодиодной лампы. Колба предназначена для защиты СИЭ от внешних воздействий и для создания в лампе газовой среды с целью конвекционного охлаждения внутренних элементов лампы. Конструкция опорная предназначена для размещения СИЭ. Колбу изготавливают из стекла в соответствии с ОСТ 160.800.356-76. На рисунке 4.7 показаны изображения ламп с типом колбы «А» и типом колбы «С».

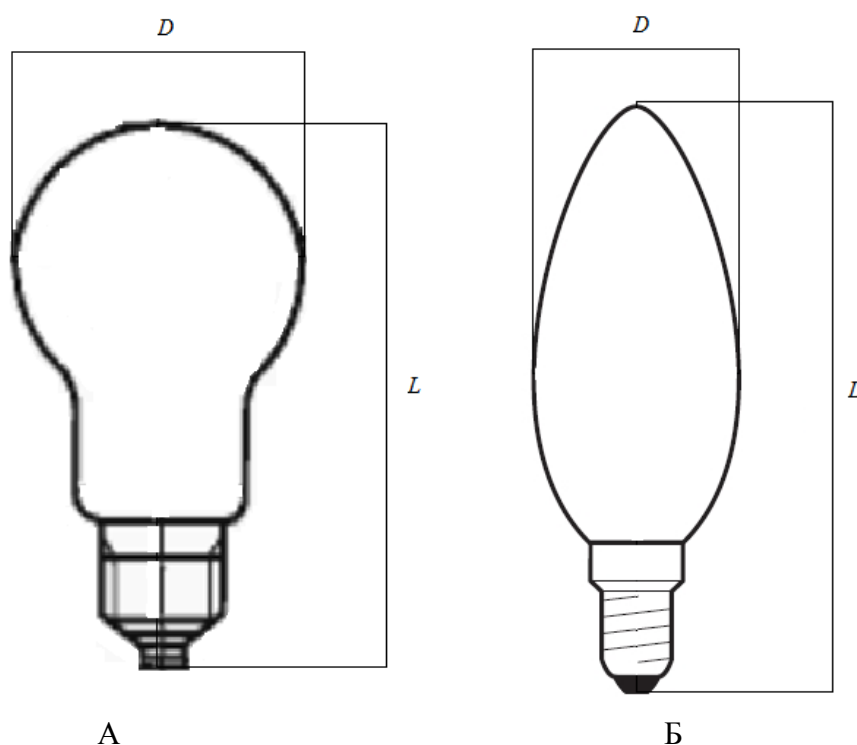


Рисунок 4.7 – Изображение лампы с типами колб:

А – тип колбы «А», Б – тип колбы «С»

Изготовление колб. Основные рабочие устройства автомата размещены на трёх конвейерах: стеклоформирующем, дутьевых головок и конвейер форм.

Конвейеры расположены друг над другом и движутся с одинаковой скоростью. Пластичная стекломасса при температуре около 1000 °С вытекает непрерывной струёй из питателя стекловальной печи. Струя закладывается двумя прокатными волоками около выдувной машины и превращается в ленту. Один из волоков имеет гладкую поверхность, а другой круглое углубление высотой 6-7 мм. Благодаря углублению стеклянная лента выходит из волоков с выступающими утолщениями в виде дисков. Ленты с дисками укладываются в средний стеклоформирующий конвейер, состоящий из пластинчатых звеньев с круглыми отверстиями, точно совпадающими со стеклянными дисками. Под

действием силы тяжести каждый диск, обладающий сравнительно небольшой вязкостью медленно провисает сквозь отверстие и образует порцию стекломассы (пульку). После провисания пульки на заданную глубину, стеклоформирующий конвейер встречает на своём пути средний конвейер с дутьевыми головками, каждая из которых совпадает с осью пулек. Давлением сжатого воздуха из головок начинается последовательное выдувание, заставляющее пульку провисать в отверстия среднего конвейера. Окончательное выдувание колб завершается в раздвижных формах, движущихся на нижнем конвейере. Конвейер подводит очередные формы в раскрытом виде к соответствующим пулкам. Формы автоматически сдвигаются и начинают вращаться со скоростью 200 об/мин. После окончания вращения форм прекращается, полуформы раздвигаются и колбы обдуваются воздухом для охлаждения. Движение колб продолжается до тех пор, пока неподвижный упор не отобьёт их от ленты. Затем они попадают во вращающийся транспортёр на который горелками оплавливают их края. Оплавленные колбы партиями по 9 штук передаются на промежуточный транспортёр.

Передача тепла от более нагретого тела реализуется путем: излучения, теплопроводности и конвекции. Причем теплопроводность является более распространенным фактором, влияющим на тепловой режим СД. В соответствии со вторым законом термодинамики, тепло переходит от более нагретой части тела к менее нагретой, причём по закону сохранения энергии потерь тепла не возникает.

В случае, когда газ нагрет неравномерно, т. е. температура в одной части ниже или выше, чем в другой, прослеживается температурная стабилизация: охлаждается более нагретая часть, в то время, как нагревается более холодная.

Бесспорно, связано это с тем что поток тепла распространяется от более нагретой части газа к более холодной. Данное явление возникновения потока тепла в газе получило название теплопроводность, в любом веществе, в частности в газе, которое предоставлено самому себе, теплопроводность приводит к температурной стабильности, и процесс этот конечно, не стационарен. В последнее время довольно часто встречаются случаи искусственного поддержания температурной стабильности.

В качестве примера можно рассмотреть электрическую светодиодную лампу нового поколения, газ в данном случае заполняет колбу лампы и находится в непосредственной близости к светодиодной нити и к стенкам колбы лампы. Внутри температура самого газа намного выше и равна температуре светодиодных нитей, тогда как, ближе к стенкам колбы температура газа более низкая. Включение лампы сопровождается процессом теплопроводности, что приводит к температурной стабильности между колбой лампы и светодиодными нитями. Стабильность в данном

случае обеспечивается электрической энергией, с одной стороны, подводимой к нити из электрической сети, и отдачей тепла от стеклянных стенок лампы к окружающему ее воздуху, с другой стороны. Эти условия обеспечивают установление стационарности стабильности температур в каждой точке, т.е. с течением времени изменений не происходит. Установившаяся стационарная температурная стабильность зависит в первую очередь от теплопроводности газа (для светодиодной лампы стоит отметить тот факт, что помимо отвода тепла через газ в данном частном случае отвод тепла происходит главным образом в результате излучения). Такие лампы для лучшего отвода тепла заполняются инертным газом.

Подключая лампу накаливания к электрической сети спираль (нить накала) начинает нагреваться и происходит свечение, объяснить это можно преобразованием электрической энергии в световую. Нить накала изготавливают как правило из вольфрама или из сплавов с добавлением вольфрама. Нить помещается внутрь стеклянной колбы, заполненной инертным газом, для маломощных ламп колбы заполняются вакуумом.

Колба в таких лампах препятствует воздействию внешних факторов на детали лампы, а инертный газ (азот, аргон, криптон, ксенон и их смеси) не позволяет вольфрамовой нити окислиться и уменьшает тепловые

температура нити под действием электрического тока может достигнуть порядка 3000°C (со временем такая высокая температура способствует истончению и перегоранию нити).

Газовое наполнение позволяет понизить рабочую температуру тела накала, за счет чего не снижается скорость распыления вольфрама в газовой среде по сравнению с распылением в вакууме. Так же газ препятствует уменьшению срока службы тела накала. С ростом молекулярной массы и давления наполняющего газа снижается скорость распыления. Давление наполняющих газов составляет около  $8 \times 10^4$  Па.

Наполнение колбы лампы газом приводит к появлению тепловых потерь за счет теплопроводности через газовую среду и конвекции. Для снижения потерь более целесообразно использовать тяжелые инертные газы в качестве наполнения колбы лампы. К таким газам можно отнести получаемые из воздуха азот, аргон, ксенон и криптон.

Не рекомендуется использовать азот в чистом виде, так как его достаточно высокая теплопроводность приводит к большим потерям. В таблице 4.1 приведены основные параметры инертных газов.

Стоит дополнительно отметить тот факт, что заполняющий колбу лампы газ находится под давлением. Давление газа не должно превышать атмосферное давление, так как во время работы лампы газ будет нагреваться, а значит будет расти давление.



Таблица 4.1 Основные параметры инертных газов

Газ	Теплопроводность, $10^{-2}$ Вт/(м×К)
Водород	2,38
Аргон	1,62
Криптон	0,80
Ксенон	0,50
Гелий	0,152

Повышенное давление уменьшает испарение вольфрама, что способствует продлению срока службы лампы. Однако слишком высокое давление может привести к тому что стеклянные стенки колбы лампы попросту не выдержат. Именно поэтому защитный газ внутри ламп находится под разрежением.

#### 4.3 Цоколь лампы

Цоколь лампы – деталь электрической лампы, служащая для ее крепления в патроне и обеспечивающая присоединение к питающей сети. Цоколь с винтовой резьбой для ввинчивания в патрон. В соответствии с п. 4.3.1.2 и 4.3.2.2 ТЗ – требования к макетам и экспериментальным образцам светодиодной лампы в рамках ПНИЭР должны быть разработаны лампы общего назначения с цоколем E27 ГОСТ 28108-89, и лампа декоративная с цоколем E14 ГОСТ 28108-89.

«Штамповка корпуса цоколя E27 из стальной ленты производится на кривошипном прессе-автомате с грейферной подачей отштампованных корпусов. Из ленты шириной 54 мм вырубается диски диаметром 55,5 мм с шагом 54 мм так, что края дисков оказываются срезанными, а от ленты остаются маленькие не связанные между собой треугольники. На первой операции вместе с вырубкой производится и первая вытяжка стаканчика диаметром 28,5 мм, который грейфером передаётся на вторую вытяжку, совмещённую с пробивкой отверстия диаметром 15 мм, а затем на заключительную операцию-калибровку, в результате которой стаканчик получает диаметр 26 мм, а высоту 22 мм. Таким образом, штамповка корпуса занимает три позиции и обычно на пресс-автомат устанавливаются две ленты. Производительность прессов с многорядными штампами достигает 30-36 тыс. в час.» [67].

Стальные цоколи перед цинкованием травятся. Цоколи обезжиривают 2-10 % -ным раствором каустической соды и промывают в холодной проточной воде. Затем их травят в подогретом (не выше 50 °С) 15-20 %-ном растворе серной или 5-10 %-ном растворе

соляной кислоты в течении 5-10 мин и промывают в проточной холодной воде.

Латунные цоколи сначала отбеливают, т.е. удаляют окислы и загрязнения, после чего производят блестящее травление – придают цоколям глянцевую поверхность и, наконец, пассируют – создают постоянную плотную плёнку, сохраняющую естественный цвет латуни и предохраняющую от более глубокого окисления.

Для отбеливания применяют разбавленный водой раствор, предварительно использованный на блестящем травлении, после чего цоколи промывают в холодной проточной воде.

Цинкование стальных цоколей производят в гальванических ваннах. Во вращающийся барабан загружают одновременно до 3000 цоколей.

На латунные штанги подвешены цинковые плитки – аноды.

На цоколи через латунную или медную струну подаётся отрицательный потенциал. Ванна питается постоянным током при напряжении 9-11 В от двигателя-генератора.

Электролит для цинкования цоколей состоит из 300 – 350 г сернокислого цинка, 100 – 150 г сернокислого натрия, 20 - 30 г гидрата сернокислого алюминия на 1000 см<sup>3</sup> воды. Плотность электролита 1180-1220 кг/м<sup>3</sup>.

При электролизе сернокислый цинк разлагается на положительные ионы цинка Zn<sup>+</sup> и отрицательные – кислотного остатка SO<sub>4</sub>. Ионы цинка, разряжаясь у катода (цоколей), осаждаются на их поверхность. Ионы кислотного остатка, достигая анода, реагируют с ним и образуют сернокислый цинк, который пополняет электролит.

Качество покрытия зависит от плотности тока в ванне, температуры, плотности электролита, концентрации водородных ионов, длительности процесса покрытия и др.

Температура электролита должна быть 40-50 °С, при этой температуре электрическая проводимость электролита наиболее высокая.

Концентрация водородных ионов (*pH*) должна быть около 4. При недостаточном кислотном электролите (*pH* > 4,5) покрытие получается тёмным и крупнокристаллическим; при кислотном (*pH* < 3,5) – покрытие светлое, но рыхлое и пористое. Для автоматического регулирования кислотности в электролит вводят сернокислый аммоний или алюминиевые квасцы.

Толщина покрытия цинком должна быть не менее 5 мкм, а для усиленного покрытия некоторых цоколей – не менее 10-12 мкм.

Обычно при массовом изготовлении цоколей Е27 травление и цинкование их производят автоматически. Автоматизация охватывает загрузку и выгрузку цоколей, и последовательную транспортировку цоколей по монорельсу из одной ванны в другую.

Мастика, применяемая для крепления цоколя к лампе, должна обладать

следующими способностями: намазываться на цоколь (пластичность), переходить из пластичного состояния в твёрдое (схватываемость), приклеиваться к колбе и цоколю (адгезия), не допускать утечки тока между внешними звеньями электродов (диэлектрические свойства), не разрушаться под влиянием влаги (влагостойкость), не разрушаться при температуре 130-140 °С (термостойкость) и не разрушаться при приложении к цоколю заданного крутящего момента (прочность). Мастика должна допускать возможность в необходимых случаях отделять цоколь от лампы.

Сначала готовят идиоловый лак в соотношении 35 % спирта на 65 % идиолола. Растворение ведут в водяной бане при подогреве не выше 50 °С и с перемешиванием. Затем в процеженный через сито лак вводят уротропин и 1% - ный раствор красителя и перемешивают их в смесителе 15 мин. Уротропин  $(CH_2)_6N_4$  – кристаллический порошок белого или жёлтого цвета получают взаимодействием аммиака с формальдегидом. Его вводят в цоколёвочную мастику для придания идиолу терморезистивных свойств.

Далее в смеситель вводят предварительно перемешанные мраморную пудру и канифольный порошок, и весь состав снова перемешивают 15 мин.

Канифоль – термопластичная естественная смола. При нагреве она размягчается, а при охлаждении снова затвердевает. Она представляет собой хрупкие стекловидные жёлтые или красновато-коричневые куски. Для цоколёвочной мастики обычно применяют сосновую канифоль.

Мраморный порошок  $CaCO_3$ , вводимый в качестве инертного наполнителя, превращает мастику в густое пластичное тесто. Он придаёт мастике необходимую текучесть и делает её более удобной для намазывания на цоколи.

Полученная однородная липкая масса становится удобной для намазывания на цоколи. Для сохранения постоянства густоты мастики увеличивают количество спирта в холодное время года и уменьшают – в тёплое.

На рисунке 4.8 приведены изображения цоколя E27 и цоколя E14 с габаритными размерами.

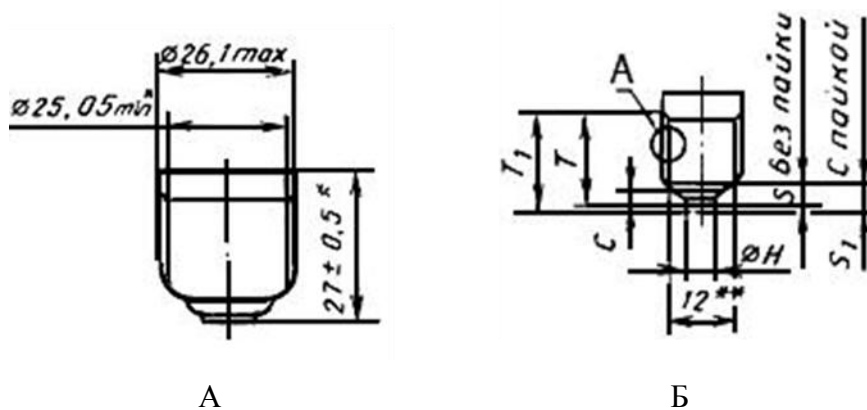


Рисунок 4.8 – Изображения цоколя E27 (А) и цоколя E14 (Б) с габаритными размерами

Исходя из габаритных размеров цоколя, устанавливаются требования к габаритным размерам устройства питания.

#### 4.4 Устройство питания

В настоящее время для переменного напряжения 220 В существует три вида устройств питания светодиодных ламп: конденсаторный балласт, линейный стабилизатор тока, импульсный стабилизатор тока.

Конденсаторный балласт является самым дешевым вариантом, но его применение оправдано только при стабильном напряжении питания. В нашем случае получается следующие значения напряжений на балластном конденсаторе: минимальное – 87 В, номинальное – 120 В, максимальное – 142 В. Таким образом, ток питания светодиодов изменяется в  $142/87 = 1,63$  раза. Не подходит из-за большого изменения яркости свечения лампы.

Линейный стабилизатор тока обеспечит КПД при максимальном напряжении в сети питания  $100/242 = 0,41$ . Это много меньше заданного в ТЗ. Кроме этого при работе линейного стабилизатора будет выделяться большое количество тепловой энергии, отвод которой, без дополнительных устройств, из цоколя лампы осуществить не реально.

Совместное применение конденсаторного балласта и линейного стабилизатора тока снизит входное напряжение примерно на 65 В. Но даже в этом случае КПД поднимется только до  $100/177 = 0,57$ , при заданном в ТЗ не менее 0,75. Проблема рассеяния выделившегося тепла тоже остаётся [68].

Наиболее перспективным для дальнейшей разработки является импульсный стабилизатор тока. В настоящее время выпускается ряд микросхем для построения импульсных стабилизаторов тока. Эти микросхемы имеют малые габаритные размеры,

высокий КПД преобразования (около 0,9), подходящий диапазон рабочих температур (от -40 °С до +85 °С и выше). Основным недостатком такого блока питания будет повышенный уровень электромагнитных помех. Поэтому обязательно принятие мер для их снижения.

Основными критериями выбора микросхем для формирования питающего тока светодиодов являются:

Напряжение питания. По ТЗ задано переменное напряжение 220 В +10%/-15%, следовательно, микросхема должна функционировать при постоянном напряжении от 250 В до 360 В.

Формируемые токи согласно ТЗ: 20 мА, 30 мА, 40 мА, 50 мА.

Узел питания должен размещаться в цоколе лампы E14 (для лампы 4Вт) и E27 для остальных ламп. Отсюда следует:

Микросхемы должны иметь как можно меньшие габаритные размеры.

Количество и размеры дополнительных элементов к микросхеме должны быть минимальны.

Температурный диапазон эксплуатации от -40 °С до +105 °С.

Микросхема должна иметь как можно больший КПД преобразования. Поэтому предпочтение следует отдавать импульсным стабилизаторам тока.

На основании выше изложенного наибольший интерес для дальнейшей разработки устройства питания представляют микросхемы, приведённые в таблице 4.2:

Таблица 4.2 Сравнительный анализ микросхем

Параметр	BP9918	HV9921	HV9923	SM7313	HV9925
Напряжение питания В	До 500	До 475	До 475	До 500	До 500
Ток нагрузки, мА	До 500	20	30	120	До 100
Мощность рассеяния, Вт	0,3	1,6	1,6	1	0,8
Температурный диапазон, °С	-40 до +105	-40 до +125	-40 до +125	-40 до +125	-40 до +125
Тип корпуса	SOT23-3	TO243AA	TO243AA	SOT89-5	SO-8
Размеры корпуса, мм	3,2×3×1,3	4,6×4,3×1,6	4,6×4,3×1,6	4,6×4,4×1,5	6×5×1,4

Примечания:

1 – Все микросхемы из таблицы являются импульсными стабилизаторами тока.

2 – Нижний предел напряжения питания у всех микросхем из таблицы не выше

100 В.

Самой перспективной для размещения в цоколе E14 является микросхема ВР9918, так как она имеет минимальные габаритные размеры и требует минимального количества дополнительных элементов [69]. Кроме того, у этой микросхемы самая низкая цена. Так же следует проработать (как запасные) варианты с HV9921 и SM7313.

Для цоколя E27 подойдут все микросхемы из таблицы за исключением HV9921. При этом HV9923 может быть использована только для лампы мощностью 6 Вт. Наиболее перспективными являются:

ВР9918 – имеет наименьшую цену.

HV9925 – в отличие от остальных, осуществляет регулировку тока по среднему значению (у остальных - по максимальному). Это позволит более точно поддерживать заданную величину тока, а значит уменьшить разброс параметров ламп в партии.

#### 4.5 Технология изготовления и монтажа ножек

Ножка состоит из электродов, тарелочки, и штенгеля, представляющего собой полую трубочку, через которую откачивается воздух из колбы лампы.

Ножки предназначены для обеспечения герметичного ввода в лампу, крепления внутренних деталей ламп. Ножки бывают нескольких типов: бусиновые, гребешковые, и плоские ножки. Бусиновые ножки применяются для изготовления миниатюрных ламп накаливания, плоские – для изготовления специальных ламп. Гребешковые широко применяются для изготовления различных источников света, в том числе и для лампы В 220-25. Ножки собирают из тарелок, штабика, штенгеля и электродов. Иногда применяют один длинный штенгель вместо отдельных штабика и штенгеля.

Проволоку класса 2 с допуском на вес отрезка 3% применяют для изготовления держателей тела накала, впаев в тугоплавкое стекло и нагревательных элементов высокотемпературных электрических печей. Молибденовый ангидрид, очищают от примесей, для этого осуществляют процесс просеивания, сушки в сушильном шкафу и последующего просеивания. Полученный однородный по зернистости сухой порошок прокаливают при 500 °С в электрической печи. Далее осуществляют процесс восстановления водородом в трубчатых печах с передвигающимися лодками. Восстановленный порошок молибдена просеивают через сито, перемешивают в смесителе, увлажняют смесью глицерина и спирта и прессуют. Прессованные формы подвергают предварительному спеканию при 1100-1200 °С и окончательного спекания в одну стадию при токе, равном 90 % тока переплавки. Спекание в вакууме позволяет получить более пластичный и однородный по структуре и механическим свойствам

металл. Ковку молибдена ведут на ротационных ковочных машинах до  $d = 2,5$  мм. Волочение проволоки с применением смазки ведут на блочном стане до  $d = 1,35$  мм и на машинах многократного волочения до выходного диаметра.

Тянутая молибденовая проволока покрыта плотной чёрной оболочкой, состоящей из графитовой смазки, окислов молибдена и мелкодробленного металлического молибдена, содранного с поверхности проволоки волоками. Эту оболочку удаляют одним из двух способов: электролитическим травлением в растворах щёлочи и термической обработкой в увлажнённом водороде. При первом способе механические свойства проволоки не изменяются, а при втором – изменяются. Первым способом очищают проволоку для керн, а вторым – для держателей электродов. Установку электролитной очистки можно питать постоянным или переменным током. При питании постоянным током, очищаемая проволока может быть присоединена к положительному и отрицательному полюсу. На установках электролитической очистки переменным током, проволоку перематывают через четыре секции ванны с проточным электролитом, циркулирующим при помощи центробежного насоса. Электролитической обработкой проволоки не только удаляют окисло-графитную плёнку, но и частично стравливают верхний слой металла. Препарирование. Молибденовую проволоку для держателей отжигают в водороде или препарировочном газе с целью придания ей требуемых механических свойств и очистки от графита, окислов и поверхностных загрязнений. Установка отжига представляет собой колпак, внутри которого укреплен спиральный цилиндрический муфель из молибденовой ленты. Муфель заключён в металлический цилиндр с теплоизоляцией, который окружён змеевиком с проточной водой. Тепло муфеля накапливают электрическим током, подводимым к нему через массивные контакты. В зону накала муфеля впускают проточный водород или препарировочный газ. Отжигаемую проволоку перематывают через муфель и нагревают. Проволока выходит из печи чистой, блестящей, гибкой и прямолинейной.

Отпрепарированную проволоку для держателей покрывают тонкой плёнкой алюминия. Плёнку наносят способом горячей металлизации, заключающимся в протягивании подогретой током проволоки через расплавленный металл.

Изготовление тарелок. Тарелка – короткая стеклянная трубка с конусообразным расширением. Диаметр основания конической части устанавливают в зависимости от диаметра горловины колбы. А диаметр и длину цилиндрической части в зависимости от габаритных размеров лампы. На станине автомата развёртки тарелок поворачивается горизонтальная автоматическая карусель, оснащённая 12 зажимными патронами. На 1-ых позициях огни горелок нагревают участок трубки, подлежащей обрезке. На следующих

позициях установленная система 2-х встречно вращающихся дисковых ножей, из которых один внутренний малый вводится в трубку и прижимает её стенку к большому внешнему ножу. Свободный кольцевой участок трубки постепенно доводится огнями горелок до размягчения. В размягчённый конец трубки вводится вращающаяся чугунная шпилька – райбер. При этом трубка и шпилька подогреваются огнями. Далее тарелка остывает, кулачки, сжимающие трубку в патроне, расходятся, и освобождаемая трубка с развёрнутой тарелкой опускается под действием собственного веса на упорную площадку. Из печи отжига и оплавления тарелки попадают сначала на верхнюю, а потом на нижнюю ленту 2-х ярусного транспортёра, на которых они постепенно остывают не прикасаясь друг к другу.

Стеклянные трубки (дроты) изготавливаются механизированным горизонтальным вытягиванием, так как размягчённое стекло способно сохранять при растягивании подобие своего сечения. Линия горизонтального вытягивания трубок состоит из формовочной машины, роликового конвейера, тянульно-резальной машины. К выработанной части печи пристроена обогреваемая очищенным газом рабочая камера с шамотным жёлобом. Сваренная стекломасса стекает из печи по жёлобу на помещённой в рабочей камере медленно вращающимся в наклонном положении шамотном мундштуке формовочной машины. Стеклянная струя наматывается на верхнюю часть мундштука в виде ленты, которая под действием собственного веса непрерывно сползает к низу, сливаясь в сплошную массу и образуя на выходном конце мундштука утолщение, называемое луковицей. В пределах луковицы стекломасса переходит от жидкого состояния к пластичному и почти затвердевшему. Луковица служит началом тянувшегося дрота. Мундштук насажен на трубу из жаропрочной стали, через который передаётся вращение от электродвигателя постоянного тока и производится установочная регулировка, т.е. подъём, опускание и поворот. В эту же трубу подводят очищенный от твёрдых частиц сжатый воздух для раздувания луковицы и образования внутренней полости дрота. Сжатый воздух препятствует сплющиванию стенок дрота под действием собственного веса. При выработке штабиков отверстие в трубе мундштука закрывают наглухо. В начале работы или после обрыва дрота, стекло захватывают при помощи стального крючка, подтягивают вручную в горизонтальном направлении к тянульно-резальной машине и вводят в тянущие цепи этой машины. Дальнейшее вытягивание совершается механически с постоянной скоростью. Тянульно-резальную машину устанавливают на расстоянии 30-50 метров от формовочной машины с таким расчётом, чтобы стекло успело застыть. Тянущийся дрот поддерживается конвейером рольгангом, свободно вращающимися гладкими асбоцементными роликами, направляющими



пластичное стекло по оси вытягивания. Конвейер состоит из отдельных разъемных звеньев, изменением числа которых, его можно удлинять или укорачивать. Он должен быть тем длиннее, чем больше диаметр вытягиваемого дрота. Направляющие ролики вначале конвейера могут быть опущены или подняты для регулирования угла наклона конвейера и предохранения пластичного стекла от деформаций на начальной стадии вытягивания. Для уменьшения в стекле внутренних напряжений конвейер оснащают подогретыми камерами и закрывают на  $2/3$  длины кожухом. Регулировку диаметра и толщину стенок производят изменением скорости оттягивания стекла тянульной машины, изменением давления воздуха в мундштуке, регулировкой количества стекломассы, стекающей в мундштук в единицу времени. На размеры трубок влияют также угол наклона, скорость вращения мундштука и температура стекломассы в луковиче. Тянульно-резальная машина имеет механизм тяги дрота, приводимый в действие электродвигателем. Механизм состоит из двух движущихся с одинаковой скоростью и расположенных одна над другой роликовых цепей, снабжённых металлическими пластинами с асбестовыми или фибровыми накладками. Накладки зажимают охлаждённый дрот и затягивают его в машину. Механизм тяги подводит дрот к механизму резки, который разрезает его пламенем газовой горелки или надрезает увлажнённым абразивным ножом и отламывают крыльчаткой на куски постоянной длины. На электроламповых заводах стеклянные трубки распаковывают и калибруют по толщине стенок и диаметра. Раскалиброванное стекло для штабиков и штенгелей разрезают на отрезки длиной задаваемой конструкции ламп. Стеклорезный станок представляет собой надетый на горизонтальный вал дисковый закалённый и заточенный нож. Вал с ножом вращается в двух подшипниках со скоростью 4000-6000 об/мин. Дроты по 6-12 шт. кладут на нож и легко прокатывают их по режущей кромке против вращения ножа. Лезвие врежется в стекло и наносит на нём тонкие глубокие царапины, по линии царапин стекло даёт трещину. Стеклорезные станки снабжают переставляемым упором, в котором стекло прижимают торцами и которые позволяют разрезать его, с соблюдением точно заданной длины. Механизированные стеклорезные станки имеют вращающийся загрузочный барабан, автоматически подводящий дроты к лезвию ножа. Такие станки оснащают целевой газовой горелкой, пламя которой направляют по одной прямой с лезвием ножа. Вращающийся дрот нагревается острым огнём и при лёгком прикосновении к ножу нагревается и отламывается. Штенгели и штабики после резки калибруют по диаметру. На калибровочном автомате они автоматически перемещаются из загрузочного бункера в конусные калибровочные щели вторых пар вращающихся дисков и входят в щели тем глубже, чем меньше их диаметр. Затем упоры, прикреплённые к сторонам дисков,

выталкивают их из щелей. Стекло каждого номинального диаметра выталкивается своим упором и скатывается по своему лотку в соответствующий приёмный ящик.

Ножки могут иметь один ввод (софитные лампы), два – большинство источников света, три и более – двухсветные лампы и специальные источники света. Кроме электродов, могут впаиваться поддержки. При этом необходимо соблюдать условие, чтобы расстояния от впая до края лопатки и до откачного отверстия были не менее 0,5 мм. Диаметр откачного отверстия должен быть приблизительно равным диаметру штенгеля.

#### 4.6 Технология заварки, откачки и наполнения ламп

Заварка – это герметическое соединение собранной ножки лампы с колбой. При заварке стеклянная ножка и колба свариваются в одну монолитную деталь – оболочку лампы. Первый этап заварки состоит в том, что свариваемые части ножки и баллона медленно разогреваются до размягчения стекла. Необходимая скорость разогрева стекла определяется его толщиной и температурой пламени газовой горелки. Скорость разогрева стекла пламенем газовых горелок должна составлять не больше 200 – 300 К/мин. Более быстрый разогрев приводит к появлению сильных внутренних напряжений и может вызвать появление трещин. На втором этапе заварки происходит соединение свариваемых частей ножки и баллона, и образовавшийся шов тщательно проваривается. Стекло при этом разогревают до более высоких температур. Полученный шов не должен иметь втянутых мест, острых углов и утолщений, где могут образовываться местные напряжения, приводящие к растрескиванию стекла. Отжиг является третьим этапом заварки. Он служит для предохранения стекла в месте сварки от возникновения сильных постоянных напряжений в нём. Допустимые скорости охлаждения заваренных ламп в зоне отжига составляют до 50 К/мин и определяются, как правило, практически. Если первый отжиг заваренной лампы не снял напряжений, лампу подвергают вторичному отжигу. Время охлаждения ламп с тонкими стенками может быть значительно сокращено, если лампы охлаждать в специальных формах или жидких средах. В качестве жидких сред используют расплавленные соли, например, селитру. Применяя эти методы, можно уменьшить время охлаждения заваренных ламп в 4-10 раз по сравнению со временем их охлаждения в воздушной среде. Автоматическую заварку ламп накаливания общего назначения в основном производят на заварочно-откачных автоматах с 24-65 гнёздами. В рабочее гнездо заварочной машины помещают колбу и смонтированную ножку. Ножку устанавливают в так называемую свечу, а колбу – поверх ножки в шаблон. При движении карусели рабочие гнёзда приводятся во вращение между газовыми горелками. При этом горловину колбы греют на уровне тарелки, а тарелка нагревается лучистым потоком.

Стекло колбы начинает постепенно размягчаться и вытягиваться, образуя всё меньший и меньший зазор между колбой и тарелкой. Горловина колбы соприкасается с оплавленной кромкой тарелки, привариваясь к ней, и участок стекла между цилиндрической частью колбы и тарелкой образует горло лампы. Оставшаяся нижняя концевая часть колбы (юбка) удаляется. Стекло колбы и стекло тарелки при заварке взаимно растворяются друг в друге. Месту заварки придают размеры и форму, требуемые для правильной посадки цоколя на лампу. Современные заварочные автоматы имеют узел механической формовки горла.

Откачка. Лампа общего назначения подвергается автоматической или полуавтоматической откачки. Вакуумной обработкой обеспечивается удаление атмосферного воздуха, обезгаживание стекла и внутренних деталей лампы. Откачные автоматы для ламп накаливания общего назначения представляют собой машины карусельного типа, имеющие неподвижную часть – станину и вращающуюся – карусель. На горизонтальной карусели по её окружности расположены на определённом расстоянии друг от друга откачные гнёзда для установки и герметизации ламп. Уплотнение между ними станиной и каруселью производится с помощью золотника, состоящего из двух массивных стальных дисков: неподвижного, установленного на станине автомата, и прилегающего к нему подвижного диска, связанных с периодически поворачивающейся каруселью. Прилегающие друг к другу плоскости золотников пришлифованы, и между ними по кольцевым канавкам для уплотнения вводится касторовое масло или вязкое масло «вапор». Масло образует тонкую плёнку между золотниками, предохраняющую их от непосредственного соприкосновения и сухого трения между собой. По боковой цилиндрической поверхности подвижного золотника по окружности вставлены стальные штуцера. Во время остановок карусели каналы верхнего и нижнего золотников точно совмещаются. Число отверстий в неподвижном золотнике на два-четыре меньше (на этих позициях происходят загрузка и съём ламп). Штуцера нижнего золотника через трубопроводы подсоединены к вакуумным насосам. Кроме того, откачной автомат имеет неподвижную дугообразную туннельную печь с газовым или электрическим нагревом и отпаянные горелки. Наиболее распространённым автоматом для откачки ламп общего назначения является заварочно-откачной автомат Б.332.03. Он имеет общую станину с отдельными каруселями заварки и откачки. Промывкой достигается уменьшение парциального давления вредных газов в лампе. Сущность этого процесса состоит в том, что после достижения необходимого давления в лампе (1-10 Па) её наполняют промывочным (инертным) газом (азот, аргон и др.), а затем снова откачивают. Такой цикл может повторяться несколько раз. При каждом наполнении ламп остаточные вредные газы смешиваются (разбавляются) с промывочными газами и вместе с ним откачиваются.

Тем самым уменьшается парциальное давление вредных газов в лампе.

Парциальное давление вредных газов в лампе определяется по уравнению

$$P = P_0 \cdot (P_1/P_2)^n, \quad (4.1)$$

где  $P$  – парциальное давление вредных газов в лампе после последней промывки, Па;

$P_0$  – давление в лампе перед промывкой, Па;

$P_1$  – давление в лампе после откачки промывочного газа, Па;

$P_2$  – давление в лампе после наполнения промывочным газом, Па;

$n$  – число промывок.

После промывки лампу общего назначения заполняют инертным газом.

#### 4.7 Технология припайки источника питания

С помощью транспортёра отпаянные лампы перемещаются с механизма заварки, откачки и наполнения ламп к механизму припайки источников питания. Загрузка отпаянной лампы происходит автоматически с транспортера отпаянных ламп. На первых позициях происходит выравнивание токовых вводов строго перпендикулярно радиусу карусели. Затем происходит проверка полярности и с помощью узла поворота ламп, лампа устанавливается в нужном положении. После операций обрезки, смачивания флюсом, лужения токовых вводов происходит подача, одевание источника питания и припайка токовых вводов к источнику питания. На карусель механизма припайки источника питания установлены узлы фиксации ламп. Карусель механизма припайки источника питания состоит из двух частей, одна из которых может перемещаться в вертикальном направлении относительно другой. Узел фиксации ламп предназначен для зажатия и центрирования отпаянных ламп, и подачи их в соответствующую позицию. Лампы с узла загрузки ламп переносятся с конвейера на узел фиксации ламп. Лампа располагается колбой вниз. Опускание и выравнивание токовых электродов осуществляется с помощью узла выравнивания токовых электродов. Токовые вводы должны быть расположены параллельно штенгелю. Затем с помощью узла проверки полярности осуществляется определение полярности светодиодных излучающих элементов на лампе, чтобы в последствие правильно одеть источник питания. Далее с помощью узла поворота лампы осуществляется поворот и установка лампы в нужное положение для операции одевания источника питания. Затем с помощью узла обрезки токовых электродов осуществляется обрезка токовых электродов на нужную длину. Длина выступающих токовых вводов должна быть 2-3 мм. Далее с помощью узла смачивания флюсом токовых электродов осуществляется нанесения флюса на подрезанные токовые вводы. Затем с помощью узла лужения токовых электродов осуществляется покрытия поверхности токовых вводов

припоем. Далее с помощью узла выравнивания токовых электродов осуществляется выравнивание токовых вводов. Токовые вводы должны быть разведены на расстояние, соответствующее расстоянию между отверстиями на источнике питания. Затем с помощью узла проверки токовых электродов осуществляется проверка токовых вводов перед одеванием источника питания. Хранение и перенос источника питания к узлу подачи и одевания источника питания осуществляется с помощью магазина с источниками питания. Далее с помощью узла подачи и одевания источника питания осуществляется вырубка одиночных источников питания из групповой платы, подача и одевание источника питания на лампу отпаянную. Узел подачи снабжен блокирующим устройством, приостанавливающим подачу ИП если в рабочем гнезде отсутствует лампа. Затем с помощью узла прижима токовых электродов на источнике питания осуществляется прижим токовых вводов к контактной поверхности на источнике питания. Припайка токовых вводов к контактам источника питания осуществляется с помощью узла припайки токовых электродов к источнику питания. Задача припайки состоит в создании надежного механического и электрического соединения внешних звеньев токовых вводов с контактными элементами источника питания. Далее с помощью узла проверки ламп на зажигание осуществляется проверка ламп на зажигание. Лампа должна светиться при подаче электрического питания. С помощью узла выравнивания токовых электродов осуществляется выравнивание токовых вводов на источнике питания. Верхний токовый ввод должен располагаться строго вертикально. Боковой токовый ввод должен быть приведен в нужное положение, чтобы он располагался строго по радиусу карусели и был оттянут горизонтально. Затем с помощью узла опускания шаблона осуществляется беспрепятственного съема забракованной (не светящихся) ламп. Далее с помощью узла съема ламп осуществляется съем отпаянных ламп с припаянными источниками питания с механизма припайки и переноса на конвейер подачи ламп на следующую технологическую операцию. Конвейер подачи отпаянных ламп с припаянными источниками питания переносит лампы к механизму цоколевания ламп.

#### 4.8 Технология цоколевания ламп

Крепление цоколей к лампам производится с помощью специальных мастик и цементов или же механическим способом.

Перед цоколеванием ламп идитоловой мастикой производят намазку цоколей на специальных автоматах. Намазка цоколей состоит в том, чтобы на край внутренней поверхности цоколя нанести кольцевой поясик мастики толщиной 2-3 мм. Намазанные цоколи перед цоколеванием могут выдерживаться некоторое время, но не более 16 часов

во избежание порчи мастики.

Цокование ламп производится на специальных цоколёвочных машинах карусельного типа, имеющих производительность более 2000 шт/мин. Для различных источников света применяются разнообразные машины, отличающиеся конструктивным исполнением, габаритами, количеством рабочих гнёзд, выполнением дополнительных технологических операций в процессе цокования ламп и т.д. Но все они выполняют одну и ту же задачу – обеспечение полимеризации мастики и надёжного скрепления цоколя с лампой.

В начальной стадии нагрева мастика стекает вниз и равномерно заполняет промежуток между цоколем и горлом. При дальнейшем нагреве идиол вступает в соединение с уротропином, полимеризуя и связывает цоколь со стеклом. Температура цокования ламп зависит от рода мастики, типа цоколей и количества мастики. При низкой температуре цокования мастика не успевает полностью полимеризоваться и цоколь закрепляется непрочно, при очень высокой температуре – мастика сильно расширяется, увеличивается давление на горло лампы, в результате чего может происходить растрескивание горла.

Добавленный в мастику зелёный краситель (малахитовая зелень) при 160-185 °С разлагается и обесцвечивается. Зелёный цвет мастики после цокования указывает на недогрев, светло-коричневый на нормальный нагрев, тёмно-коричневый – на перегрев.

## 5 Обзор нормативно-методической литературы

Разрабатываемые лампы на основе СИЭ должны соответствовать всем требованиям нормативной документации, предъявляемым к источникам света. Наиболее важные из указанных требований собраны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Основные требования к лампе светодиодной

Параметр	Требование	Нормативный документ
Тип цоколя	E27	ГОСТ ИЕС 60061-1-2014
	E14	ГОСТ ИЕС 60061-1-2014
Мощность	Интервал от 2 до 15 Вт.	ГОСТ Р 54815-2011 – Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования
Световой поток	Интервал от 450 до 1250 лм.	МКО 84:1989 – Измерение светового потока.
Кривая силы света	Угол излучения в меридиональной плоскости не менее 120° по уровню 0,1.	ГОСТ 171616-82 – Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров.
Световая отдача	Не менее 125 лм/Вт	ГОСТ 171616-82
Коррелированная цветовая температура	2700 К – 6500 К	ГОСТ Р 54815-2011
Сохраняемость светового потока	Не ниже категории В	ГОСТ 54815-2011
Требования стойкости к воздействию механических и климатических факторов	Группа условий эксплуатации М1	ГОСТ 17516.1-90
	Климатическое исполнение УХЛ категории 4.2	ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543.1-89

Методы измерения электрических и световых параметров источников света должны соответствовать ГОСТ 171616-82. Осветительные лампы должны быть безопасны для здоровья и жизни людей, животных. В своем составе осветительные лампы не должны содержать вредные элементы или вредные соединения. Для обеспечения безопасности окружающей среды они также должны быть утилизированы по специально разработанной для этих приборов технологии.

Требования на рабочую температуру цоколя и ее превышению, сопротивлению крутящему моменту при подключению лампы к электрической цепи и величине сопротивления изоляции электрических частей ламп должны соответствовать ГОСТ Р

52712-2007.

Требования к устройству питания устанавливаются несколькими нормативными документами, основные из них приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Основные нормативные документы

Стандарты действующие в России	Международные стандарты	Краткое наименование
ГОСТ Р МЭК 60065-2005	МЭК 60065	Требования безопасности
ГОСТ Р 51318.14.1-2006	EN55015	Радиопомехи промышленные
ГОСТ Р 51317.3.2-2006	IEC 61000-3-2	Эмиссия гармонических составляющих
ГОСТ Р 51317.3.3-2008	IEC 61000-3-3	Ограничение изменений напряжения
ГОСТ Р МЭК 60598-99	МЭК 60598	Светильники

Значение пульсаций светового потока ограничено СанПиН 2.2.1 2.1.1.2585-10, в котором установлены ограничения на пульсации в помещениях различного назначения. Полное отсутствие пульсаций (0%) применяется в чертежных залах. Порог - 10% применяется в помещениях для работы с мониторами. 5%ный порог определен в документе СанПиН 2.1.8/2.2.4.2620-10 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы». По указанным причинам при разработке ламп необходимо исходить из того, что он должен обеспечивать световой поток с пульсациями не более 5%.

В дополнение к этим ГОСТам прилагаются требования, которые учитывают особенности эксплуатации светильника. Прежде всего, речь должна идти о защите источников питания ламп от импульсов с высокой энергией. В первую очередь это относится к СД источникам освещения, подключенным к линиям электропередачи. При мощных грозовых разрядах в проводах линии электропередач наводятся импульсы напряжения с амплитудой кратной превосходящей номинальное напряжение в линии и хаотично меняющиеся во времени. Имеющие в линиях электропередачи гасящие такие импульсы устройства далеко не всегда могут эффективно подавить возникшие в результате молнии и разрядов в атмосфере импульсы напряжения. Часто такое гашение лишь частичное. Поэтому любой источник питания, находящийся во включенном состоянии во время гроз, должен иметь собственную защиту от указанных неожиданностей. Это обеспечит его безаварийную работу во время любых метеоусловий и технических катаклизмов на линии электропередачи.

ГОСТ МЭК 60 598 «Светильники. Общие требования и методы испытаний»



разделяет светильники на три класса по защите от поражения электрическим током:

– I класс. Защита от поражения электрическим током данного класса должна обеспечиваться основной изоляцией используемых проводов и защитным заземлением токопроводящих частей устройства, доступных для прикосновения человеком. Испытательное напряжение составляет 1,5 кВ.

– II класс. Защита данного класса от поражения электрическим током обеспечивается основной изоляцией и дополнительной (или усиленной) изоляцией токопроводящих, доступных для прикосновения, частей устройства. Испытательное напряжение составляет 3,6 кВ.

– III класс. Защита этого уровня предполагает, что устройство питается безопасным сверхнизким напряжением (БСНН). Безопасное сверхнизкое напряжение по ГОСТ МЭК 60 598 составляет не более 50 В.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Afonin, K.N., Olisovets, A.Y., Ryapolova, Y.V., Soldatkin, V.S., Starosek, D.G., Tuev, V.I., Hristyukov, V.G. LED lamp design optimizing on minimum non-uniformity of light intensity distribution in space // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 - Proceedings Volume 2, 4 January 2017, Статья №7806435, Pages 153-155.
2. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
3. Thomas W., Murphy Jr. Maximum spectral luminous efficacy of white light // Journal of Applied Physics. – 2012. – №111. – С. 104909.
4. СНИП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение Электронный ресурс: [https://znaytovar.ru/gost/2/SNiP\\_230595\\_Estestvennoe\\_i\\_isk.html](https://znaytovar.ru/gost/2/SNiP_230595_Estestvennoe_i_isk.html)
5. Шарапова Н. История полупроводников: томский период // Alma Mater. Газета Томского государственного университета. – 2005. – №2380.
6. Феопёнтов А. Модули Chip-On-Board. Часть 1. Технология, конструкция, применение // «Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 2 – С. 26-28.
7. Сборка и герметизация микросхем и полупроводниковых приборов // Официальный сайт ООО «Остек-Интегра». Электронный ресурс: [https://ostec-materials.ru/tech\\_lib/technology/sborka-i-germetizatsiya-mikroskhem-i-poluprovodnikovyykh-priborov.php](https://ostec-materials.ru/tech_lib/technology/sborka-i-germetizatsiya-mikroskhem-i-poluprovodnikovyykh-priborov.php)
8. Seoul Semiconductor starts mass production of its patented filament LEDs // LEDs Magazine. Электронный журнал: <http://www.ledsmagazine.com/ugc/2017/02/27/seoul-semiconductor-starts-mass-production-of-its-patented-filament-leds.html>
9. Официальный сайт Cree. Электронный ресурс: <http://www.cree.com/news-events/news/article/cree-launches-industrys-first-extreme-density-led>
10. Бочкарева Н.И., Клочков А.В., Коготков В.С., Ребане Ю.Т., Вирко М.В., Шретер Ю.Г., Иванов А.М. Прыжковый транспорт в области объемного заряда p-n-структур с квантовыми ямами InGaN/GaN как источник избыточного 1/f шума и потерь эффективности светодиодов // ФТП. – 2015. – №6. – С. 847.
11. Бочкарева Н.И., Ребане Ю.Т., Шретер Ю.Г. Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN // ФТП. – 2014. – №8. – С. 1107.
12. Бадгутдинов М.Л. Особенности излучательной рекомбинации в p-n-

гетероструктурах *InGaN/AlGaIn/GaN* с множественными квантовыми ямами и светодиодах на их основе / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н., г. Москва. – 2007.

13. Бочкарева Н.И., Шеремет И.А., Шретер Ю.Г. Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких уровнях инжекции: роль водорода // ФТП. – 2016. – №10. – С. 1387-1394.

14. Прудаев И.А., Голыгин И.Ю., Ширапов С.Б., Романов И.С., Хлудков С.С., Толбанов О.П. Влияние температуры на механизм инжекции носителей в светодиодах на основе множественных квантовых ям *InGaIn/GaN* // ФТП. – 2013. – №10. – С. 1391-1395.

15. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И., Латышев Ф.Е., Леликов Ю.С., Ребане Ю.Т., Цюк А.И., Шретер Ю.Г. Туннельная инжекция и энергетическая эффективность светодиодов на основе *InGaIn/GaN* // ФТП. – 2013. – №1. – С. 129-132.

16. Кузнецов Г.Д., Сушков В.П., Кушхов А.Р., Ермошин И.Г., Билалов Б.А. Омические контакты к GaN // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2009. – № 3. – С. 4-13.

17. Zinovchuk A.V., Malyutenko O.Yu., Malyutenko V.K., Podoltsev A.D., Vilisov A.A. The effect of current crowding on the heat and light pattern in high-power AlGaAs light emitting diodes // Journal of Applied Physics. – 2008. – Т.104. – № 3. – pp. 033115.

18. Павлюченко А.С., Марков Л.К., Смирнова И.П., Закгейм Д.А. Расчет оптимальной конфигурации двухслойной пленки ITO для использования в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов // ФТП. – 2015. – №7. – С. 994-998.

19. Марков Л.К., Смирнова И.П., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Закгейм Д.А., Павлов С.И. Применение двухслойных пленок ITO в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов // ФТП. – 2014. – №12. – С. 1713-1718.

20. Смирнова И.П., Марков Л.К., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Павлов С.И. Оптимизация технологии нанесения тонких пленок ITO, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов // ФТП. – 2014. – №1. – С. 61-67.

21. Бадгудинов М.Л., Гальчина Н.А., Коган Л.М., Рассохин И.Т., Социн Н.П., Юнович А.Э. Мощные светодиоды белого свечения для освещения // Светотехника. – 2006. – №3. – С.36-40.

22. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diod (Springer, Berlin). – 1997. – pp. 335.

23. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes

with super-high luminous efficacy // Journal of Physics: Applien Physics. – 2010. – № 43.

24. МЭК 60050-845:1987 Международный электротехнический словарь. Глава 845. Освещение. – 1987.

25. ГОСТ Р 54814-2011 Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения. Термины и определения. – 2011.

26. ГОСТ 25024.3-83 Индикаторы знаков синтезирующие. Методы измерения тока и напряжения. – 1983.

27. Солдаткин, В.С. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин, А.Ю. Олисовец, В.И. Туев // Доклады ТУСУРа. – 2015. – №3. – С. 55-61.

28. Сушков, П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInN / П. Сушков, С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 3. – С. 10–13.

29. Feng, W., Feng, B., Zhao, F., Shieh, B., Lee, Ricky Shi Wei. Simulation and Optimization on Thermal Performance of LED Filament Light Bulb // 12th China International Forum on Solid State Lighting, SSLCHINA 2015, 2015, Dec, Article number 7360696, p. 88-92.

30. Huang L., Shih Y., Shi F. / Cooling strategy for LED filament bulb utilizing thermal radiation cooling and open slots enhancing thermal convection // Proceedings of the 16th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITTherm 2017, Pages 1030-1033.

31. Zheng H., Xu C., Liu J., Chu J., Liu S., Zeng X., Sun R. / A novel cooling method for LED filament bulb using ionic wind // Proceedings of the 16th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITTherm 2017, Pages 998-1003.

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

33. Адарчин С.А., Косушкин В.Г., Адарчина Е.Н. Эффективный метод производства flip-chip-компонентов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2014. – Вып. 3.

34. Официальный сайт Osram Opto Semiconductor [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.osram.com/os/>

35. Официальный сайт Azzurro Semiconductors [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.linkedin.com/company/azzurro-semiconductors>

36. Официальный сайт Bridgelux [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<https://www.bridgelux.com/>

37. Официальный сайт Siltronic AG [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.siltronic.com/en/>

38. Официальный сайт Soraа [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.soraa.com/>

39. Jingjing Zhang, Bin Xie, Xingjian Yu, Xiaobing Luo, Tao Zhang, Shishen Liu, Xing Jin / Blue light hazard performance comparison of phosphor-converted LED sources with red quantum dots and red phosphor // Journal of Applied Physics 122, 043103 (2017)

40. Chung-Hao Chiang, Te-Hsing Liu, Han-Yu Lin, Hung-Yi Kuo, and Sheng-Yuan Chu / Effects of flux additives on the characteristics of Y<sub>2</sub>95Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:0.05Ce<sup>3+</sup> phosphor: Particle growth mechanism and luminescence // Journal of Applied Physics 114, 243517 (2013)

41. Лисицын В.М., Сощин Н.П., Цзюй Я., Степанов С.А., Лисицына Л.А., Тулегенова А.Т., Абдуллин Х.А. Характеристика фотолюминесценции люминофоров разной предыстории на основе иттрий-алюминиевого граната с Се, GD // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 106-112.

42. Jie Liu; Chunlin Xu; Huai Zheng; Sheng Liu. Numerical Analysis and Optimization of Thermal Performance of LED Filament Light Bulb // Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2017 IEEE 67<sup>th</sup>

43. Брискина, Ч.М., Румянцев С.И., Рыжков М.В., Сощин Н.П., Спаский Д.А. Поиск оптимальных составов гранатовых люминофоров с Се<sup>3+</sup> для белых светодиодов // Светотехника. – 2012. – № 5. – С. 37-39.

44. Y.V. Ryapolova, V.S. Soldatkin, K.N. Afonin, V.I. Tuev, A.A. Vilisov / Parameters Investigation of Phosphors for Solid State Lighting // Key Engineering Materials ISSN: 1662-9795, Vol. 712, pp 357-361, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.712.357 © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.

45. Kwak, J. et al. Characterization of quantum dot/conducting polymer hybrid films and their application to light-emitting diodes. Adv. Mater. 21, – pp. 5022–5026 (2009).

46. Shirasaki, Y., Wood, V., Tischler, Y. R., Supran, G. J. & Bulović, V. Resonant cavity colloidal quantum dot LEDs. 2011 Conf. Lasers and Electro-Optics (2011).

47. Компаунд [Электронный ресурс] — Режим доступа — [http://electrolube.ru.com/pdf/LED\\_industry\\_brochure\\_Russian-V1.pdf](http://electrolube.ru.com/pdf/LED_industry_brochure_Russian-V1.pdf) (16.11.2017 г.).

48. Информация о силиконовых заливочных компаундах производства Dow Corning [Электронный ресурс] — Режим доступа — <https://urlid.ru/b6sl> ; <https://ostec-group.ru/> (23.11.2017 г.).

49. Полимерные композиционные материалы: Структура, свойства, технология /

Под ред. Берлина А.А. СПб.: Профессия., 2009. – 559 с.

50. Yang C.-X, Li X., Kong Y.-F., Mei Y.-H., Lu G.-Q / High power COB LED modules attached by nanosilver paste // Faguang Xuebao/Chinese Journal of Luminescence, Volume 37, Issue 1, 1 January 2016, pp. 94-99.

51. Монтаж кристаллов в корпус [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://equip.eltech.com/catalog/5831> (дата обращения: 23.06.2015).

52. DaoqiangDanielLu, YiGraceLi, C. P. Wong. Recent Advances in Nano-conductive Adhesives / Journal of Adhesion Science and Technology. 2013. – pp. 815-834.

53. Ланин, В. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников / В. Ланин, И. Петухов, В. Швецов // Компоненты и технологии. – 2009. – №8. – С. 124-128.

54. Ланин, В. Мониторинг процесса ультразвуковой микросварки методом частотно-временного анализа вибраций инструмента / В. Ланин, И. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – №5. – С. 52-56.

55. Кудряшов, И. Технология микросварки проволочных выводов / И. Кудряшев // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2007. – №5. – С. 1-6.

56. К.Н. Афонин, Ю.В. Ряполова, В.С. Солдаткин / Особенности применения ультразвуковой сварки в технологии изготовления светодиодов и светодиодных ламп // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР». – Томск. – 2015. – Ч.2. – С. 105-108.

57. Официальный сайт LEDs magazine [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.LEDsmagazine.com](http://www.LEDsmagazine.com)

58. Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://feron.ru/categories/57-svetodiodnye/products/> Режим доступа – свободный.

59. Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://www.gauss-russia.ru/catalog/> Режим доступа – свободный.

60. Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://www.jazz-way.com/catalog/lampy/lampy-svetodiodnye/> Режим доступа – свободный.

61. Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://www.kreonix.net/katalog-tovarov/svetodiodnyie-lampyi-g4/svetodiodnyie-lampyi-e27svetodiodnyie-lampyi-e27/>. Режим доступа – свободный.

62. Официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://www.navigator-light.ru/products/lamps/led.html>. Режим доступа – свободный.

63. Официальный сайт [Электронный ресурс]. [http://www.asd-electro.ru/products/svetodiodnye\\_lampy/](http://www.asd-electro.ru/products/svetodiodnye_lampy/). Режим доступа – свободный.

64. Официальный сайт [Электронный ресурс].

[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). Режим доступа – свободный.

65. Дохтуров В., Смирнов С. Временная и тепловая стабильность параметров полупроводниковых источников света при ускоренных испытаниях // Полупроводниковая светотехника. – 2014. – № 6. – С. 42-45.

66. Фастовский В.Г., Ровинский А.Е., Петровский Ю.В. Инертные газы: Издание 2 переработанное и дополненное. / Фастовский В.Г., Ровинский А.Е., Петровский Ю.В. – М.: Книга по Требованию, 2012. –177 с.

67. Ульмишек Л.Г.: Производство электрических ламп накаливания. М.-Л.: Энергия, 1966. – 640 с.

68. Пескин А. Новые драйверы питания светодиодов, построенные на микросхеме HT7L5600 компании HOLTEC // Полупроводниковая светотехника. – 2017. – № 1. – С. 54-58.

69. Пескин А. Драйверы питания светодиодов, построенные на микросхеме HT7A6322 компании HOLTEC // Полупроводниковая светотехника. – 2017. – № 2. – С. 36-59.