

В.С. Солдаткин, А.А. Вилисов, В.И. Туев, Д.Г. Старосек

**ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА
МОЩНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ**

Томск 2016

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

Заведующий каф. РЭТЭМ

_____ В.И. Туев

« ____ » _____ 2016 г.

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА МОЩНЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие для магистров, обучающихся по направлениям подготовки
11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и
27.04.04 «Управление в технических системах»

Разработали:

Заведующий каф. РЭТЭМ

_____ В.И. Туев

Профессор каф. РЭТЭМ

_____ А.А. Вилисов

Доцент каф. РЭТЭМ

_____ В.С. Солдаткин

Инженер каф. КИПР

_____ Д.Г. Старосек

Томск 2016

Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И., Д.Г. Старосек Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 47с.

Настоящие учебное пособие составлено с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) для магистров, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 27.04.04 «Управление в технических системах». Учебное пособие предназначено для магистров, изучающих дисциплину вариативной части профессионального цикла «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий» и содержат необходимую информацию и курс лекций для изучения дисциплины. При изучении материалов данного учебного пособия, магистры должны расширить свои знания по изучаемой дисциплине, а также данное учебное пособие направлено на формирования у студентов следующих знаний, умений и навыков:

Знать:

- о светотехнических, энергетических и монтажно-эксплуатационных характеристиках светодиодов и светодиодных матриц.

Уметь:

- разрабатывать технологические процессы на светодиод белого цвета свечения различной сложности.

Владеть:

- навыками расчета теплового режима светодиода при его проектировании.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНИКИ.....	4
2. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ.....	11
3. ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО МЕНЕДЖМЕНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ	14
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЩНОЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ.....	33
4.1 Люминофор для светодиода.....	36
4.2 Теплопроводящие клеи для светодиодов и кристаллов.....	38
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ	39
5.1 Блок схема технологического процесса изготовления светодиода:	39
5.2 Основные характеристики оборудования	41

1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНИКИ

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

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

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

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

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

Рынок светодиодной светотехники в области освещения только начинает формироваться в России и пока занимает незначительную долю. Но именно этот сегмент имеет огромный потенциал в будущем.

Российский рынок светодиодного освещения начал формироваться в сегментах уличного и промышленного освещения в 2006 г., а по прочим сегментам, в том числе декоративному освещению только начинали появляться зарубежные предложения.

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

Замена традиционных источников на светодиодные, тем не менее, порождает и другие проблемы. Как известно, разрядные источники света обладают большим коэффициентом пульсации светового потока, что также неизбежно ведет к немалой утомляемости человека, работающего в условиях искусственного освещения. Создание высокоэффективных электронных пускорегулирующих аппаратов стало настоящим прорывом в области освещения, поскольку позволило значительно снизить пульсации света и повысить эффективное использование электрической энергии (коэффициент мощности порядка 0,97). Ситуация со светодиодными светильниками носит приблизительно похожий характер в силу того, что питание светодиодов должно осуществляться качественными надежными устройствами. Широкому внедрению полупроводниковых источников света на рынок светотехники мешает их высокая стоимость, которую можно снизить за счет повышения эффективности их работы, надежности, отработки и упрощения технологии, увеличением массовости выпуска [1].

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

светодиодные.

Принято считать, что емкость российского рынка источников света составляет около 1 миллиарда ламп. В таблице 1 представлена структура российского рынка источников света по видам ламп в 2015 г.

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

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

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

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

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

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

Использование в сегменте бытового освещения энергетически

неэффективных ламп по отношению к светодиодным лампам в первую очередь обусловлено такими факторами, как:

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

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

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

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

Таблица 2. Сравнительная стоимость ламп, применяемых в сегменте бытового освещения

№	Название	Мощность	Цена
1	Лампа накаливания	60 Вт	15 руб.
2	Китайская LED лампа образца 2012 г.	9 Вт	300 руб.
3	Китайская LED лампа образца 2014 г.	6 Вт	120 руб.
4	LED Навигатор	7 Вт	190 руб.
5	LED лампа Экономка	7 Вт	217 руб.
6	LED лампа ВВК	7 Вт	176 руб.
7	LED лампа Philips	7 Вт	240 руб.
8	LED лампа Старт	7 Вт	159 руб.
9	Компактная люминесцентная лампа Navigator	15 Вт	128 руб.

Лампы на единичных светоизлучающих диодах

В настоящее время светодиодные лампы на российском рынке продаются почти под 50-тью торговыми марками, наиболее популярными из которых являются такие бренды как: Ecola (КНР); Feron (КНР); Gauss (КНР); Jazzway (КНР); Kreonix (КНР); Navigator (КНР); Nichia (Япония); Cree Lighting (США); Seoul Semiconductor (Южная Корея); Sharp (Япония); Osram Opto (Германия); Edison (Тайвань).

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

Представленные на рынке светодиодные лампы по своей форме стремятся быть максимально приближенными к формам лампы накаливания.

Во многом это связано с устоявшимся мнением потребителей, за более чем 150-ти летнюю историю ламп накаливания, что это наиболее оптимальная форма для источника света, но это лишь одна из причин, вторая не менее важная связана с наличием на вторичном рынке различных светильников, сконструированных специально для установки в них ламп накаливания. Именно второй фактор до последнего времени являлся одним из сдерживающих факторов в продвижении светодиодных ламп, так как конструкция, состоящая из цоколя, массивного радиатора и колбы внутри которой находилась плата со светодиодами, давала возможность излучать свет в пределах 120-200 градусов. Установка таких ламп в обычный светильник, несмотря на все плюсы, связанные с энергосбережением, могла вызывать негативное восприятие у потребителей из-за отсутствия привычного для их восприятия «света вокруг», который излучает лампа накаливания. К тому же значительный вес радиатора мог вызвать деформацию хрупких частей люстр, рассчитанных на использование ламп накаливания [2-5].

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

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

На рисунке 1 представлены фотографии макетов ламп с использованием линейных излучающих элементов.



Рисунок 1. Светодиодные лампы на линейных излучающих элементах

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

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

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

2. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ

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

Существуют технологические сложности в изготовлении светодиодов:

1. Формирование омического контакта к *p*-типу GaN. Существующие технологии формирования *p*-контакта позволяют получать контакты с удельным сопротивлением от 5×10^{-4} до 2×10^{-3} , это на порядок хуже, чем для контактов к *n*-типу GaN. Основными проблемами для контактов к *p*-типу являются:

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

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

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

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

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

5. Основные потери при выводе излучения:

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

Часть сгенерированных фотонов поглощается материалом кристалла, омическими контактами и подложкой полупроводника. При распространении света из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 часть света отражается обратно от границы раздела. Эти потери света называются френелевскими. Потери, связанные с критическим углом. Этот вид потерь, приводящих к значительному уменьшению эффективности, обусловлен полным внутренним отражением фотонов, падающих на поверхность кристалла под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины кристалла к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля [6-9].

6. В современных СД, в большинстве случаев используют кристалл синего цвета свечения и фотолуминофор жёлтого свечения с полушириной спектра порядка 110 нм. Это наиболее эффективный и дешёвый метод, т.к.

КПД фотолюминофора на основе *YAG* и *YGG* достигает 90%. Для повышения индекса цветопередачи используют смесь люминофоров. В качестве базового используют люминофоры типа *YAG* или *YGG* и добавляют в композицию красные и зелёные люминофоры (нитридные и силикатные).

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

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

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

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

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

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

3) вследствие перегрева контактной области происходит диффузия золота в омических контактах в глубь полупроводника, что может привести к закорачиванию его активной области, так же высокая температура приводит к миграции индия и вызывает дефекты полупроводникового материала [10].

3. ОСНОВЫ ТЕПЛОВОГО МЕНЕДЖМЕНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ

Одной из центральных задач при проектировании светоизлучающих приборов на основе светодиодов является задача обеспечения необходимого температурного режима. Это обусловлено тем, что светодиод является полупроводниковым прибором, и механизм генерации света значительно отличается от излучения привычных источников световой энергии. Принцип работы большинства полупроводниковых приборов основывается на свойствах электронно-дырочного ($p-n$) перехода. Следовательно, светодиод наследует все свойства присущие $p-n$ – переходу, в том числе относительно небольшой диапазон рабочих температур. Для обеспечения необходимого диапазона рабочих температур применяются различные методы теплового анализа. Рассмотрим некоторые из них.

Аналитический (теплофизический) метод основан на численном решении уравнений нестационарной теплопроводности при оценке тепловых характеристик. Такой подход позволяет учитывать взаимосвязи внутренних элементов, их геометрические размеры и константы применяемых материалов. Аналитические методы используемые для решения нестационарных задач теплопроводности успешно применялись только на ранних стадиях развития полупроводниковой техники. Это обуславливалось тем, что объектами исследования являлись маломощные транзисторы с тянутыми переходами, конструкция которых представляла собой явно выраженное объёмное тело кристалла. Такой конструктив позволял моделировать его в виде однородного стержня (бруска) правильной геометрической формы с простыми граничными условиями [11]. На рисунке 2 приведен пример геометрии подходящей для моделирования теплофизических процессов аналитическим методом.



Рисунок. 2. Симметричная теплофизическая модель
сплавного транзистора (по Мартенсону)

Для возможности существенного упрощения математического анализа была проведена идеализация теплофизических процессов, связанная со спецификой режима работы полупроводникового прибора. Идеализация подразумевала исключение конвективного и лучевого способа передачи тепловой энергии, коэффициенты теплопередачи и теплоёмкости принимаются постоянными величинами и наконец, вся мощность, подводимая к прибору, рассеивается в плоскости *p-n*-перехода. Анализируя аналитические методы моделирования теплофизических процессов протекающих в полупроводниковых (ПП) приборах необходимо отметить, что полученные таким способом результаты носят исключительно частный характер и не обеспечивают решение задачи в удобном для практической реализации виде [12]. Основное неудобство заключается в том, что один и тот же тип прибора представляется различными эквивалентными схемами в зависимости от режимов его работы. Кроме того, использование аналитических методов, применимых только для однородной модели, в качестве основного инструмента моделирования тепловых процессов в многослойной структуре реального ПП прибора не только не способствует успешному решению задачи, а наоборот, значительно её усложняет [13].

Графический (экспериментальный) метод. Ввиду очевидного факта, что строгий теоретический анализ нестационарной теплопроводности реальных многослойных структур весьма затруднителен, всё чаще стали выдвигаться предположения о том, что аналитический метод не имеет

практического смысла, и как следствие – тепловые характеристики ПП приборов должны определяться чисто экспериментальными способами, т.е. по характеру их реакции на типовые возмущения [14].

В этом случае количественная оценка тепловых характеристик ПП приборов представляется в виде графика переходной тепловой характеристики. График представляет собой зависимость, которая была экспериментально выявлена, мгновенного значения общего теплового сопротивления от времени работы. Для большинства ПП приборов в технической документации приводится график переходной тепловой характеристики [15-16]. На рисунке 3 приведен пример графика переходной тепловой характеристики.

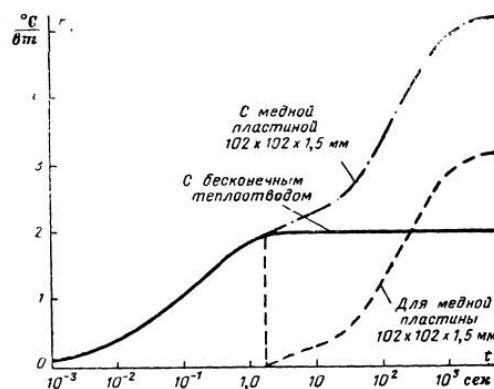


Рисунок 3. График переходного теплового сопротивления ПП прибора, снабженного медным теплоотводом

Таким образом, представленный метод отличается использованием экспериментальных данных, которые в свою очередь представляют собой единственное средство представления в количественной форме исходной информации для последующих расчётов. Такой подход упрощает задачу, стоящую на первом этапе расчёта (сбор информации), но сильно затрудняет её решение на втором этапе (непосредственный расчёт). Графическое представление информации при дальнейшем её использовании пригодно только для расчёта графо-аналитическими методами, которые не отличаются точностью и при этом слишком громоздки. [17]

Метод поэтапного моделирования. Сущность метода сводится к разложению конструкции ПП прибора на отдельные элементы в

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

В настоящее время в связи с активным развитием технологий математического моделирования, в основе которых лежат фундаментальные уравнения гидрогазодинамики, стало возможно расчетным путем определять параметры потока различных сред с определением характеристик конвективного теплообмена между твердой поверхностью теплопередающего элемента и текущего теплоносителя. Вышеуказанное математическое моделирование, в основе которого лежат фундаментальные уравнения гидрогазодинамики, осуществляется с применением численных методов и мощных вычислительных средств. В профессиональном сообществе подобные технологии получили название – «компьютерная гидрогазодинамика» (международная аббревиатура CFD). Применение технологии компьютерной гидрогазодинамики для моделирования тепловых процессов позволит повысить степень достоверности основных расчетных

параметров теплообмена и выбрать рациональные конструкции и режимы их эксплуатации.

Анализ общих принципов вычислительной гидрогазодинамики

Весь процесс выявления практической информации, касающейся задач, связанных с течением жидкости и газа, схематически может быть представлен на рисунке 4.

Определяющие уравнения, такие как: уравнение неразрывности, уравнения количества движения, уравнение энергии – для течений представляющих практический интерес, оказываются обычно столь сложными, что получить их точное решение невозможно и необходимо строить численное решение. При использовании вычислительных методов исходные дифференциальные уравнения в частных производных заменяются системой алгебраических уравнений, в результате чего для получения решения можно воспользоваться вычислительной машиной.

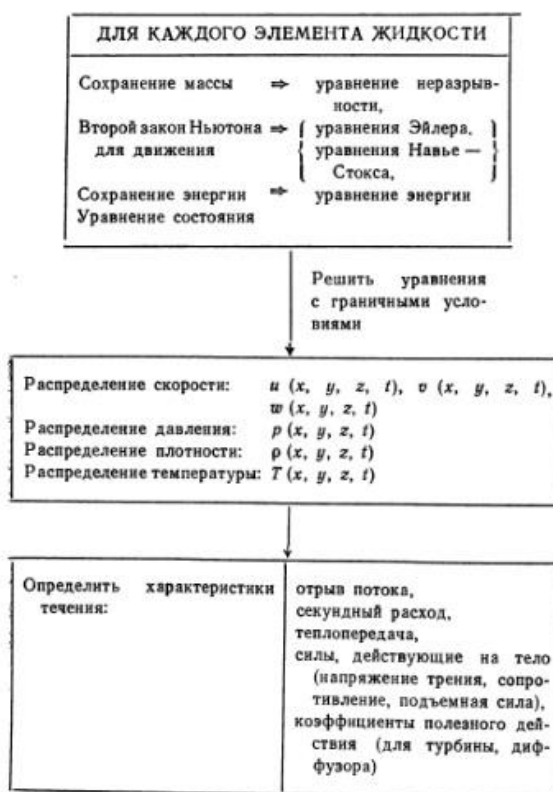


Рисунок 4. Общие принципы вычислительной гидрогазодинамики

При применении локальных методов типа методов конечных разностей, конечных элементов и конечных объёмов алгебраические уравнения связывают между собой значения искомым переменных в группе соседних узловых точек. При этом подразумевается, что сетка состоящая из дискретных точек, распределена по всей вычислительной области во времени и в пространстве. На этом основании процесс превращения непрерывных определяющих уравнений в систему алгебраических уравнений называют обычно процессом дискретизации. При применении такого глобального метода, как спектральный, искомые переменные заменяются обычно амплитудами, относящимися к различным частотам. Алгебраические уравнения, к которым приводит процесс дискретизации, могут быть получены следующим образом. Характерное конечно-разностное представление уравнения (3.1)

$$\frac{dT}{dt} + u \frac{dT}{dx} - \alpha \frac{d^2T}{dx^2} = 0 \text{ при } x_L \leq x \leq x_R \text{ и } t > 0, \quad (1)$$

где $\alpha \frac{d^2T}{dx^2}$ – диффузионный член;

α – коэффициент тепловой диффузии;

$u \frac{dT}{dx}$ – конвективный член.

имеет вид:

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} + \frac{u(T_{j+1}^n - T_{j-1}^n)}{2\Delta x} = \frac{\alpha(T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n)}{\Delta x^2}, \quad (2)$$

где $x = j\Delta x$ и $t = n\Delta t$.

Если решение известно во всех узловых точках x_j на временном слое n , то уравнение (3.2) можно использовать для составления алгоритма служащего для определения T_j^{n+1} , т.е. написать

$$T_j^{n+1} = T_j^n - \frac{u\Delta t}{2\Delta x} (T_{j+1}^n - T_{j-1}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2} (T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n). \quad (3)$$

Повторное обращение к формуле (3) позволяет получить решение во всех внутренних узловых точках x_i на временном слое $n+1$. Увеличение n на единицу и подстановка значений T^{n+1} в правую часть выражения (3.3) позволяет осуществить маршевое передвижение дискретного решения во

времени.

При применении локального метода, например конечно-разностного, число узловых точек, необходимое для построение достаточного точного решения, зависит, как правило, от размерности, геометрической сложности и величины градиентов изменения искомых переменных.

Если учесть, что для большинства задач гидроаэродинамики определяющие уравнения являются нелинейными, процесс построения численного решения обычно ведется посредством итераций. Иначе говоря, решение для каждого искомого

переменного в каждой узловой точке последовательно подправляется посредством обращения к дискретизованным уравнениям. Процесс построения итераций оказывается нередко эквивалентным продвижению решения на некоторый малый шаг во времени. Число итераций или шагов во времени может варьироваться от нескольких сот до нескольких тысяч.

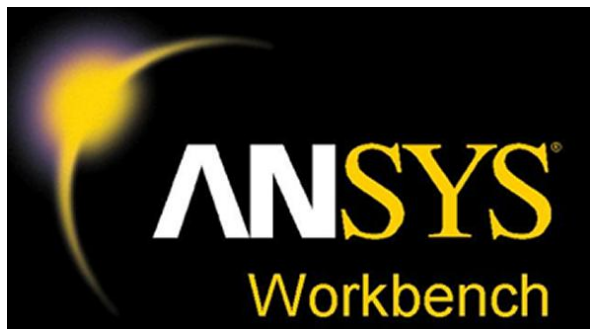
Сам процесс дискретизации вносит в расчёт ошибку, которую в принципе можно уменьшить за счет измельчения сетки, если только дискретные уравнения такого типа, как уравнение (3.2), являются надёжным представлением исходных определяющих уравнений. Если численный алгоритм, реализующий итерацию или продвижение во времени, является к тому же устойчивым, то численное решение может быть сделано сколь угодно близким к истинному решению определяющих уравнений за счет измельчения сетки, при условии что это допускается ресурсами вычислительной машины.

Хотя, как правило, решение ищется в форме набора дискретных узловых значений, все же некоторые методы, как, например, конечно-элементные и спектральные методы, вводят в явной форме непрерывное представление численного решения. В тех случаях, когда исходная физическая задача в силу своего характера обеспечивает плавность, указанные методы нередко дают большую точность по отношению к каждой неизвестной, входящей в дискретизованные уравнения.

Выше изложены принципы методов численного решения, на которых основываются современные программные продукты CAE-направления. Эти методы дают представление о принципах функционирования таких программ и подтверждают обоснованность их использования в отличие от широко применяемых до настоящего времени методик расчета тепловых режимов, основанных на использовании средних по всему объему параметров: температурного напора, условного среднего коэффициента теплоотдачи, эффективной площади контакта теплоносителей и др. Кроме того, данные методики базируются целиком на опытных данных и теории подобия в форме критериальных уравнений, обобщающих эти данные. В этих условиях точность расчета и проектирования тепловых режимов целиком и полностью базируется на производственном опыте создания экспериментальных образцов, который является весьма специфическим и для переноса на новые объекты требует экспериментальной проверки.

Анализ существующих программных комплексов предназначенных для моделирования тепловых режимов

ANSYS Workbench



В расчетном модуле DesignSimulation (DS) на платформе Workbench реализованы возможности по расчету температурного состояния, соответствующие используемому типу лицензии ANSYS. Можно выделить следующие особенности работы в расчетном модуле:

- использование средств работы, доступных через стандартные опции графического интерфейса;
- применение макросов, написанных на языке JPDL (JScript Parametric

Design Language) с использованием процедур и команд APDL (ANSYS Parametric Design Language);

- вставка в соответствующий раздел дерева проекта объектов типа Commands, содержащих команды на APDL.

Расчетный модуль DS позволяет решать задачи стационарной теплопроводности (теплопередачи) в твердом теле (Static), а также задачи нестационарного теплообмена (Transient).

При нестационарном расчете используются следующие начальные условия (Initial Condition):

- равномерная температура по всему телу (Uniform Temperature), задаваемая пользователем. По умолчанию значение этой температуры соответствует температуре окружающей среды (Reference Temperature);
- неравномерное температурное поле (Non-uniform), которое является результатом расчета стационарного поля температур модели (Thermal Steady State).

Граничные условия на поверхности модели могут быть заданы несколькими способами:

- непосредственное указание геометрических объектов в графическом окне в режиме выбора (Scoping Method);
- с использованием так называемой именованной группы выбора (Named Selection), которая создается с помощью средств панели инструментов Named Selection Toolbar;
- в объектах Commands геометрические элементы, соответствующие именованной группе, выбираются посредством команды CMSEL встроенного языка APDL.

Программа ANSYS, как и многие другие CAE-продукты, для математического моделирования различных физических процессов использует метод конечных элементов. Этот метод сочетает в себе универсальность алгоритмов решения различных краевых задач с

эффективностью компьютерной реализации вычислений.

SolidWorks Flow Simulation



Семейство модулей SolidWorks Flow Simulation предназначено для проведения газо- и гидродинамического анализа в среде SolidWorks. В состав семейства входит базовый пакет Flow Simulation и дополнительные прикладные модули Electronics Cooling Module и HVAC (Heat Ventilating Air Conditioning) Module.

Возможности моделирования и физические модели:

- Стационарные и нестационарные течения;
- Сжимаемые и несжимаемые (жидкости или газы) течения, включая до-, транс- и сверхзвуковые режимы;
- Идеальные и реальные газы;
- Ньютоновские и неньютоновские жидкости;
- Одно- и многокомпонентные течения без химического взаимодействия и разделения фаз;
- Совместный расчет течения жидкости или газа и теплопередачи внутри твердых тел и текучей среды без наличия границы раздела газ-жидкость;
- Ламинарные и турбулентные, учет ламинарного/турбулентного перехода;
- "Замораживание" течения для разделения "быстрых" и "медленных" процессов;
- Течения в пористых средах с учетом теплопроводности среды и теплоотдачи в нее;

- Учет шероховатости и подвижности стенок;
- Внешнее и/или внутреннее течение;
- Конвективный теплообмен, свободная, вынужденная или смешанная конвекция;
- Радиационный теплообмен с управлением прозрачностью стенок и разделением свойств стенок для теплообмена излучением и солнечной радиации;
- Расчет траекторий и температур твердых частиц или капель в потоке;
- Оценка эрозионного износа или налипания твердых частиц на стенках модели;
- Расчет низкотемпературной конденсации водяного пара;
- Возможность расчета двумерной (2D) задачи;
- Термоэлектрические охладители (элементы Пельтье);
- Контактные тепловые сопротивления.

Основные направления развития SolidWorks Simulation (бывший COSMOSWorks) — создание и развитие виртуальных сущностей, призванных упростить построение расчетных моделей сложных систем при сохранении удобного интерфейса. В частности, это касается задач, где необходим анализ систем, содержащих конструктивные элементы в виде тел, оболочек и балок с разнообразными соединениями и неканоническими условиями нагружения.

Кроме того, уделяется внимание повышению вычислительной эффективности алгоритмов, что позволяет рационально использовать современные компьютеры.

Autodesk Simulation CFD



Autodesk Simulation CFD предоставляет пользователям комплекс методов вычислительной гидродинамики для проведения расчетов по таким направлениям, как охлаждение электронной аппаратуры, проектирование клапанов, поддержание температурного режима светодиодов, тепловой комфорт и упаковка продукции. Вы можете проводить ассоциативное изучение проектных вариантов, пользуясь следующими передовыми возможностями: модельно-ориентированный интерфейс, автоматизированное построение сеток для анализа методом конечных элементов, быстродействующие решающие модули и специальная среда для изучения проекта и принятия оптимальных решений. Продукты семейства Autodesk Simulation CFD применяются для решения различных задач, требующих моделирования потоков жидкостей и процессов теплопередачи.

Autodesk Simulation CFD решает широкий спектр задач, стоящих перед инженером-конструктором или проектировщиком, связанных с влиянием потоков жидкости или газа на работу вашего изделия или конструкции. Autodesk Simulation CFD позволяет моделировать высокоскоростные турбулентные и несжимаемые потоки, процессы теплопроводности и конвекционной теплопередачи, учитывать солнечную радиацию и многое другое. К примеру при проектировании систем освещения возникают большие сложности с термоуправлением светодиодами: значительная часть общей энергии светодиода преобразуется в тепло, поэтому светодиоды должны работать при намного более низких температурах, чем другие типы ламп. Возможности Autodesk Simulation CFD позволяют:

- Точно предсказывать температурный режим для устройств с большой потребляемой мощностью;
- Учитывать эффекты излучения и их вклад в охлаждение или нагрев аппаратуры;
- Моделировать эффекты активации и деактивации тепловыделяющего компонента в определенный момент времени;
- Собирать данные о периодах кратковременного повышения и понижения температуры;
- Оценивать эффекты от нагрева солнечным теплом в конкретном месте земли, котором предполагается использование изделия.

Типовые задачи:

- Расчёт максимальных температур электронных компонентов;
- Моделирование теплового излучения;
- Расчёт принудительной и естественной конвекции;
- Анализ резистивного (джоулева) нагрева;
- Подбор вентиляторов;
- Учёт солнечного излучения;
- Расчёт геометрии и подбор материалов радиаторов;
- Расчёт многослойных печатных плат МСРСВ.

Опираясь на результаты выполненного расчета, инженеры могут создавать наиболее эффективные системы охлаждения компонентов электронного устройства. Autodesk Simulation CFD содержит встроенную библиотеку электронных компонентов и материалов, которая упрощает процесс разработки расчетной модели.

Разбирая вышеприведенную информацию, можно сделать вывод о сути каждого программного комплекса, которая в общем случае заключается в одном и том же, а именно – в использовании фундаментального математического аппарата гидрогазодинамики и тепломассообмена приведенного в удобный для вычислительных машин вид. Подробнее

ознакомиться с математической частью можно в двухтомнике К. Флетчера «Вычислительные методы в динамике жидкостей».

Также можно отметить особенности каждого продукта: ANSYS Workbench отличается наиболее расширенными возможностями, но при этом излишней сложностью и малой автоматизацией, т.е. многие параметры необходимо задавать самостоятельно, тогда как в других программах такие параметры уже являются частью типовой модели. SolidWorks Flow Simulation обладает широкой универсальностью и относительно не требователен к ресурсам вычислительной машины, что одновременно является и недостатком, т.к. результаты моделирования становятся более приближенными и возрастает погрешность. Наиболее подходящим программным комплексом для конкретной задачи является Autodesk Simulation CFD. Помимо удобного интерфейса и адекватности предоставляемых результатов существенным преимуществом этого продукта также является изначально предусмотренные решения по моделированию светодиодных структур, что упрощает задачу инженера и увеличивает реалистичность полученной модели.

Методика построения адекватной модели светодиодного прибора

Применение в качестве инструмента расчета светодиодного прибора программного продукта «Autodesk Simulation CFD» определяет набор необходимых операций: создание модели исследуемой области; описания физико-механических свойств материалов; указания граничных условий; разбиения исследуемой области на конечные элементы; опциональной настройки процедуры решения задачи; выполнение процедуры расчета и анализа полученных результатов. Далее рассмотрим некоторые особенности вышеуказанного порядка действий по процедуре исследования. Создание модели исследуемой области подразумевает разработку трехмерной модели светодиодного прибора, которая выполняется с применением соответствующих инструментов моделирования. В итоге перед исследованием создается трехмерная модель исследуемого прибора.

Процедуры описания физико-механических свойств материалов являются стандартными функциональными возможностями программного обеспечения и заключаются в выборе из имеющихся баз данных требуемых свойств конкретного материала или формирование их в ручном режиме по имеющимся параметрам применяемого материала. Указанная процедура задания физико-механических свойств выполняется как для материалов, из которых выполнен теплообменник, так и для параметров теплоносителей. Описание граничных условий заключается в указании на сечениях трехмерной модели светодиодного устройства таких параметров, как расходы теплоносителей (имеется возможность указать как массовые, так и объемные расходы) и температуры теплоносителей. На основании данных по геометрии исследуемой области, свойствам материалов, граничных условий численным методом решается система дифференциальных уравнений (3.2, 3.3), состоящая из уравнений движения, неразрывности и энергии (уравнение, учитывающее перенос теплоты путем конвекции и теплопроводностью), дополненное уравнением теплообмена на границе между твердым телом и потоком. В итоге для всей исследуемой области (трехмерной модели светодиодного прибора) определяются давления теплоносителей, их температуры, а также температуры стенок колбы светодиодной лампы, коэффициенты конвективной теплоотдачи, тепловые потоки.

Такая методика позволит построить адекватную модель светодиодного прибора для дальнейших исследований на предмет оптимизации тепловых режимов и световой отдачи устройства.

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

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (3.1)$$

где P_e – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;

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

R_t – тепловое сопротивление.

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

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (3.2)$$

где δ – толщина слоя (м);

S – площадь слоя (м²);

λ – теплопроводность вещества (Вт/м·К).

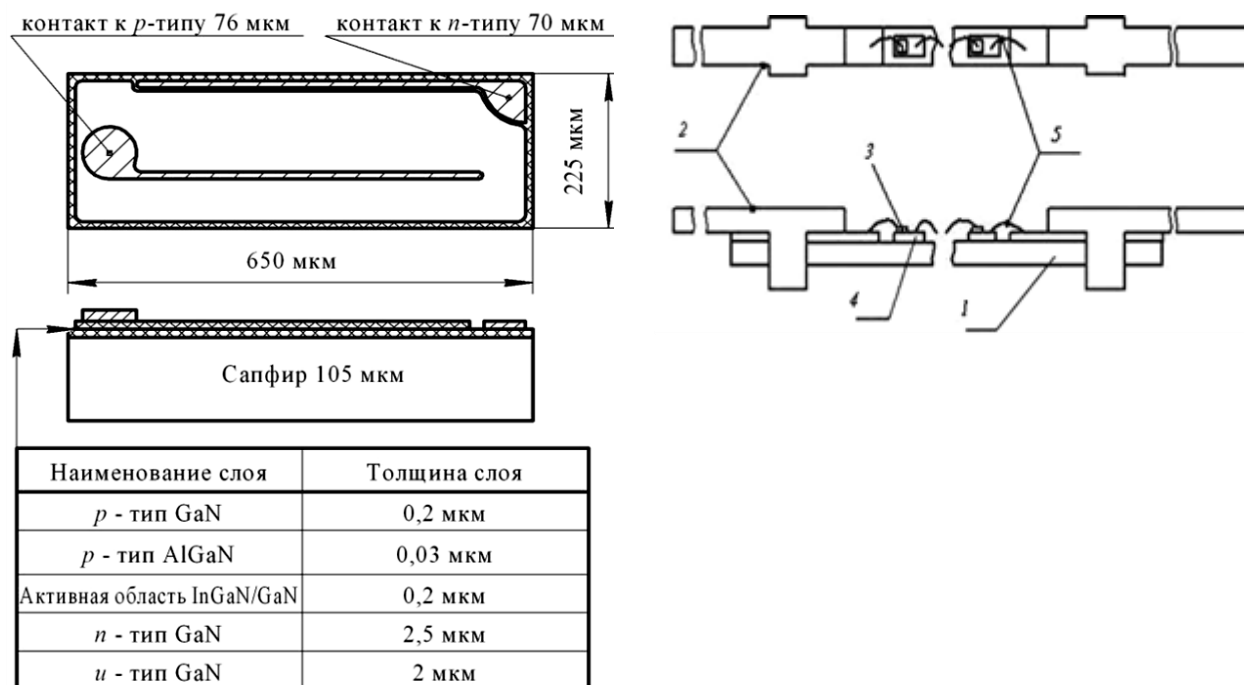


Рисунок 5. Пример светодиодного излучающего элемента

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

окружено люминофорной композицией.

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

Основное выделение тепла происходит в активной области кристалла GaN со значением теплопроводности $\sim 1,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, тепловой поток проходит от активной области через *n* тип и *p* тип полупроводника со значениями толщины, указанными на рис. 5, затем через сапфир (Al_2O_3 теплопроводность 46 Вт/м·К), металлизацию и теплопроводящий клей на металлическое основание СИЭ. Рассчитаем тепловое сопротивление кристалла, представив светодиодный кристалл в виде схемы, подобной электрической эквивалентной, последовательных сопротивлений, где каждый слой (в зависимости от материала) является сопротивлением. На основе данных значений теплопроводности материалов и их толщин по формуле (3.2) проведён расчёт теплового сопротивления кристалла (*p-n*-переход – металлизация), которое составляет 31 К/Вт. Далее из кристалла тепловой поток проходит через теплопроводящий клей на металлическое основание. Теплопроводность клея составляет примерно 60 Вт/м·К, толщина клея не более 30 мкм, тогда тепловое сопротивление СИЭ составит 33,87 К/Вт. По

данным от производителя (фирма Engled) аналогичных СИЭ тепловое сопротивление их изделий составляет 45 К/Вт, что косвенно подтверждает достоверность проведённых оценочных расчётов.

По формуле (3.3) проведём расчёт температуры $p-n$ -перехода:

$$T_{p-n} = T_{\text{окр}} + (R_t \cdot P_e), \quad (3.3)$$

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

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

Соответственно по формуле (3.3) определим значения температуры $p-n$ -перехода, которая составляет для варианта лампы с двумя СИЭ 51,8 °С, а с четырьмя СИЭ 102,7 °С.

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

Коэффициент ускорения определяется энергией активации отказов (E_a).

$$K_y = \exp \left[\left(\frac{E_a}{kT} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{p-n} + 273} \right) - \left(\frac{1}{T_{p-ny} + 273} \right) \right], \quad (3.4)$$

где K_y – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

E_a – энергия активации отказов, эВ;

k – постоянная Больцмана;

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

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

Номинальное время наработки $t_{\text{ном}}$ (срок службы СД) определяют по уравнению (3.5), задав коэффициент форсирования K_y , исходя из режимов ускоренных испытаний:

$$T_{\text{ном}} = t_y \cdot k_y, \quad (3.5)$$

где t_y – время испытаний в ускоренном режиме.

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

Построим график прогнозируемого срока службы для лампы с одним, двумя и четырьмя СИЭ, значение энергии активации отказов для типовых светодиодов составляет примерно 0,75 эВ, данное значение будет использоваться для дальнейших расчётов. График построен в Ms Excel для заданных значений температур от 25 до 80°C и на основе формул (3.4), (3.5).

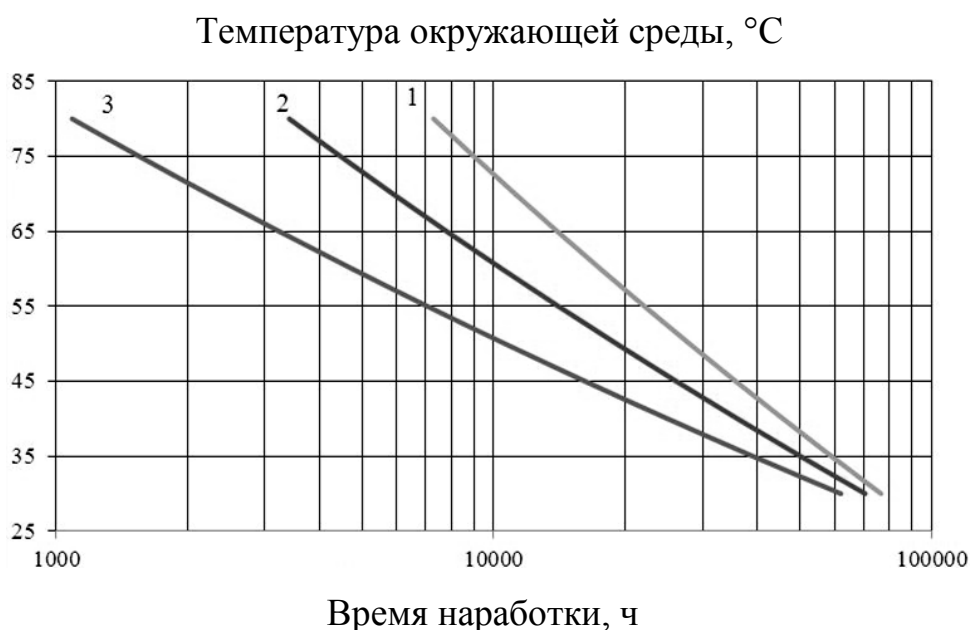


Рисунок 6. Зависимость срока службы от температуры для: лампы с одним СИЭ – 1; лампа с двумя СИЭ – 2; лампа с четырьмя СИЭ – 3

Из рисунка 6 видно, что для всех вариантов лампы срок службы превышает шестьдесят тысяч часов. Это соответствует мировому уровню разработок в данной области.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОЩНОЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

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

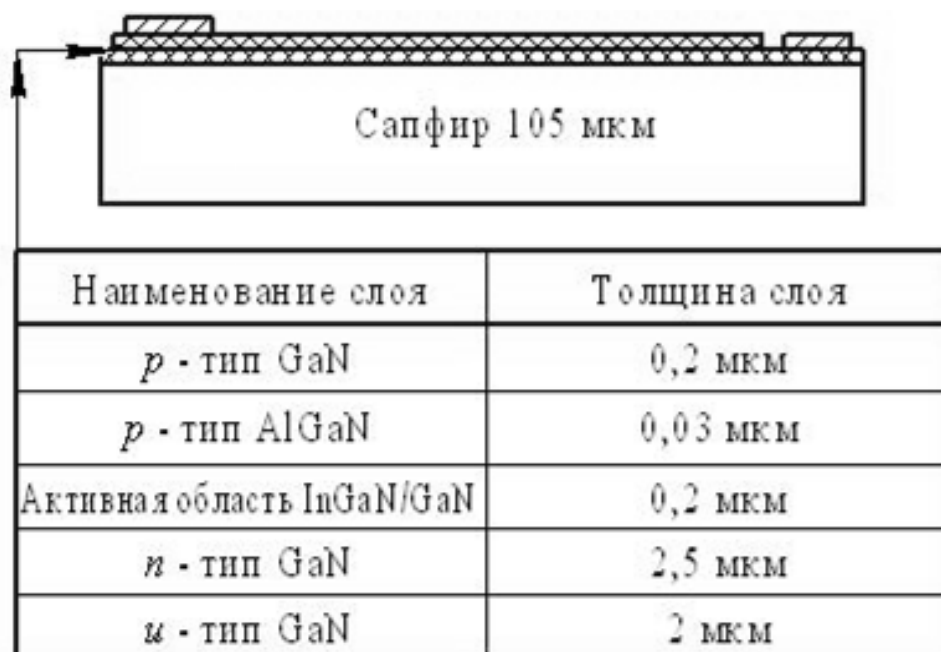


Рисунок 7. Гетероструктура GaN/InGaN

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

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

Полупроводниковые кристаллы, выращенные на сапфировой подложке, представлены многими производителями, например, корпорацией Epistar. Кристалл планарного типа с рабочим током 350 мА с размерами $965 \times 965 \times 150$ мкм³ излучает с оптической мощностью ~300 мВт в спектре с длиной волны максимума интенсивности 460 нм. Максимально допустимая температура р-п перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 115⁰С. Альтернативой ростовой подложки из сапфира является кремний и карбид кремния. Технологией выращивания эпитаксиальных структур GaN на карбиде кремния обладает корпорация Cree, которая с 80-х годов занималась разработкой и изготовлением элементов на GaN для применения их в космической отрасли. На сегодня Cree является монополистом в изготовлении кристаллов GaN, выращенных на карбиде кремния. Кристаллы Cree с рабочим током 350 мА и размерами $980 \times 980 \times 100$ мкм³ вертикальной конструкции излучают ~450 мВт, в спектре с длиной волны 460 нм. Максимально допустимая температура р-п перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 145⁰С. Также на рынке представлены кристаллы, выращенные на кремнии. Корпорация Lattice Power производит кристаллы, выращенные на кремнии, при рабочем токе 350 мА кристаллы с размерами $960 \times 960 \times 200$ мкм³ вертикальной конструкции излучают в спектре с длиной волны 460 нм оптическую мощность до 420 мВт. Вертикальные кристаллы изготавливают по различным технологиям. Корпорация SemiLEDs изготавливает кристалл по технологии *lift-off*. Суть технологии *lift-off* заключается в отделении сапфировой подложки от структуры GaN при помощи лазерного сканирования и перенос GaN на теплопроводящую подложку из меди. При рабочем токе 350 мА вертикальные кристаллы SemiLEDs, с размерами

1070×1070×145 мкм³ излучают оптическую мощность до 500 мВт, с длиной волны 460нм. Максимально допустимая температура *p-n*-перехода 125⁰С.

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

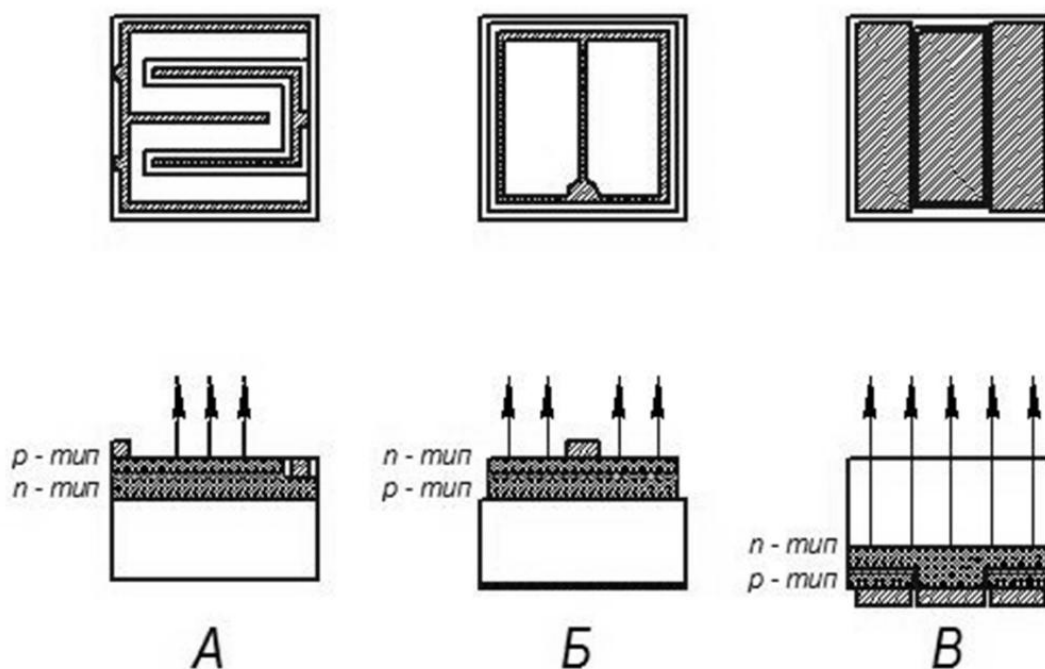


Рисунок 8. Основные виды конструкции кристаллов СД

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

Планарный кристалл с подложкой из сапфира (производители: Epistar, Epiled) имеет основные недостатки: требуется дополнительное электрическое соединение проволокой омического контакта; отвод тепла через сапфировую подложку. Вертикальный кристалл с подложкой из карбида кремния, меди и кремния (производители: Cree, Semileds, Osram) имеет основные недостатки: для медной и кремниевой подложек требуется сложная технологическая операция обратной литографии (*lift-off*), которая может привести к увеличению числа дефектов в полупроводнике; для карбид кремниевой подложки высокая стоимость материала. Планарный кристалл для обратного (*flip-chip*) монтажа (производители: Philips-lumiled, ЗАО «Светлана-оптоэлектроника», ЗАО «ИФ Тетис») имеет основные недостатки: для монтажа кристалла требуется автоматизированная установка с высокой точностью позиционирования (погрешность не более 10 мкм) [18].

Представленные выше кристаллы можно разделить по материалу подложки: Epistar (планарный тип кристалла) – сапфир теплопроводность ~ 30 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 115⁰С; Cree (вертикальный тип кристалла) – карбид кремния теплопроводность ~ 58 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 145⁰С; Lattica Power (планарный тип кристалла) – кремний теплопроводность ~ 149 Вт/м×К; SemiLEDs (вертикальный тип кристалла) – медь теплопроводность ~ 390 Вт/м×К, максимально допустимая температура на кристалле 125⁰С. Теплопроводность GaN ~ 1,3 Вт/м×К.

4.1 Люминофор для светодиода

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов ((Y_{1-a}Gd_a)Al₅O₁₂ × Ce³⁺ (YGG)). Кристаллическая решетка YAl₅O₁₂ активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической

решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона [19-23].

Два основных механизма работы люминофора:

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

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

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

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

Для люминофора характерно температурное тушение и концентрационное.

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

4.2 Теплопроводящие клеи для светодиодов и кристаллов

Клей ТОК-2, ШКФЛО.028.002 ТУ

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

Удельное объёмное электрическое сопротивление 5×10^{-4} Ом·см.

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

Теплопроводность 2,0 Вт/м·К.

Коэффициент линейного теплового расширения $5,6 \times 10^{-5}$ °С⁻¹.

Клей DM6030

Теплопроводность 12-60 Вт/м·К.

Удельное объёмное электрическое сопротивление 5-40 мкОм·см.

Клей DM5030

Теплопроводность 25-30 Вт/м·К.

Удельное объёмное электрическое сопротивление 25-30 мкОм·см.

Прозрачный клей KER-3000-M2

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

Удельное электрическое сопротивление 100 ГОм·м.

Предел прочности при сдвиге 270 МПа.

Теплопроводность 0,2 Вт/м·К.

Эпоксидный электро- и теплопроводящий клей Ablebond.

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

Удельное объёмное электрическое сопротивление 0,0006 Ом/см².

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

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ И МАТРИЦ

5.1 Блок схема технологического процесса изготовления светодиода:



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

1. ТО (основная) Комплектования кристаллов и корпусов.

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

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

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

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

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

6. ТО (основная) Герметизация люминофорной композицией. При герметизации люминофорной композицией требуется дополнительная ТО по приготовлению люминофорной композиции. Сушка люминофорной композиции.

6.1 ТО (дополнительная) Приготовлению люминофорной композиции.

7. ТО (основная) Технический контроль после герметизации люминофорной композиции. Проверка качества герметизации, автоматизировано или визуальным осмотром на наличие трещин и пузырей, а также проверка полимеризации компаунда: полимеризовался или нет.

8. ТО (основная) Классификация изделий по группам по значениям

электрических, светотехнических и колориметрических параметров [24-27].

9. ТО (основная) Сортировка, упаковка.

5.2 Основные характеристики оборудования

1) Установка штемпелевания и посадки кристаллов AD830.

Основными характеристиками данной установки являются:



- Высокая производительность
- Обеспечение контроля уровня кислорода с формированием потока газа;
- Графический пользовательский интерфейс с многоязыковой поддержкой - операционная система MS Windows XP;
- Отличный температурный контроль;
- Поддержка процесса посадки кристалла на эвтектику, осуществляемая системой двойного дозирования припоя (дополнительно).

2) Конвейерная печь оплавления Flip-chip компонентов SR902.

Данная установка имеет следующие характеристики:



- Температура пайки до 400⁰С;
- До 8 независимых управляемых температурных зон: 6 зон нагрева и 2 охлаждающие зоны;
- Сочетание конвекционного и излучательного нагрева;
- Возможность построения профиля пайки;
- Точный контроль уровня кислорода с формированием потока газа;
- Возможность использования в линии совместно с AD830, AD838L и др. систем посадки кристаллов (дополнительно) [28-33];

3) Установка разварки кристаллов iHawk Xtreme.



Характеристики данной установки следующие:

- Новейшая оптика и система распознавания изображения для мельчайших кристаллов СИД;
- Алгоритм для системы распознавания и системы наблюдения;
- Быстрая обработка корпусов с полностью моторизованной подачей материалов.

4) Установка заливки люминофора DS500IL.

Основными характеристиками данной установки являются:



- Отличная повторяемость герметизации и качества дозирования
- Сверхбольшая площадь дозирования с рабочим полем
- Возможность программирования формы и параметров заливки
- Автоматическая эксплуатация пластин с помощью загрузочного / разгрузочного элеватора (дополнительно)
- Две дозирующие головки с регулировкой шага (дополнительно)
- Технология из бобины в бобину
- Поддержка процесса прессовки подслоя для линзы

5) Установка сортировки диодов SLS230T.

Данная установка имеет следующие характеристики:



- Запатентованная конструкция инструментов
 - Приспособление для высокоскоростной сортировки по бинам
 - Узел операции коррекции
 - Все бины имеют собственный сенсор для избегания смешивания бинов
- Контактная технология тестирования: адаптированная для IC контактный тестер
 - Дополнительная визуальная проверка для многокристальных СИД на отсутствие кристаллов в диоде, дефектные кристаллы до сортировки
 - Простая и легкая эксплуатация с множеством настроек горячих ключей
 - Широкий диапазон приборов
 - Чип СИД: 0402, 0603, 0605, 0805, 1206 и т.д
 - Поверхностного монтажа: 3014, 3020, 3528, 5050 и т.д.
 - СИД бокового свечения: 008, 010, 020, 215, 335 и т.д.

6) Установка для упаковки диодов SLT400.

Характеристики данной установки следующие:



- Собственная разработка поступательного вращающегося двигателя линейным двигателем движения вверх и вниз для максимализации производительности;

- Алгоритм проверки для получения высокой точности:
 - Проверка операции упаковки в пакет / упаковку
 - Проверка в упаковке
- Дополнительная установка проверки электрических и оптических параметров до упаковки
- Проверка качества приборов при упаковывании по технологии контактного тестирования
- Простые и легкие операции с помощью операционной системы Windows XP
- Широкий диапазон приборов:
 - Чип СИД: 0402, 0603, 0605, 0805, 1206 и т.д
 - Поверхностного монтажа: 3014, 3020, 3528, 5050 и т.д.
 - СИД бокового свечения: 008, 010, 020, 215, 335 и т.д. [34]

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
2. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diod (Springer, Berlin). – 1997. – С. 335.
3. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / пер с англ. Ж. Панков; под ред. Ж.И. Алфёрова и В.С. Вавилова – М.: Мир, 1973. – 456 с.
4. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
5. Берг А., Дин П. Светодиоды // Пер с англ. А. Э. Юнович. – М.: Мир, 1979. –687 с.
6. Социн Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения. Круглый стол производство светодиодов в россии – дорожная карта. Материалы доклада. Москва 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprpss.ru/sobytiya/vystavki-i-konferencii/kruglyj-stol-proizvodstvo-svetodiodov-v-rossii-dorozhnaya-karta.html>, свободный (дата обращения: 08.04.2013).
7. Шмидт Н.М., Аверкиев Н.С., Бауман Д.А., Закгейм А.Л., Левинштейн М.Е., Петров П.В., Черняков А.Е., Шабунина Е.И. Причины неоднозначного развития деградационного процесса в синих InGaN/GaN светодиодах // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2011. – С. 109-110.
8. ОСТ11-336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность. – 1983.
9. РД II 0216-85. Приборы полупроводниковые. Методы испытаний по определению конструкторско-технологического запаса.
10. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 июля 2011 г. N 602 г. Москва «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения».

11. Давидов П.Д. Анализ и расчёт тепловых режимов полупроводниковых приборов. – изд. «Энергия», Москва, 1967;
12. Emeis R., Herlet A., Spence E., The Effective Emitter area of Power Transistors, Proc I.R.E., 1958, v.46, №6;
13. Silicon Controlled Rectifiers Designers Handbook, Jonwood, 1964;
14. Kennedy D.P., Spreading Resistance in Cylindrical Semiconductor Devices, J. Appl. Phys., 1960, №31;
15. Теплотехнический справочник, т. I, Госэнергоиздат, 1957;
16. Давидов П.Д. К теории инженерного расчёта нестационарных тепловых процессов в мощных полупроводниковых приборах, изд. «Электричество» 1966, №4;
17. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. «Методы расчёта теплового режима приборов», М. «Радио и связь», 1990;
18. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 2446-р.
19. ГОСТ 27299-87 Приборы полупроводниковые оптоэлектронные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.
20. ГОСТ 7601-78 Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.
21. Крутик М.И., Майоров В.П. Люмены, канделы, ватты и фотоны. Различные единицы - различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС // Специальная техника. – 2002. – №5.
22. ГОСТ 18986.3-73 Приборы полупроводниковые. Метод измерения постоянного прямого напряжения и постоянного прямого тока. – 1973. – 3 стр.
23. ПР 50.2.006 Правила по метрологии. Порядок проведения поверки СИ. – 1994. – 10 стр.

24. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.
25. ГОСТ 25024.4-85 Индикаторы знаковосинтезирующие. Методы измерения яркости, силы света, неравномерности яркости и неравномерности силы света. – 1985. – 33 стр.
26. ГОСТ 8.332 - 78 Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. – 1978. – 8 стр.
27. ГОСТ 20.57.406 – 81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – 1981. – 132 стр.
28. ГОСТ 19834.3-76. Излучатели полупроводниковые. Метод измерения распределения энергии излучения и ширины спектра излучения. – 1976. – 7 стр.
29. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова и др.; под. ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 стр.
30. Мешков В.В. Основы светотехники, ч.1 – М.: Энергия, 1979.
31. Мешков В.В., Матвеев А.Б., Основы светотехники, Ч-2. – М.: Энергоатомиздат, 1989
32. В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.
33. Солдаткин В.С. Модернизация и исследование характеристик светодиода белого свечения для поверхностного монтажа. Автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.07 / гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН. Томск, 2013
34. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 211000.62 – Конструирование и технология электронных средств / Туев В.И., Солдаткин В.С., Вилисов А.А. – 2015. 46 с.