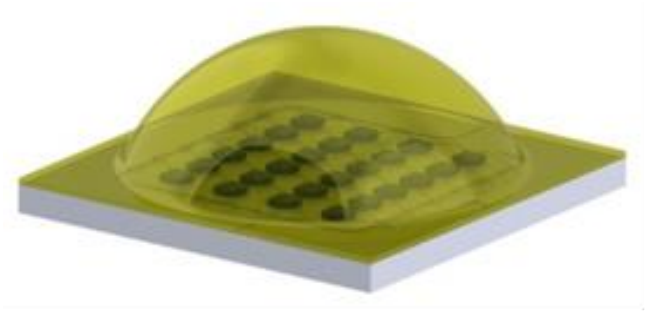
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

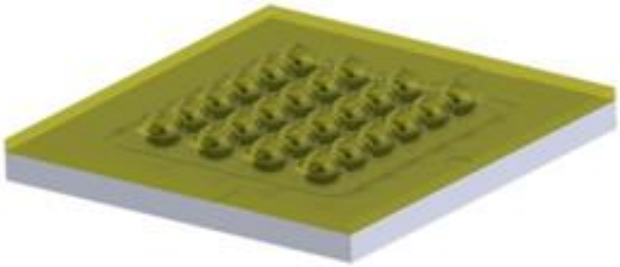
А.В. Кремлева, С.Н. Липницкая,

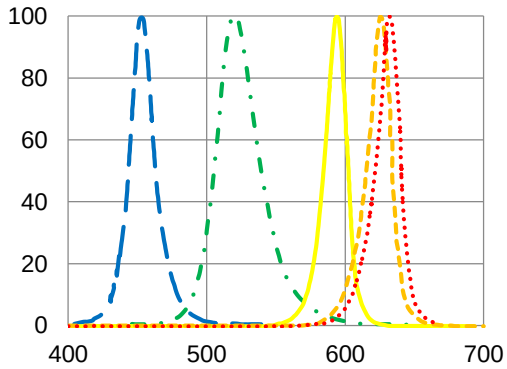
А.Е. Романов, В.Е. Бугров

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Часть 1







Санкт-Петербург
2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.В. Кремлева, С.Н. Липницкая,

А.Е. Романов, В.Е. Бугров

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Часть 1

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 12.04.02 «Оптотехника» и 16.04.01 «Техническая физика» в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2018

А.В. Кремлева, С.Н. Липницкая, А.Е. Романов, В.Е. Бугров. Современные тенденции развития оптоэлектроники. Часть 1. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 84 с.

Рецензент: Одноблюдов Максим Анатольевич, к.ф.-м.н., директор Объединенного научно-технологического института, ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Представленные в сборнике лабораторные работы предлагаются студентам кафедры «Световых технологий и оптоэлектроники» для закрепления и применения знаний, полученных на лекциях, практических занятиях и во время самостоятельной работы, и расширения знаний о характеристиках светодиодных устройств, некоторых критических аспектах, учет которых необходим при разработке нового светодиодного изделия. В частности, освещены вопросы организации теплового режима, получения спектра излучения высокого качества, выбора источника питания. Проводится знакомство с возможностями программного пакета Zemax для расчета различных оптических систем, в том числе, светодиодов. К каждой лабораторной работе сформулированы контрольные вопросы и задания.

Учебное пособие (Часть 1) подготовлено на кафедре «Светодиодных технологий и оптоэлектроники».

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© А.В. Кремлева, С.Н. Липницкая, А.Е. Романов, В.Е. Бугров, 2018

Содержание

Содержание 2
ВВЕДЕНИЕ 4
Лабораторная работа №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ 5
Этап 1. Расчет электрических и оптических характеристик светодиодов 9
Этап 2. Измерение оптических и электрических характеристик светодиодов 10
Этап 3. Измерение радиометрических характеристик светодиодов 11
Лабораторная работа №2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ 12
Этап 1. Расчет теплового сопротивления 144
Этап 2. Измерение температуры светодиодного чипа 15
Этап 3. Подбор радиатора к светодиодному источнику света 15
Лабораторная работа №3. РАСЧЕТ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ 16
Лабораторная работа №4. СПЕКТР СВЕТОДИОДНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ 25
Лабораторная работа №5. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ZEMAX. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 36
Этап 1. Знакомство с интерфейсом ZEMAX. Построение простых геометрических объектов 40
Этап 2. Проведение расчета и анализ результатов 42
Лабораторная работа №6. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ZEMAX. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОРПУСИРОВАННОГО СВЕТОДИОДНОГО ЧИПА 44
Этап 1. Построение геометрии оптической системы 44
Этап 2. Задание оптических свойств объектов и свойств источника 45
Этап 3. Проведение расчета и анализ результатов 45
Приложение 1 Варианты заданий 47
Приложение 2 Спецификации на светодиодные чипы 48
Приложение 3 Электрические схемы соединений светодиодных чипов и светодиодов 57
Приложение 4 Виды светодиодных корпусов 58
Приложение 5 Спецификация на светодиод модели OLP-X5050F6C-XXXX 59
Приложение 6 Спецификации на радиаторы 65
Приложение 7 Спецификации на светодиодные модули 67
Приложение 8 Спецификации на источники питания для светодиодных источников света 72
КАФЕДРА СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 80

ВВЕДЕНИЕ

Представленные в сборнике лабораторные работы предлагаются студентам кафедры «Световых технологий и оптоэлектроники» для получения базовых и расширенных знаний об основных характеристиках светодиодных чипов, светодиодов, светодиодных модулей, радиаторов и источников питания, а также методов оценки характеристик светодиодных устройств. Выполнение лабораторных работ позволит понимать техническую документацию на светодиодные изделия, проводить измерения и моделирование оптических и электрических характеристик светодиодных устройств.

Каждая лабораторная работа содержит *цель*, *основные сведения о предмете работы*, описание задействованного *оборудования*, схему проведения работы, *контрольные вопросы и задания*. Схема лабораторной работы представлена этапами, соблюдение последовательности которых является обязательным для усвоения материла. Лабораторная работа считается выполненной при условии проведения каждого этапа работы и предоставления отчета.

Отчет к лабораторной работе должен содержать отчетные листы по каждому этапу работы. После каждого этапа студент составляет протокол наблюдений и визирует его у преподавателя. В отчет следует включить цель работы, схемы задействованных установок с описанием функциональных узлов, ответы на контрольные вопросы и задания.

Для успешной подготовки отчета к лабораторной работе рекомендуется использовать дополнительную литературу. Список рекомендуемой литературы вы найдете после пункта «Контрольные вопросы и задания».

Лабораторная работа №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками светодиодных чипов, светодиодов, светодиодных модулей. Научиться рассчитывать характеристики светодиодных устройств, используя значения характеристик компонентов. Получить навыки работы с технической документацией на светодиодные продукты. Научиться проводить измерения электрических и фотометрических характеристик светодиодных устройств.

Общие сведения:

Светодиодный чип — это полупроводниковое оптоэлектронное устройство, излучающее свет при прохождении через него электрического тока в прямом направлении. Длины волн излучения светодиодных чипов зависят от используемых полупроводниковых материалов и могут приходиться на область спектра излучения от ультрафиолетовой до инфракрасной.

Светодиод — это полупроводниковый прибор, состоящий из одного или нескольких полупроводниковых чипов, электрических соединений, оптического покрытия и корпуса. Контактные площадки чипов с помощью металлической проволоки соединяются с контактными площадками корпуса, формируя путь для электрического тока. Оптическое покрытие, как правило, изготавливается из высокоэластичных силиконовых полимеров или стекол, которые могут содержать люминофор. Оно позволяет эффективнее выводить свет из светодиодного чипа, за счет того, что показатель преломления материала оптического покрытия меньше показателя преломления светодиодного чипа, к тому же оптическое покрытие выполняет защитную функцию — герметизирует контакты, электрические соединения, поверхность чипа, тем самым снижая влияние внешних факторов: влажности, механического воздействия. Форма поверхности оптического покрытия (плоская, линза и другие) и корпуса светодиода определяют распределение света в пространстве, то есть формируют диаграмму направленности светодиода.

В современной осветительной промышленности используются светодиоды «белого света», цвет которых в большинстве случаев реализован смешением спектров синего света от светоизлучающего чипа и желтого света от люминофора.

Светодиодный модуль, светодиодная матрица — светоизлучающее изделие, созданное на базе светодиодов. Обычно представляет собой печатную плату с размещенными на ней светодиодами. Светодиоды крепятся к печатной плате при помощи паяных соединений, созданных

между контактами корпуса светодиода и контактными площадками платы. Паяные соединения формируют путь для переноса электрического и теплового токов.

Светодиодный светильник — светоизлучающее изделие на светодиодов или светодиодных модулей, размещенных в корпусе, снабженном радиатором, драйвером и оптической системой из рефлектора (отражателя) и рассеивателя.

Вариация оптических характеристик, миниатюрные размеры и гибкие возможности дискретного управления обеспечили создание на базе светодиодных чипов, светодиодов, светодиодных матриц самых различных световых приборов.

Поскольку изготовленные светодиодные чипы и светодиоды обладают разбросом характеристик, для удобства работы с ними введено понятие бина. *Бин* — диапазон значений параметра, по которому осуществляется сортировка изделий. Процесс сортировки светодиодных чипов и светодиодов по бинам называется *бинингом*. Для чипов параметрами бининга являются рабочее напряжение, осевая сила света или оптическая мощность, пиковая или доминантная длина волны излучения. Для светодиодов белого света параметрами бининга являются рабочее напряжение, осевая сила света, световой поток, координаты цветности, коррелированная цветовая температура. При осуществлении бининга обычно указывается максимальное (max) и минимальное (min) значения характеристик, то есть границы диапазона, в большинстве случаев указывается среднее (average) или типичное (typical) значение характеристики.

Основные характеристики светодиодных чипов, светодиодов, светодиодных матриц и светодиодных светильников представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики светодиодных изделий

Характеристика	Единица измерения	Определение / Дополнение
Сила света, luminous intensity, candlepower, I_l	кд cd	Физическая величина, определяемая отношением светового потока, распространяющегося от источника света внутри малого телесного угла, содержащего рассматриваемое направление к этому углу.
Мощность излучения, radiant flux, P_{opt}	Вт W	Энергетическая характеристика потока излучения. Представляет собой интеграл мощности излучения по длинам волн спектра излучения.
Световой поток,	лм	Физическая величина, определяемая

Характеристика	Единица измерения	Определение / Дополнение
luminous flux, Ф	lm	отношением световой энергии, переносимой излучением, ко времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний.
Пиковая длина волны, peak wavelength, λ_{peak}	нм nm	Длина волны в максимуме спектрального распределения.
Доминирующая длина волны, dominant wavelength, λ_{dom}	нм nm	Длина волны монохроматического стимула при температуре окружающей среды 25 °С, который при аддитивном смешивании в определенных пропорциях с излучением стандартного ахроматического стимула дает цветовое равенство с излучением рассматриваемого цветового стимула.
Угол излучения, beam angle	градус degree	Угол между двумя воображаемыми линиями, расположенными на плоскости, через которую проходит оптическая ось излучения; эти линии проходят через центр передней части светодиодного модуля и через точки, находящиеся на плоскости, перпендикулярной к оптической оси излучения, и имеющие максимальный угол отклонения от оси, в которых сила света составляет 50 % наибольшей силы света излучения.
Коррелированная цветовая температура, correlated color temperature, CCT	К К	Температура излучателя Планка (черного тела), имеющего координаты цветности, наиболее близкие к координатам цветности, соответствующим спектральному распределению рассматриваемого объекта.
Общий индекс цветопередачи, color rendering index, CRI	б/р	Среднее значение частных индексов цветопередачи МКО 1974 г. для определенного набора из восьми испытательных цветовых образцов.
Прямое направление	А А	Направление тока, при котором к контактной площадке области -типа

Характеристика	Единица измерения	Определение / Дополнение
рабочего тока, forward direction, DC, I_f		полупроводникового светоизлучающего элемента приложен положительный потенциал относительно контактной площадки области *n*-типа.
Пиковое значение тока, максимальный ток, peak forward current, I_{peak}	А A	Максимально возможное значение тока, протекающее через светодиодный чип/светодиод. Указывается с условиями подачи — частотой (frequency) и задержкой между импульсами (duty), обычно для светодиодного чипа размером 1717 mil, составляет 100 мА при 1кГц и 1/10 duty.
Обратное напряжение, reverse voltage	В V	Допустимое обратное напряжение, прикладываемое к светодиодному чипу, светодиоду для оценки величины обратного тока. Составляет для чипов InGaN обычно -5 В.
Обратный ток, reverse current	А A	Ток, протекающий через светодиодный чип/светодиод при приложении к нему обратного напряжения, обычно составляет до 10 мкА.
Прямое напряжение, forward voltage	В V	Контактная разность потенциалов, возникающая на выводах светодиода при протекании через него прямого тока заданного значения при температуре окружающей среды 25 °С.
Световая отдача источника, luminous efficacy	лм/Вт lm/W	Отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света.
Диапазон рабочей температуры, operating temperature range, T_{op}	ºС ºC	Диапазон температуры окружающей среды, при котором СД или светодиодный модуль может работать в соответствии с установленным в спецификации.
Температура хранения, storage temperature, T_{st}	ºС ºC	Температура, при которой рабочие свойства прибора сохраняются, для светодиодных чипов составляет обычно от -40 до +85 ºС.

Характеристика	Единица измерения	Определение / Дополнение
Температура p-n перехода, junction temperature, T_j	ºC ºC	Максимально возможная температура перехода в светодиодном чипе при которой еще возможна его работа без появления необратимых изменений, для InGaN чипов обычно составляет 125 ºC.
Срок службы светодиода в зависимости от температуры активной области, life time of the LED related to junction temperature	час hour	Время, за которое измеряемые световые параметры при температуре окружающей среды 25 °C и номинальном прямом токе составят не менее *n* % начальных значений.
Тепловое сопротивление, thermal resistance, R_{th}	°C/Вт K/W	Определяет, с какой скоростью переносится тепло между участками, в частности, для чипа, между верхним и нижним слоями структуры, для светодиода — между чипом и контактной площадкой корпуса. Для светодиодного чипа InGaN, выращенного на сапфире составляет 16 °C/Вт.

Стоит отметить, что в Таблице 1.1 представлены далеко не все характеристики светодиодных устройств. Для ознакомления с ними обратитесь к спецификациям, расположенным в приложении, и к источникам рекомендованной литературы.

Проведение лабораторной работы

Этап 1. Расчет электрических и оптических характеристик светодиодов

1. Получите у преподавателя номер варианта задания. Обратитесь к Приложению 1 для определения модели чипа, на базе которого вы будете рассчитывать светодиодный продукт.
2. Ознакомьтесь с содержанием Приложения 2. На основании данных Приложения 2 выпишите основные технические характеристики модели светодиодного чипа, соответствующей вашему варианту задания. Данные представьте в виде таблицы Excel.
3. Ознакомьтесь с содержанием Приложения 3. Рассчитайте электрические

и оптические характеристики устройств, схемы которых представлены в Приложении 3. Все расчеты проведите в Excel, дополнительно, в Pspice, P-cad или ином программном пакете, подходящем для расчетов элементов цепи.

4. Составьте и заполните таблицу основных характеристик пяти светодиодных продуктов, рассчитанных в п.3. Приведите значения характеристик устройств в случае потери 5, 10, 20 % оптической мощности за счет специфического окружения чипов, наличия корпуса, полимерного материала. Приведите основные формулы расчетов.
5. На основе характеристик чипа вашего варианта задания рассчитайте необходимое количество светодиодных чипов, нарисуйте и опишите электрическую схему устройства, которое будет работать на номинальном токе 300±50 мА и излучать минимум 700 мВт оптической мощности. Дополните результатами таблицу, составленную вами в п.4, обоснуйте выбор используемого электрического соединения.

Контрольные вопросы и задания

1. Проанализируйте полученные результаты. Объясните наблюдаемые тенденции.
2. Оцените надежность предлагаемых Приложением 3 вариантов соединений чипов. Зафиксировав значение потребляемого тока 5 вариантами устройств, рассчитайте значение тока, протекающего через чип в случае обрыва соединения в одной из цепочек. Какое максимально возможное значение выдержит чип? Предложите свой вариант соединения чипов для количества чипов варианта III и IV Приложения 3.
3. Какой технический параметр должен быть строго зафиксирован при построении чипов в параллельной схеме включения?
4. Составьте отчет по Этапу 1 лабораторной работы. Включите в него все данные, полученные в ходе выполнения Этапа 1, ответы на контрольные вопросы и задания.

Этап 2. Измерение оптических и электрических характеристик светодиодов

1. Получите у преподавателя светодиод и спецификацию на него.
2. Поместите светодиод в держатель.
3. Установите держатель в окно позиционирования интегральной сферы.
4. Осуществите калибровку интегральной сферы.
5. На источнике питания установите минимальное значение тока, при котором наблюдается свечение источника (приблизительно 5 мА). Установите ограничение по напряжению в соответствии со спецификацией.
6. Включите источник питания на 2 секунды, проведите измерения оптических и электрических характеристик светодиода.

7. Внесите данные измерений в таблицу:

I_f, мА	U_f, В	Pel, Вт	Popt, Вт	КПД, %	Ф, лм	ССТ, К	Ra	$(x; y)$	λ_{peak}, нм	λ_{dom}, нм

8. Повторите пункты 4 – 6 при изменении значения подаваемого тока с шагом в 5 мА до достижения током значения, на 30% превышающим номинальное.
9. Повторите пункты 1 – 7 для светодиода с большим количеством чипов и для излучающего устройства «чип на плате».

Контрольные вопросы и задания:

5. Постройте ВАХ. Объясните наблюдаемые тенденции.
6. Постройте зависимости светового потока от потребляемой мощности измеряемых устройств, световой эффективности от плотности тока через устройства. Объясните причины линейного роста и спада зависимостей.

Этап 3. Измерение радиометрических характеристик светодиодов

1. Поместите светодиод в держатель.
2. Установите в окно позиционирования интегральной сферы.
3. Осуществите калибровку интегральной сферы.
4. На источнике питания установите номинальные значения тока измеряемого светодиода и ограничение по напряжению.
5. Включите источник питания на 10 секунд, проведите измерения оптических характеристик, зафиксировав (в таблице ниже) значение напряжения.
6. Заполните таблицу:

I_f, мА	U_f, В	$I_f \cdot U_f$, Вт	Мощность излучения, Вт	КПД, %	Интенсивность излучения, Вт/м²

7. Повторите измерения 3 раза с разницей в 5 минут.

Контрольные вопросы:

7. Объясните принцип работы интегральной сферы.
8. Зачем необходимо производить калибровку интегральной сферы? Принцип проведения калибровки.
9. Объясните отличие мощности излучения от светового потока. Поясните понятие «кривая чувствительности человеческого глаза».
10. В каких случаях следует использовать для расчета КПД преобразования значение мощности оптического излучения?
11. Объясните разницу в результатах повторных измерений.

Рекомендуемая литература

1. Шуберт Ф. Е. // Светодиоды. Пер. с англ. под ред. Юновича А. Э. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

2. Варфоломеев В.П. // Светотехника. Краткое справочное пособие. М.: Световые технологии, 2004. — 128 с.
3. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Лабораторная работа №2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Цель работы: получить представление о тепловых характеристиках светодиодов, научиться рассчитывать и измерять тепловое сопротивление элементов корпуса светодиода, осуществлять осознанный выбор радиатора для светодиодной системы.

Общие сведения:

В процессе работы светодиода больше половины мощности потребления преобразуется в тепло. Количество выделяющегося тепла сильно влияет на характеристики устройства, в частности, на электрические и оптические. Из графической зависимости интенсивности излучения от температуры окружающей среды, представленной в Приложении 5, видно, что увеличение температуры до 75°С приводит к 20% снижению интенсивности излучения. При создании любого осветительного устройства на светодиодах обеспечение теплового режима (*thermal management*) играет ключевую роль, определяет срок службы устройства. Обязательным требованием к созданию светодиодной осветительной системы является поддержание температуры *p-n* перехода ниже определенного максимально допустимого значения.

Основными источниками зарождения тепла являются активная область (за счет процессов безызлучательной рекомбинации), места контактов разнородных материалов. При длительной непрерывной работе светодиодный чип деградирует по причине генерации дефектов, электрической миграции атомов материалов. Деградация сильнее проявляется при повышенной температуре, протекании тока больше номинального рабочего значения.

Для расчета теплового сопротивления R_{th} участка цепи используют выражение:

$$R_{\text{th}} = \frac{h}{S \cdot \sigma},$$

где h — длина участка цепи, например, толщина слоя; S — площадь участка цепи; σ — коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплопроводности сильно изменяется в зависимости от температуры.

Другая функциональная зависимость, характеризующая изменение

температуры между двумя точками переноса тепла при рассеивании тепловой мощности P_{Q}:

$$R_{\mathrm{th}} = \frac{T_2 - T_1}{P_{\mathrm{Q}}}.$$

Тепловая мощность определяется исходя из мощности потребления светодиода за исключением мощности P_{opt}, преобразуемой в световое излучение:

$$P_{\mathrm{Q}} = I \cdot U - P_{\mathrm{opt}},$$

где I — электрический ток, протекающий через светодиод, U — падение напряжения на нем.

Тепловое сопротивление между активной областью светодиода и его корпусом определяется конструктивными особенностями устройства и указывается в спецификации.

Основным путем переноса тепла в одиночном светодиоде является: *p-n* переход чипа → точка крепления корпуса светодиода к печатной плате, так называемая «точка пайки» → печатная плата → радиатор → окружающая среда.

В этом случае поток тепла последовательно встречает тепловые сопротивления:

$R_{\mathrm{th}\ p-n\ _\ (\cdot)\ \text{пайки}}$ между *p-n* переходом и точкой пайки;

$R_{\mathrm{th}\ (\cdot)\ \text{пайки}\ _\ \text{ПП}}$ между точкой пайки и печатной платой;

$R_{\mathrm{th}\ \text{ПП}\ _\text{радиатор}}$ между печатной платой и радиатором;

$R_{\mathrm{th}\ \text{радиатор}\ _\text{окружающая среда}}$ между радиатором и окружающей средой.

Общее тепловое сопротивление выражается суммой всех компонент. Тепловое сопротивление каждого элемента светодиодной системы определяется расчетным путем и эмпирически.

К радиатору, как к конечному изделию, контактирующему с окружающей средой и обусловливающему в итоге характеристики светодиодного устройства, предъявляются определенные требования по величине теплового сопротивления, значения мощности, которую радиатор способен рассеять при определенных условиях окружающей среды, в частности, температуры воздуха, скорости воздушного потока, высоты над уровнем моря. Радиатор имеет внешнюю развитую поверхность для увеличения площади контакта с окружающей средой.

Тепловые сопротивления чип – корпус и корпус – радиатор указываются в справочных данных на изделие.

При определении характеристик радиатора всегда нужно рассматривать максимально возможную мощность, которую необходимо рассеять.

Проведение лабораторной работы

Этап 1. Расчет теплового сопротивления

1. Получите у преподавателя вариант задания. Определите габаритные размеры светодиодного чипа исходя из Приложений 1, 2.
2. Рассчитайте тепловое сопротивление между слоями материалов, составляющих светодиодный чип и светодиод. Схематично структура светодиодного чипа представлена на рисунке 1 Приложения 2. Структура светодиода показана на рисунке 2.1. Характеристики слоев приведены в Таблице 2.1.

Рисунок 2.1 – Схематическая структура светодиода

Таблица 2.1 – Характеристики слоев светодиодного чипа

Материал слоя	Толщина слоя, мкм	Теплопроводность, Вт/(м·К) при 298 К
GaN	0,32	130
Сапфир	120	27
Полидиметилсилоксановый клей (вариант 1–6)	1	0,2
Серебросодержащий эпоксидный клей (вариант 7–12)	10	5
Керамика Al_2O_3 (вариант 1–6)	630	25
Керамика AlN (вариант 7–12)	630	160

3. Определите габаритные размеры керамического основания, при которых температура на противоположной стороне керамического основания светодиода будет равна 72°С, в случае, если температура чипа составляет 80°С, I = 20 мА, U = 3,2 В, P_{opt}= 20 мВт. Пренебрегите наличием конвекции со всех поверхностей материалов, кроме керамической. Считайте, что единственным путем для переноса тепла является последовательно соединенные слои материалов.
4. Определите тепловое сопротивление Au проволоки длиной 1000 мкм, диаметром 38 мкм. Определите температуру источника тепла, соединенного с двумя такими проволоками при потреблении им 0,05 Вт мощности при учете равенства температуры на противоположных концах 100°С.
5. Составьте отчет к Этапу 1 лабораторной работы. Включите в него

результаты расчетов и выводы.

Этап 2. Измерение температуры светодиодного чипа

1. Получите у преподавателя вариант задания, определите характеристики светодиода из Приложений 1, 5. Определите тепловое сопротивление чип – корпус из спецификации.
2. Закрепите в месте контакта вывода светодиода с печатной платой термопару.
3. Установите на источнике питания значение рабочего тока и ограничение по напряжению согласно выписанным в п. 1 Этапа 2 данным. Включите светодиод, включите тестер, обратите внимание на изменение напряжения и температуры на источнике питания и тестере, соответственно. Зафиксируйте установившееся значение температуры (через 10 минут от начала работы устройства).
4. Определите температуру *p-n* перехода.
5. Составьте отчет к Этапу 2 лабораторной работы. Включите в него функциональную схему тестового стенда, функциональные зависимости, используемые в расчетах и результаты.

Этап 3. Подбор радиатора к светодиодному источнику света

1. Получите у преподавателя светодиодный источник света со спецификацией.
2. Рассчитайте параметры радиатора, который необходим данному светодиодному источнику. Выберите модель радиатора из Приложения 6.

Контрольные вопросы и задания

1. Составьте отчет к лабораторной работе. Включите в него результаты расчетов, которые были выполнены на Этапах 1–3. Сделайте выводы.
2. Какие параметры являются критическими при подборе радиатора к светодиодному источнику света?
3. Почему в большинстве случаев радиатор выполнен из металла? Что характеризует теплоемкость материала?
4. Как повышенная и пониженная относительно нормальных условий температура сказывается на характеристиках полупроводникового источника света? Какие характеристики изменяются?
5. Как с течением времени работы светодиода на постоянном токе изменяется значение падения напряжения? Почему?

Рекомендуемая литература

1. Андерс П. // "Особенности расчета систем отвода тепла". Полупроводниковая светотехника. 2010. №5. С. 54–57 (http://led-e.ru/assets/files/pdf/2010_5_54.pdf).
2. Seri Lee, перевод Савельев А. // "Как выбрать систему охлаждения".

Силовая электроника. 2006. №3. С. 96–99
(http://www.power-e.ru/pdf/2006_03_96.pdf).
3. Свитнев С. // "Теплоотвод в светодиодных осветительных системах". Новости электроники+светотехника. 2010. №0 (1). С. 17–20 (http://compeljournal.ru/images/articles/2010_S0_6.pdf).
4. http://led-e.ru/articles/led-cooling.php
5. http://lib.chipdip.ru/181/DOC000181262.pdf
6. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Лабораторная работа №3. РАСЧЕТ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ

Цель работы: усвоить основные характеристики светодиодных источников света, включая светодиоды, светодиодные модули, системы «чип на плате» и основные характеристики источника питания для светодиодов. Рассчитать характеристики светодиодного источника света и подобрать к нему источник питания.

Общие сведения:

Источник питания светодиодного источника света — это электрическая часть светодиодного изделия, за исключением светодиодов, функция которой состоит в обеспечении светодиодного модуля рабочими электрическими сигналами. Другими словами, источник питания для светодиодного источника света, снабжает светодиодный модуль постоянным током заданного номинала. В дальнейшем для удобства, вместо «источник питания для светодиодного источника света», используется «*драйвер*».

Входной сигнал драйвера — электрический сигнал, который можно подавать на драйвер от источника электрического питания.

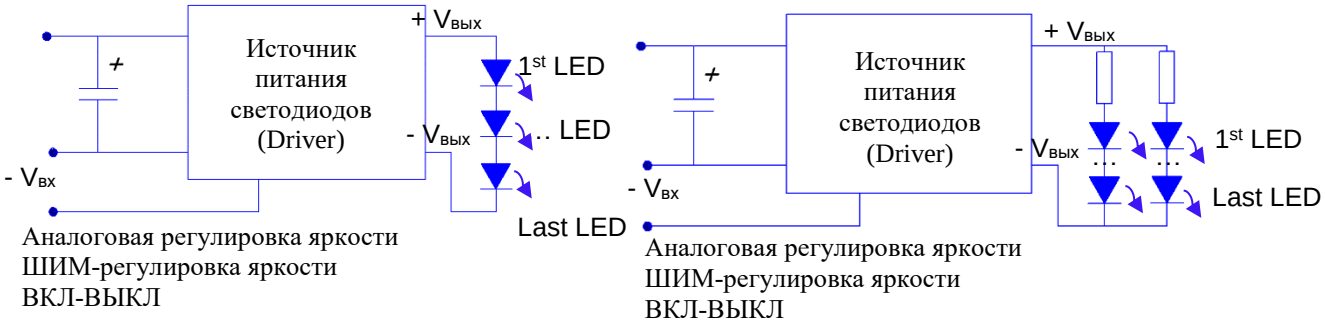
Выходной сигнал драйвера — значения характеристик электрической цепи, которые будет «выдавать» драйвер при поступлении на его вход разрешенного диапазона значения входных характеристик.

Основными характеристиками драйвера являются входное напряжение, выходное напряжение, выходной ток, эффективность преобразования и рабочая температура.

Ниже рассмотрены свойства драйвера [1], работающего от сети постоянного тока. Такой драйвер не является самым распространенным, но обладает упрощенной конструкцией.

При отсутствии необходимости регулировки яркости схема включения драйвера с понижающей топологией преобразования

следующая: вход управления оставляется неподключенным; одна цепочка последовательно включенных светодиодов подключается на выход драйвера. Так как драйвер — это источник постоянного тока, а не напряжения, то токоограничивающий резистор не нужен. Напряжение на выходе драйвера устанавливается в зависимости от числа светодиодов в цепочке. При необходимости подключить более 8 светодиодов, можно организовать параллельное подключение нескольких последовательных цепочек из светодиодов, но при этом потребуется токоограничивающий резистор в каждой цепочке (рисунок 3.1).



(а) (б)

Рисунок 3.1 – Схема подключения одной цепочки светодиодов (а) и более 1 цепочки светодиодов к драйверу, питаемому источником постоянного тока (б)

Например, чтобы подключить 9…16 светодиодов с рабочими токами 350 мА, необходимо выбрать драйвер с выходным током 700 мА, и подключить на его выход две последовательные цепочки светодиодов. На выход драйвера с выходным током 1000 мА можно подключить три такие последовательные цепочки.

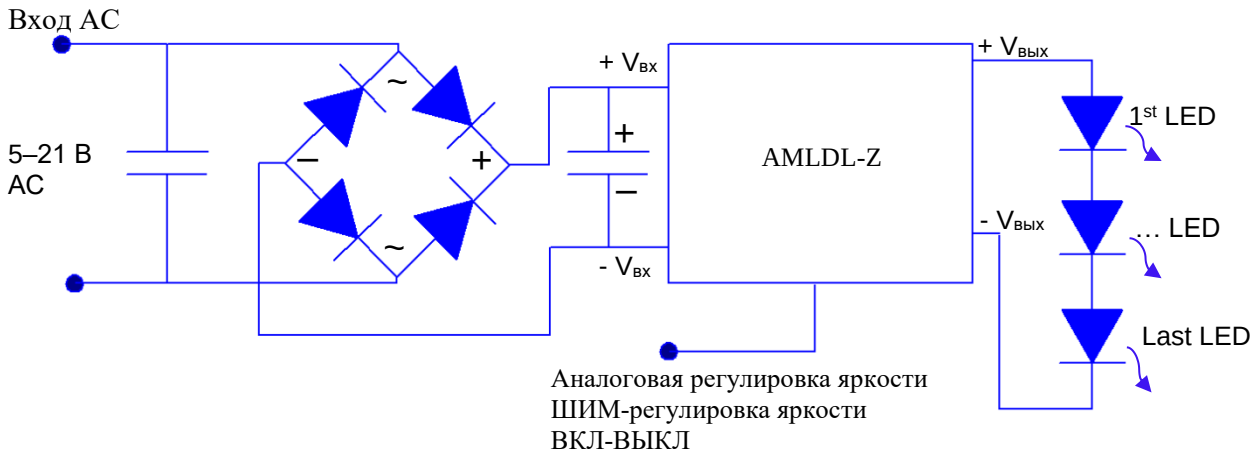


Рисунок 3.2 – Подключение драйверов при питании драйвера от источника переменного напряжения

В случае отсутствия источника питания постоянного тока, можно включить драйверы светодиодов по схеме, представленной на рисунке 3.2, при этом входное напряжение должно быть, как минимум на 2..3 В выше выходного падения напряжения на цепочке последовательно подключенных светодиодов. Величина переменного напряжения определяет используемую модель драйвера.

Для светодиодных драйверов характерна зависимость эффективности работы от падения напряжения на цепочке светодиодов: чем ближе нагрузка на драйвер к допустимой, тем эффективнее его работа (см. рисунок 3.3).

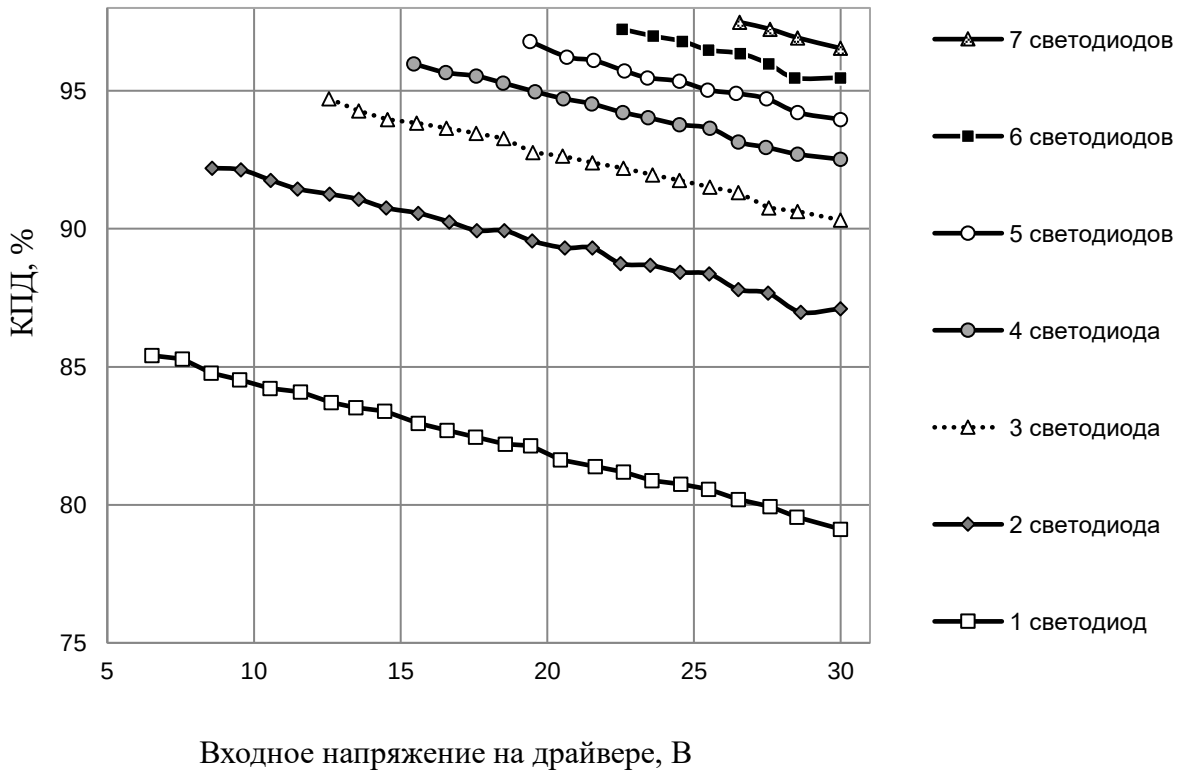
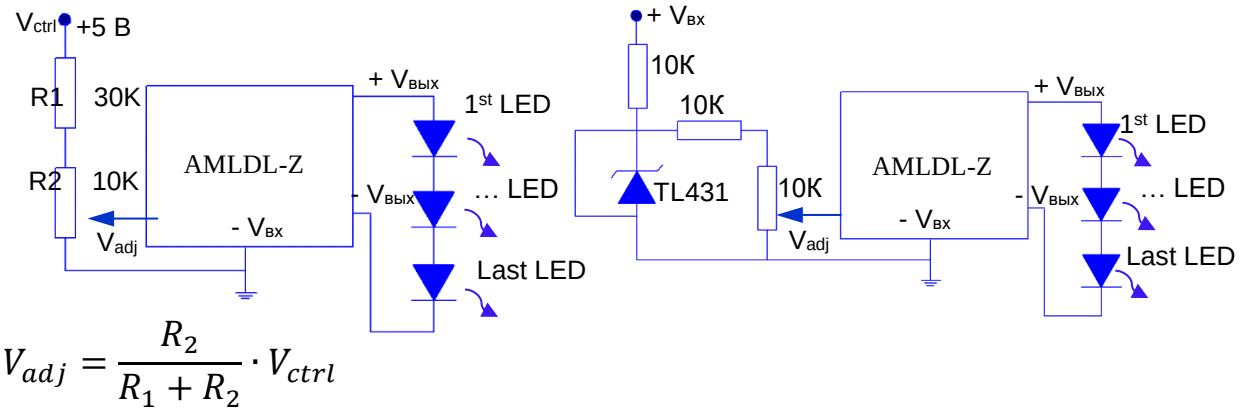


Рисунок 3.3 – Коэффициент преобразования электрической энергии в драйвере в зависимости от значения входного напряжения и числа светодиодов

Регулировка яркости свечения светодиодов возможна при наличии у драйвера входа управления. Существует два способа регулировки яркости: аналоговый, путем изменения напряжения на входе управления, и цифровой — с помощью широтно-импульсно модулированного (ШИМ) сигнала на том же входе. В случае аналогового способа, изменение напряжения на входе управления должно быть в пределах 0,3..1,25 В DC для рассматриваемой модели драйвера. Схема включения при использовании регулировки яркости источника стабильного и нестабильного напряжения приведена на рисунке 3.4. Там же приведена простая формула для расчета элементов схемы.



$$V_{adj} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{ctrl}$$

(а) (б)

Рисунок 3.4 – Схема регулировки яркости при наличии стабильного напряжения управления (а) и нестабильного напряжения управления (б)

Величину выходного тока драйвера в зависимости от величины управляющего напряжения V_{adj} можно рассчитать по формуле:

$$I_{out} = \frac{0{,}08 \cdot V_{CTRL}}{X}.$$

Параметр X для каждой модели драйвера свой (см. Таблицу 3.1).

Таблица 3.1 – Значения параметра X для моделей драйверов AMLDL-30XXXX

Модель	Значение параметра X
AMLDL-3030Z	0,327
AMLDL-3035Z	0,280
AMLDL-3050Z	0,197
AMLDL-3060Z	0,165
AMLDL-3070Z	0,139
AMLDL-30100Z	0,095

Зависимость выходного тока драйвера от величины напряжения управления (V_{adj}) имеет практически линейный характер и сходна для всех моделей. В качестве примера на рисунке 3.5 приведена эта зависимость для модели драйвера AMLDL-3035Z. Максимальный выходной ток в этой модели равен 350 мА.

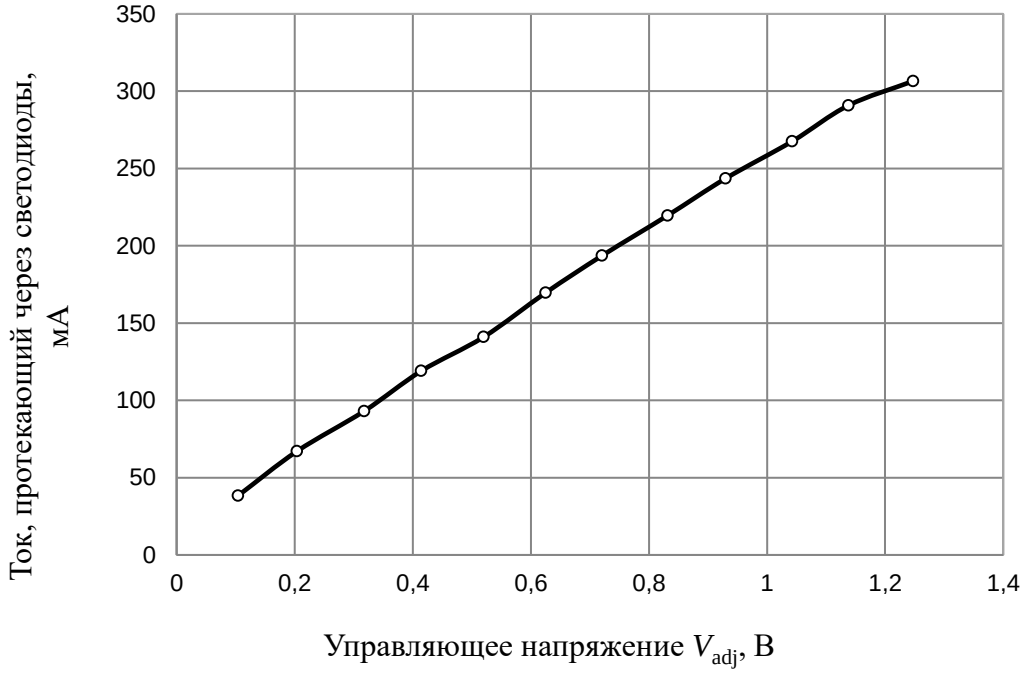


Рисунок 3.5 – Зависимость выходного тока драйвера AMLDL-3035Z от управляющего напряжения

Аналоговый способ регулирования можно осуществить путем использования переменного резистора. В этом случае внешний источник напряжения не требуется. Конденсатор CADJ предназначен для снижения воздействия наводок и высокочастотных помех на вход управления.

Рекомендуется установить керамический конденсатор с номиналом 0,22 мкФ. Выходной ток драйвера рассчитывается в зависимости от напряжения управления.

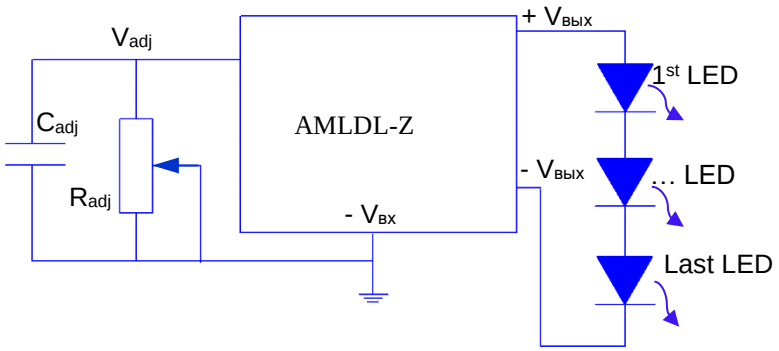


Рисунок 3.6 – Схема регулировки яркости при помощи переменного резистора

Для регулировки выходного тока драйвера ШИМ сигнал управления с длительностью рабочего цикла DPWM можно подать непосредственно на вход управления (рисунок 3.7).

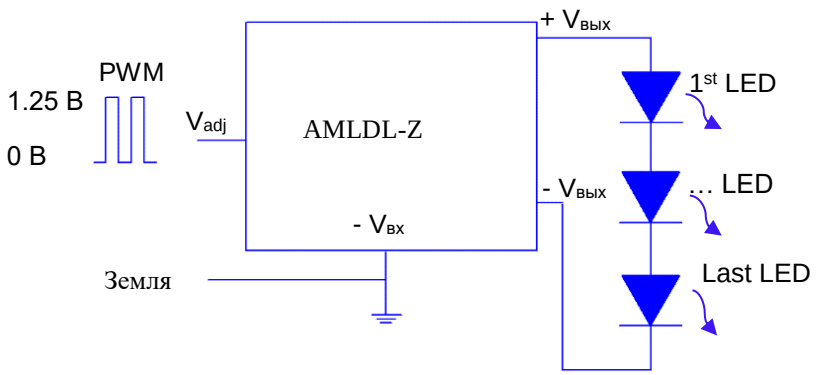


Рисунок 3.7 – Схема регулировки яркости светодиодов с помощью ШИМ сигнала

Возможно управление яркостью светодиодов ШИМ сигналом от выхода с открытым коллектором (или стоком) микроконтроллера, как показано на рисунке 3.8. Резистор 10 кОм и диод необходимы на выходе микроконтроллера для подавления выбросов отрицательной полярности на входе V_{adj} из-за емкости сток-исток (коллектор-эмиттер) полевого (или биполярного) транзистора. Любые выбросы отрицательной полярности будут вносить погрешности и/или нестабильность в выходной ток драйвера.

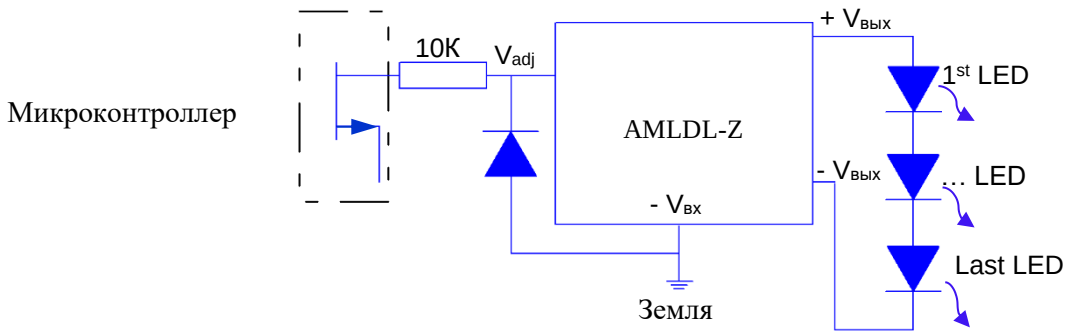


Рисунок 3.8 – Управление яркостью светодиодов ШИМ сигналом микроконтроллера

Драйвер светодиодов, как и любой импульсный преобразователь, создает радиопомехи в сети питания. Чтобы снизить уровень помех до величины соответствующей классу B (EN55022), необходимо установить входной фильтр. На рисунке 3.9 в качестве примера рассмотрен такой фильтр. Так как на входе драйвера стоит конденсатор, то вместе с внешними компонентами получается классический «П-образный» фильтр, который достаточно успешно подавляет импульсные помехи.

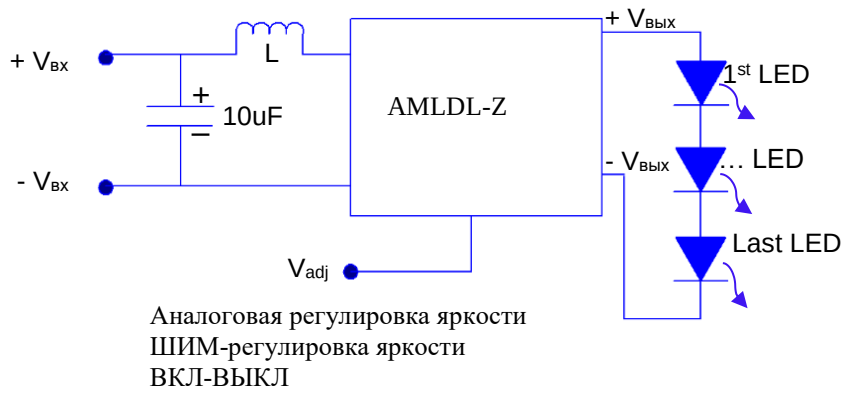


Рисунок 3.9 – Схема входного фильтра для снижения уровня помех до класса B (EN55022)

Для того чтобы избежать перегрева светодиодов во время работы, используют термокомпенсацию рабочего тока с выхода драйвера. Она представлена на рисунке 3.10. Для рассматриваемой схемы выбор компонентов термокомпенсирующей обратной связи зависит от номиналов резисторов R2 и R3 и эффективности радиатора светодиодов.

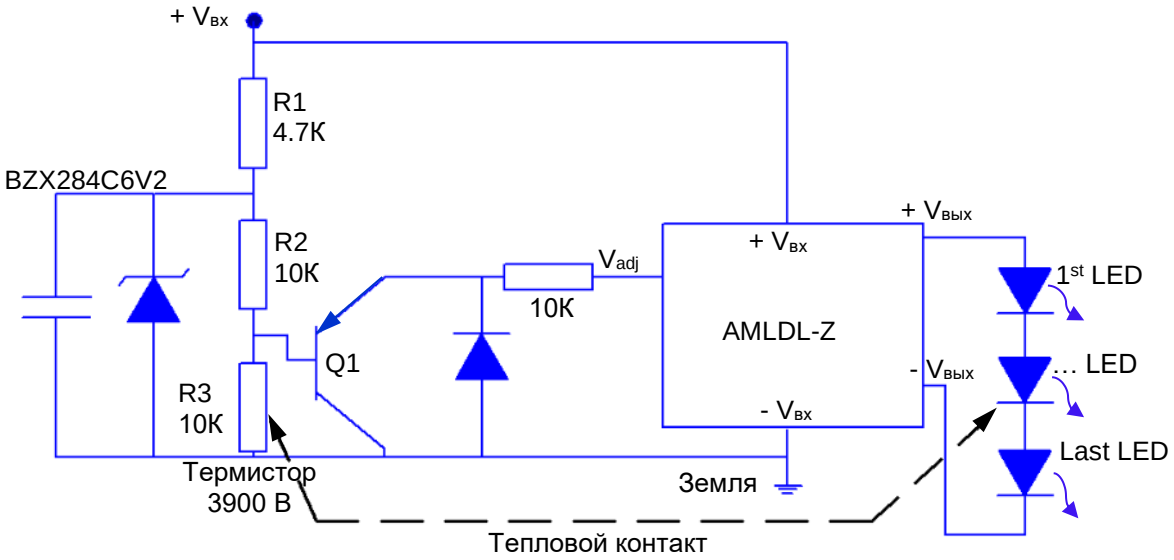


Рисунок 3.10 – Схема термокомпенсации тока питания светодиодов

Значения температуры, при которых будет изменяться величина протекающего тока, устанавливаются регулировкой резистора R2. Предлагаются три температурные пороговые точки: 25, 40 и 60°C. Необходимо помнить, что ток через светодиоды не будет плавно уменьшаться до нуля — схема регулировки, подающая напряжение управления на вход управления VADJ, обеспечивает пределы изменения выходного тока в диапазоне, примерно 5:1.

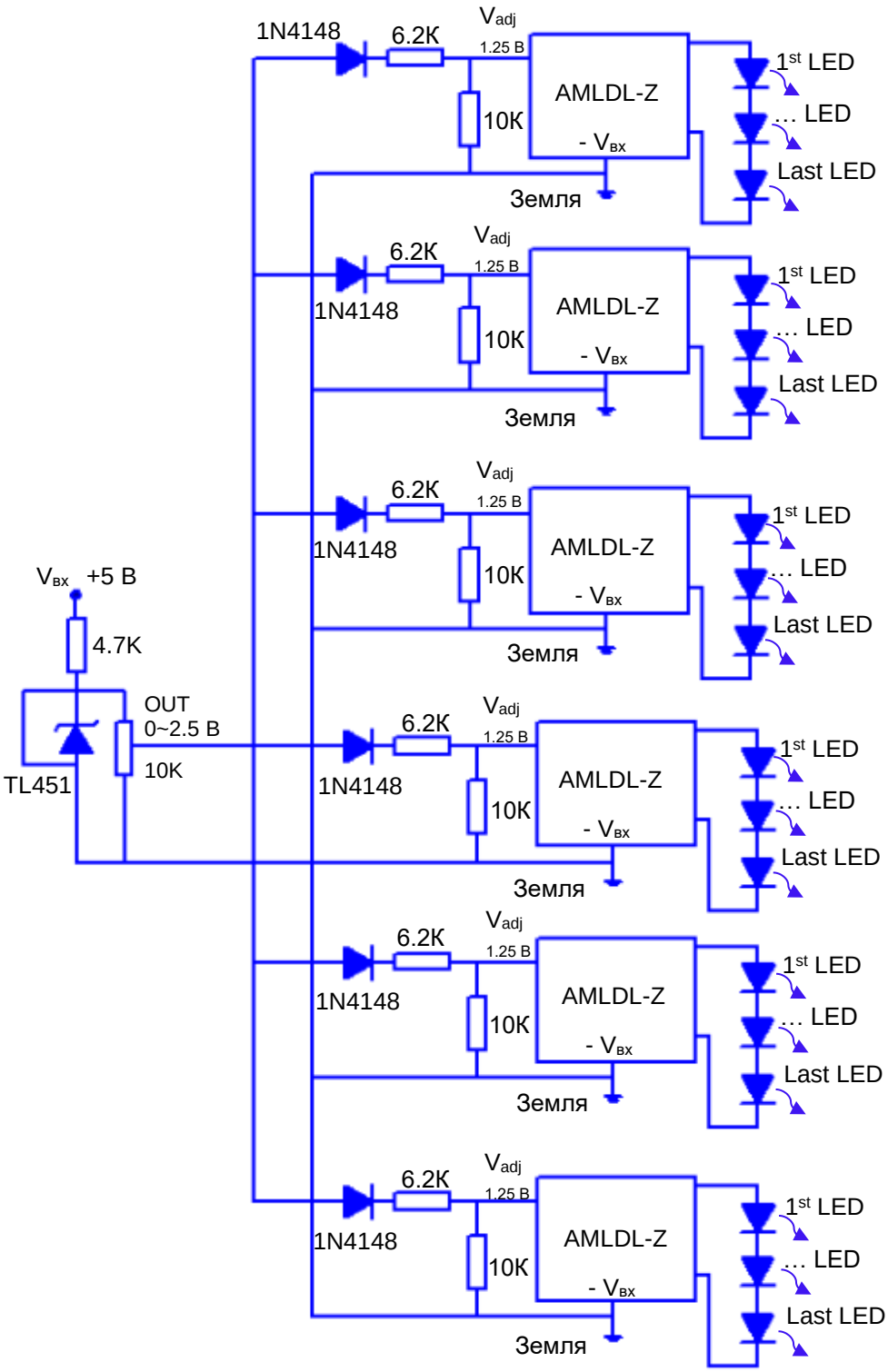


Рисунок 3.11 – Параллельное управление несколькими группами светодиодов одновременно

Как только напряжение управления упадет ниже порога отключения (примерно 200 мВ), ток через светодиоды станет равным нулю. Крутизна уменьшения выходного тока драйвера зависит от температурного коэффициента сопротивления (ТКС) термистора. Чем больше ТКС, тем выше крутизна изменения выходного тока. Наклон характеристики регулировки тока светодиодов будет также зависеть от изменений

напряжения база–эмиттер транзистора Q1 от окружающей температуры.

При необходимости обеспечения питанием нескольких драйверов от одного источника питания при их параллельном соединении, важно, чтобы каждая группа светодиодов, подключенных к одному драйверу, не имела электрического контакта с другими светодиодами и входным источником питания для того, чтобы избежать повреждения драйверов светодиодов и взаимовлияния групп светодиодов. Кроме того, при питании нескольких драйверов (как и любых DC/DC преобразователей) от одного источника, необходима развязка входа каждого драйвера с помощью малогабаритного дросселя (до 47 мкГн), чтобы устранить взаимное влияние внутренних генераторов драйверов друг на друга. В противном случае, при совпадении частот генераторов драйверов возможно разрушение внутренних компонентов входной цепи драйвера и их выход из строя вследствие резонанса на частоте преобразования.

Проведение лабораторной работы

1. Получите от преподавателя вариант задания.
2. В соответствии с вариантом задания из Приложения 1 определите исследуемый светодиод. Определите основные характеристики светодиода из технической спецификации, представленной в Приложении 5.
3. На основе характеристик светодиода рассчитайте светодиодный модуль, который будет потреблять 900 мА постоянного тока и выдавать световой поток в 1400 лм. Составьте электрическую схему светодиодного модуля и подберите драйвер к данному устройству из таблиц 1, 2 Приложения 8.
4. В соответствии с вариантом задания из Приложения 1 определите исследуемый светодиодный модуль.
5. На основании технического описания светодиодного модуля, приведенного в Приложении 7 и технического описания светодиодов (Приложение 5), на базе которых собран светодиодный модуль, определите электрическую схему соединения светодиодов в светодиодном модуле. Результаты представьте в виде таблицы и схематически. Примите значение потребляемого тока светодиодами OLP-X3528F4A-XXXX, OLP-X3528F2A-XXXX равным 20 мА.
6. На основании технического описания светодиодного модуля, определите параметры драйвера, который необходим данному устройству.
7. Из таблиц 1, 2 Приложения 8 выберите подходящие драйвера, выпишите их технические характеристики, определите из выбранных драйверов наиболее эффективное устройство.
8. Дайте определение всем техническим терминам, входящим в таблицы 1, 2 Приложения 8.

Контрольные вопросы и задания

1. Составьте отчет по лабораторной работе. Включите в него функциональную схему драйвера, схему соединений светодиодов в исследованном светодиодном модуле, ответы на вопросы пп. 1–8.
2. Перечислите основные характеристики драйвера. Каким образом рассчитывается эффективность драйвера?
3. С помощью каких элементов электронной техники в простейшем случае можно заменить драйвер? Назовите виды драйверов.
4. Дайте определение термину «коэффициент мощности драйвера». Объясните зависимости, представленные на рисунках 2-4 Приложения 8.

Рекомендуемая литература

1. Дмитриев С. // «Драйверы светодиодов — зачем они нужны?». Мир электронных компонентов. 2010. № 1.
2. http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/48105/.
3. http://www.compeljournal.ru/enews/2011/5/5.
4. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Лабораторная работа №4. СПЕКТР СВЕТОДИОДНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: получить навыки по созданию светодиодных источников, обладающих определенными спектральными характеристиками, вычислить основные характеристики светодиодного источника света: коррелированную цветовую температуру, доминантную и пиковую длины волн, FWHM, координаты цветности, CRI.

Общие сведения:

Светодиоды характеризуются достаточно узким значением ширины спектра на полувысоте, 10–40 нм, и, хотя такой свет не является монохроматичным, он все же воспринимается человеческим глазом как определенный цвет, например, синий, если пиковая длина волны излучения светодиода лежит в области синих цветов, например, 465 нм. На рисунке 4.1 представлены спектры излучения светодиодов различных цветов.

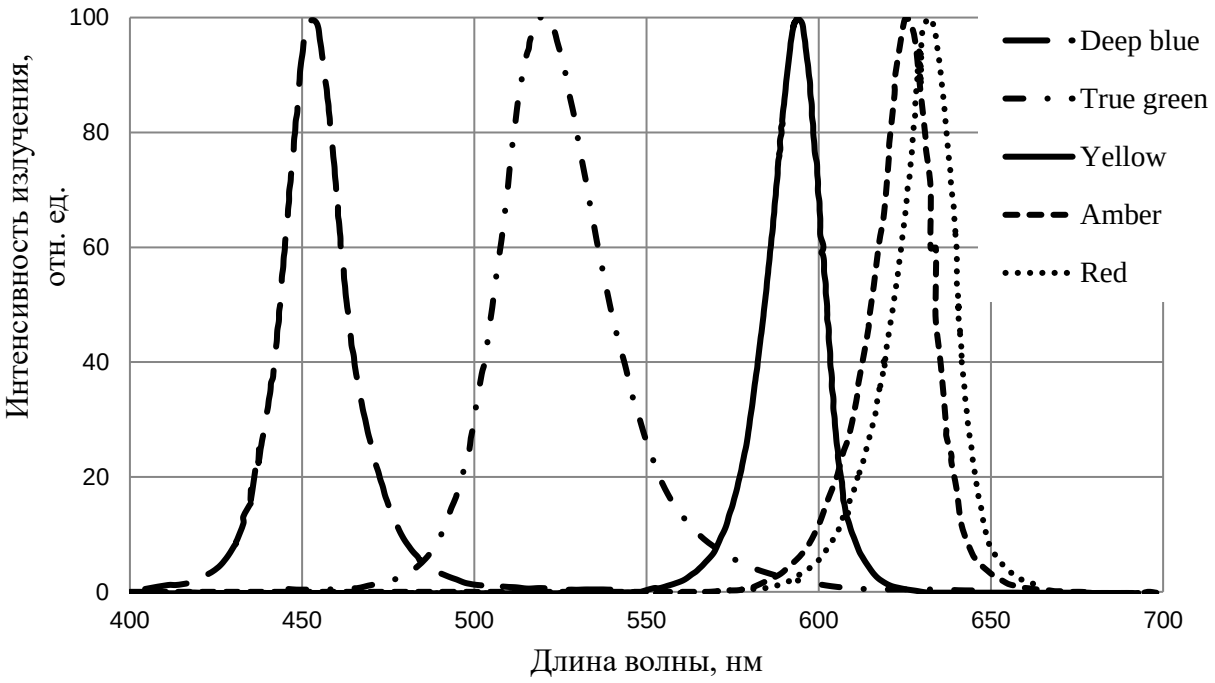


Рисунок 4.1 – Спектры излучения чипов разного цвета (названия даны в соответствии с названием компании-производителя Osram)

При соединении спектров излучения источников света за счет метамерии возникает ощущение определенного цвета, отличного от смешиваемых. Эффект субъективного слияния в однородное цветовое качество нескольких световых излучений, имеющих различный спектральный состав, при их попадании на один и тот же участок сетчатки глаза, положен в основу метода аддитивного смешения цветов. Первое научное описание феноменов аддитивного смешения цветов дал Исаак Ньютон в 1672 году на основании опытов с разложением и сложением световых лучей призмами и линзами. Результаты опытов Исаака Ньютона и последующих исследователей получили обобщенное выражение в форме *законов смешения цветов*. Формальное представление законов смешения цветов в алгебраической форме впервые ввел в 1856 году Герман Гюнтер Грассман. Оно послужило основанием для создания Международной системы спецификации цвета в терминах Стандартного наблюдателя, выпущенной Международной комиссией по освещению (МКО или CIE, Commission Internationale de l'Eclairage) в 1931 г.

На базе именно этой особенности из трех цветов — красного, зеленого, синего – создают источники излучения белого света. Такие системы получили название систем *RGB*.

Для получения белого света в светодиодных источниках зачастую применяется система, содержащая светодиод коротковолнового, чаще всего синего, спектра излучения и люминофор, спектр излучения которого приходится на желтую область. Итоговая смесь синего и желтого света

воспринимаются человеком как белый свет.

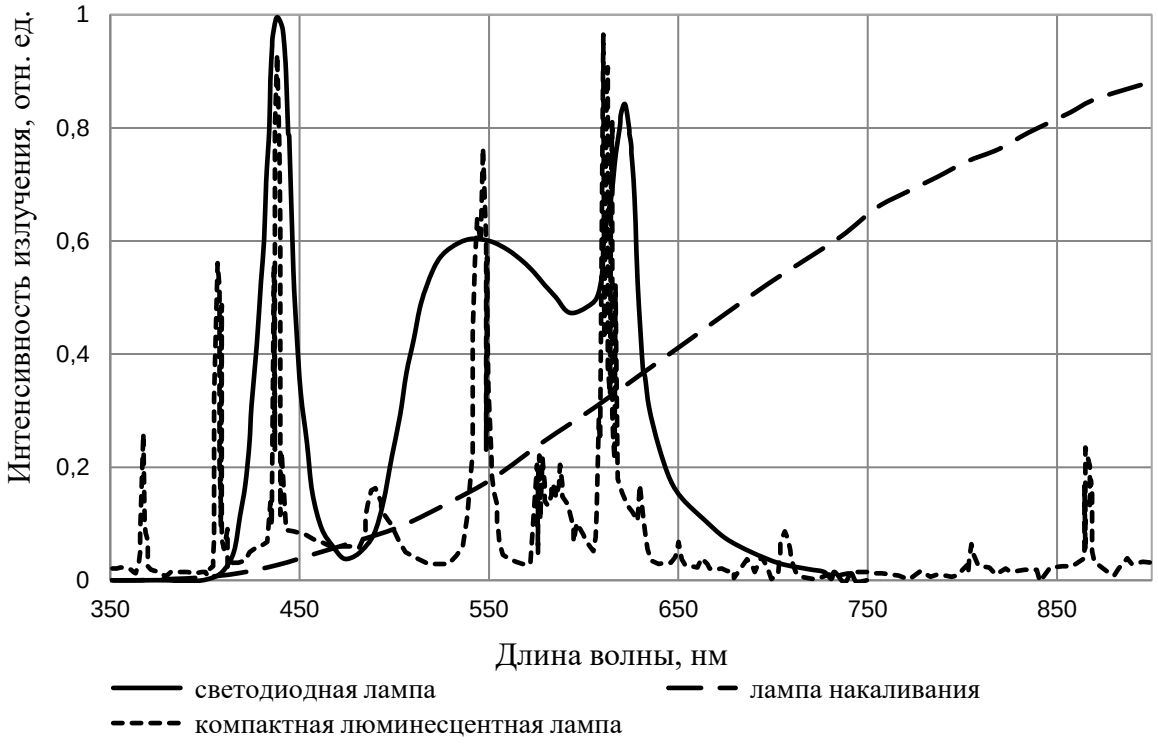


Рисунок 4.2 – Спектр излучения лампы накаливания, КФЛ, светодиодной лампы белого света

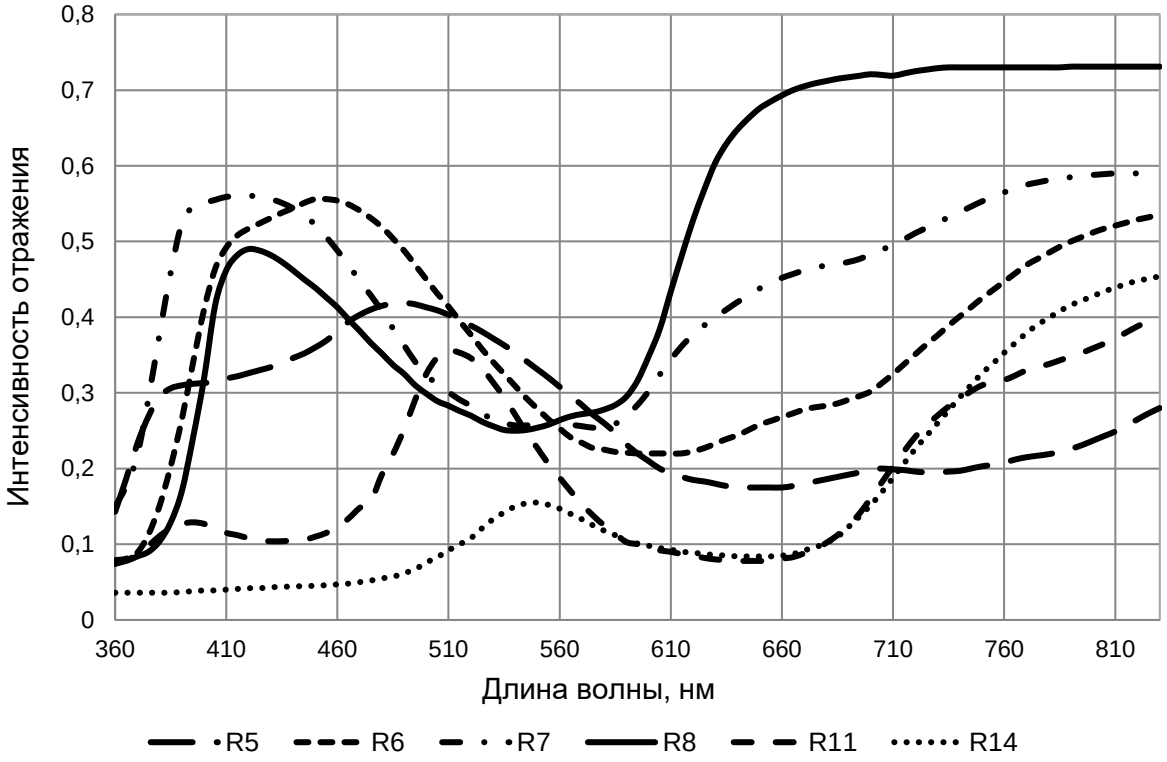


Рисунок 4.3 – Спектры отражения контрольных цветов R5, R6, R7, R8, R11, R14

Получить белый свет также можно смешением спектров излучения нескольких источников. Критерием создания такого источника является получение спектра, координаты цветности которого будут находиться вблизи точки равной энергии (0,3333, 0,3333) на цветовой диаграмме.

Одним из методов определения качества излучаемого белого света является метод контрольных цветов. Качество цвета определяется на основе индекса цветопередачи (CRI или Ra): чем он выше, тем естественнее цвет облучаемого объекта. Индекс цветопередачи лампы накаливания принят равным максимальному значению 100. На рисунке 4.2 представлены спектры излучения лампы накаливания, люминесцентной и светодиодной ламп.

Метод контрольных цветов подробно описан в публикации МКО 1974 г. Показателями качества цветопередачи в данном методе служат индексы цветопередачи, определяемые на основе величин цветовых различий, получаемых на стандартных цветных отражающих образцах при переходе от испытуемого источника света к эталонному. Всего выделяют 14 образцов контрольных цветов, из них основными считаются 8: R1 — цвет увядшей розы, R2 — горчичный, R3 — салатовый, R4 — светло-зеленый, R5 — бирюзовый, R6 — небесно-голубой, R7 — цвет фиолетовой астры, R8 — сиреневый. Контрольные цвета R9–R14 характеризуются высокой насыщенностью. На рисунке 4.3 приведены некоторые спектры отражения контрольных цветов.

Общий индекс цветопередачи R_a дает усредненную характеристику для 8 образцов средней насыщенности. Специальные индексы цветопередачи R_i характеризуют цветопередачу на цветах большей насыщенности — красном, желтом, зеленом и синем соответственно, а также на образцах, воспроизводящих цвет человеческой кожи и зеленой листвы.

Оценка цветопередачи должна производиться по отношению к эталонным источникам света, цветность которых такая же или близкая к цветности исследуемого источника. Разница в цветности Δc между испытуемой лампой (u_k, v_k) и эталонным источником должна быть менее чем $5{,}4 \cdot 10^{-3}$ и рассчитывается по формуле:

$$\Delta c = \sqrt{(u_k - u_r)^2 + (v_k - v_r)^2},$$

где u_k, u_r, v_k, v_r — координаты равноконтрастного цветового графика публикации МКО 1960 г.

Допуск $\Delta c = 5{,}4 \cdot 10^{-3}$ для различных цветовых температур примерно соответствует значениям в градусах Кельвина, указанным в таблице 4.1.

Для источников света с цветовой температурой 5000 К и ниже в качестве эталона используется излучатель Планка, а для источников света с цветовой температурой выше 5000 К — дневной свет, спектральное

распределение которого рассчитывается как функция цветовой температуры.

Во всех случаях для эталонных источников света должно быть известно распределение спектральной плотности энергетической освещенности для интервалов длин волн не более 10 нм по всему диапазону.

Для расчета общего индекса цветопередачи применяется набор из восьми образцов контрольных цветов, рекомендуемых МКО, имеющих определенные спектральные коэффициенты отражения. Их значения даны в таблице Б.5 приложения Б ГОСТ 23198-94. Эти образцы, охватывающие цветовые тона по кругу, являются средними по насыщенности и почти одинаковыми по яркости.

Для специальных целей можно использовать дополнительные образцы контрольных цветов. Данные для этих образцов в обычном случае не включаются в расчет общего индекса цветопередачи.

Расчет индекса цветопередачи проводится следующим образом:

1. По измеренным значениям распределения спектральной плотности энергетической освещенности испытуемого источника рассчитывают его координаты цвета, X_k, Y_k, Z_k, а затем координаты цветности x_k, y_k по формулам:

$$X_k = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,k}(\lambda) \cdot \overline{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda;$$

$$Y_k = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,k}(\lambda) \cdot \overline{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda;$$

$$Z_k = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,k}(\lambda) \cdot \overline{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda,$$

где $E_{\lambda,k}(\lambda)$ — относительное распределение спектральной плотности энергетической освещенности испытуемого источника света;
$\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$ — ординаты кривых сложения из Публикации МКО 1931 г., приведенные на рисунке 4.4.

Координаты цветности рассчитываются по формулам:

$$x_k = \frac{X_k}{X_k+Y_k+Z_k}; y_k = \frac{Y_k}{X_k+Y_k+Z_k}.$$

На основании полученных значений координат цветности определяется цветовая температура T_c испытуемого источника света по цветовому графику с нанесенными на нем линиями T_c = const. На рисунке 4.5 приведены лишь некоторые линии постоянной температуры.

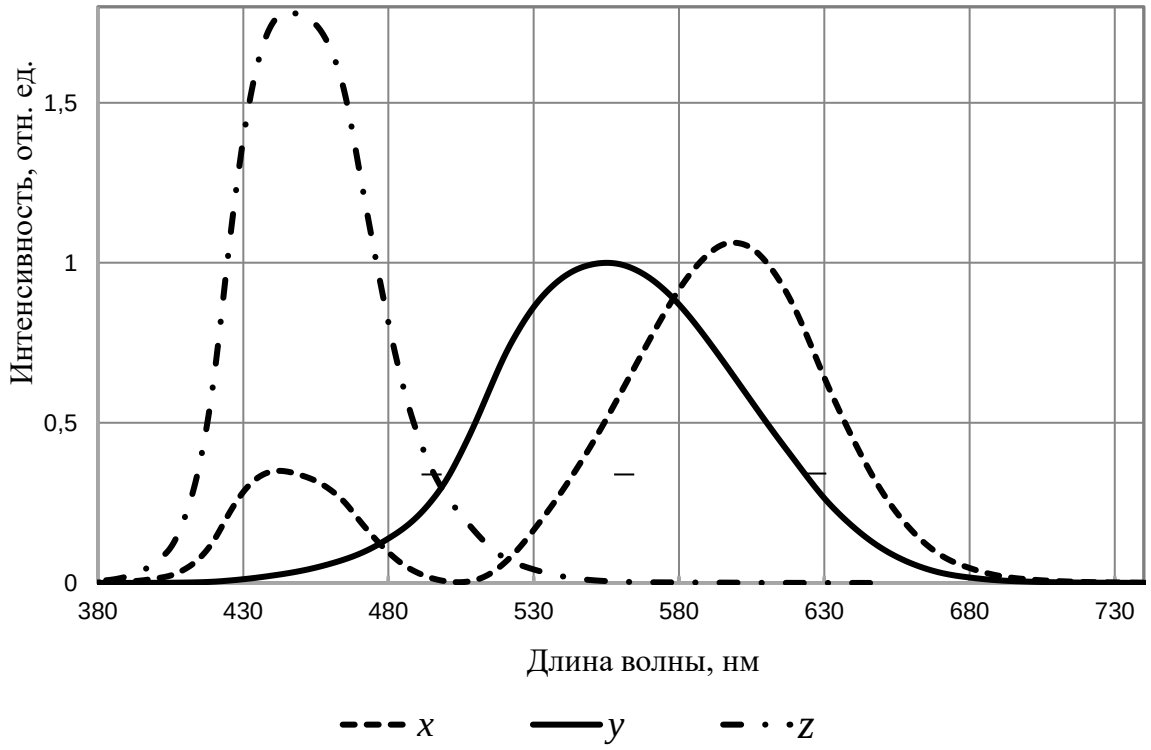


Рисунок 4.4 – Функции выравнивания цвета $\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$ МКО 1931 г. в зависимости от длины волны

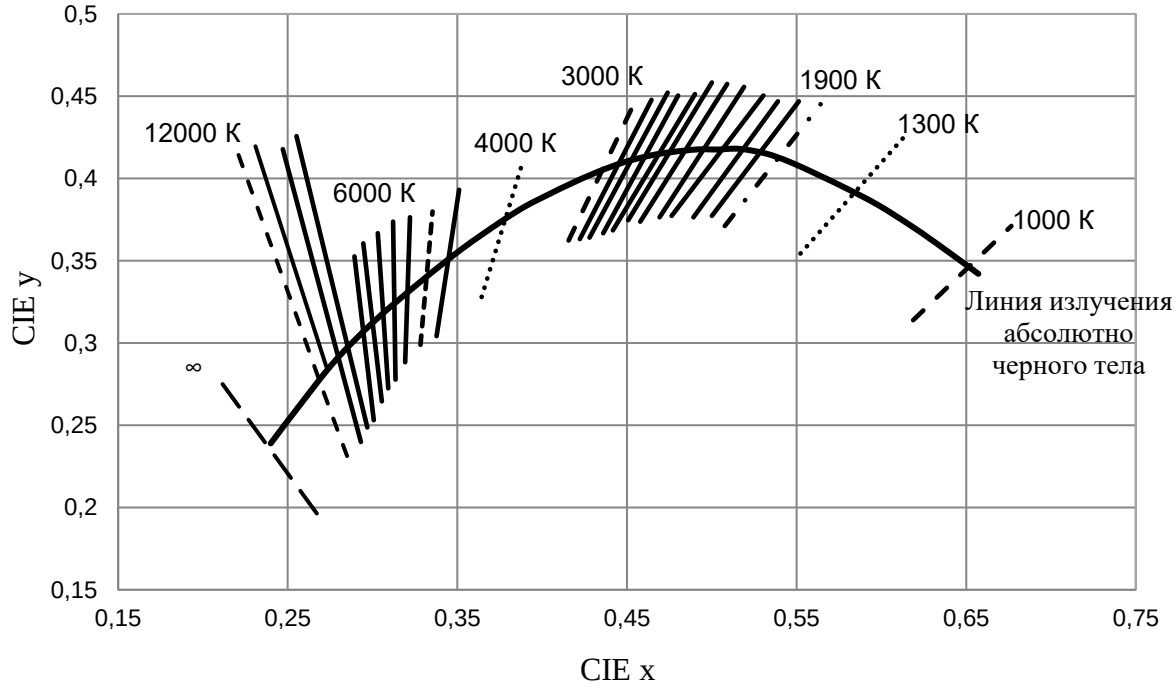


Рисунок 4.5 – График для определения цветовой температуры по изотемпературным линиям

Определение T_c испытуемого источника света с большей точностью проводится следующим образом.

Изотемпературные линии, вычерченные на диаграмме цветности (рисунок 18), пересекаются примерно в точке, где x_0 = 0,329, y_0 = 0,187 в диапазоне цветовых температур 2500–8000 К и в точке x_0 = 0,33, y_0 = 0,19 в диапазоне температур 4000–10000 К. Цветовую температуру испытуемого источника можно найти расчетом *A* наклона изотемпературной линии, проходящей через точку цветности этого источника по формуле:

$$\mathrm{A} = \frac{x - x_0}{y - y_0};$$

$$T_c = 669 \cdot A^4 - 779 \cdot A^3 + 3660 \cdot A^2 - 7047 \cdot A + 5652\,.$$

По найденному значению T_c испытуемого источника света выбирается эталонный источник света с допуском по цветовой температуре *ΔT*, не превышающим значения, указанного в Таблице 4.

Рассчитываются координаты цвета X_{ki},Y_{ki}, Z_{ki} и координаты цветности x_{ki},y_{ki} контрольных образцов при освещении их испытуемым источником по формулам:

$$X_{\mathrm{ki}} = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,\mathrm{k}}(\lambda) \cdot \overline{x}\,(\lambda) \cdot \rho_{\mathrm{i}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda;$$

$$Y_{\mathrm{ki}} = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,\mathrm{k}}(\lambda) \cdot \overline{y}\,(\lambda) \cdot \rho_{\mathrm{i}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda;$$

$$Z_{\mathrm{ki}} = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=800} E_{\lambda,\mathrm{k}}(\lambda) \cdot \overline{z}\,(\lambda) \cdot \rho_{\mathrm{i}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda,$$

$$x_{\mathrm{ki}} = \frac{X_{\mathrm{ki}}}{X_{\mathrm{ki}}+Y_{\mathrm{ki}}+Z_{\mathrm{ki}}};\ y_{\mathrm{ki}} = \frac{Y_{\mathrm{ki}}}{X_{\mathrm{ki}}+Y_{\mathrm{ki}}+Z_{\mathrm{ki}}},$$

где $\rho_{\mathrm{i}}(\lambda)$ — спектральные коэффициенты отражения *i* контрольных образцов (*i* = 1..14), приведенные в таблицах ГОСТ 23198-94. Координаты цветности должны быть рассчитаны с точностью до четырех знаков после запятой.

Таблица 4.1 – Допуск цветовой температуры для определения эталонного источника света

Tc, К	*ΔT*, К	*Tc*, К	*ΔT*, К
7000	735	2800	120
6500	635	2600	100
6000	550	2400	86
5500	455	2300	79
5000	375	2200	73

Tc, К	*ΔT*, К	*Tc*, К	*ΔT*, К
4500	300	2100	66
4000	240	2000	60
3500	180	1900	54
3000	140	1800	49

2. Колориметрические данные должны быть далее преобразованы из стандартной колориметрической системы Публикации МКО 1931 г. (*X*, *Y*, *Z*, *x*, *y)* в координаты равноконтрастного цветового графика Публикации МКО 1960 г. *u*, *v* по следующим формулам:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}.$$

3. Определяются координаты цветности контрольных образцов u'_{ki}, v'_{ki} после учета адаптационного сдвига, полученного при перемещении испытуемого источника к эталонному:

$$u'_{\mathrm{ki}} = \frac{10{,}872 + 0{,}404 \cdot \frac{\mathrm{c_{ki}}}{\mathrm{c_k}} \cdot c_{\mathrm{r}} - 4 \cdot \frac{d_{\mathrm{ki}}}{d_{\mathrm{k}}} \cdot d_{\mathrm{r}}}{16{,}518 + 1{,}481 \cdot \frac{\mathrm{c_{ki}}}{\mathrm{c_k}} \cdot c_{\mathrm{r}} - \frac{d_{\mathrm{ki}}}{d_{\mathrm{k}}} \cdot d_{\mathrm{r}}};$$

$$v'_{\mathrm{ki}} = \frac{5{,}520}{16{,}518 + 1{,}481 \cdot \frac{\mathrm{c_{ki}}}{\mathrm{c_k}} \cdot c_r - \frac{d_{\mathrm{ki}}}{d_{\mathrm{k}}} \cdot d_{\mathrm{r}}}.$$

Функции *c* и *d*, используемые в этих формулах, рассчитываются следующим образом:

$$\mathrm{c} = \frac{1}{v}(4 - u - 10v); d = \frac{1}{v}(1{,}708v + 0{,}404 - 1{,}481u).$$

Значения c_{r} и d_{r} приводятся в виде справочных величин в таблице Б.7 приложения Б ГОСТ 23198-94.

4. Далее координаты цветности должны быть преобразованы в координаты равноконтрастного цветового пространства Публикации МКО 1964 г. с применением следующих формул:

$$W^*_{ri} = 25(\overline{Y}_{\mathrm{ri}})^{1/3} - 17;$$
$$W^*_{ki} = 25(\overline{Y}_{\mathrm{ki}})^{1/3} - 17;$$
$$\overline{Y}_{\mathrm{ri}} = \frac{Y_{\mathrm{ri}}}{Y_{\mathrm{r}}} 100;$$

$$\overline{Y}_{\mathrm{ki}} = \frac{Y_{\mathrm{ki}}}{Y_{\mathrm{k}}} 100;$$
$$U^*_{\mathrm{ri}} = 13W^*_{\mathrm{ri}}(u_{\mathrm{ri}} - u_{\mathrm{r}});$$
$$U^*_{\mathrm{ki}} = 13W^*_{\mathrm{ki}}(u'_{\mathrm{ki}} - u'_{\mathrm{k}});$$
$$V^*_{\mathrm{ri}} = 13W^*_{\mathrm{ri}}(v_{\mathrm{ri}} - v_{\mathrm{r}});$$
$$V^*_{\mathrm{ki}} = 13W^*_{ki}(v'_{ki} - v'_{\mathrm{k}});$$

Значения $u'_{\mathrm{k}} = u_{\mathrm{r}}$, $v'_{\mathrm{k}} = v_{\mathrm{r}}$ являются координатами цветности испытуемого источника света после учета адаптационного сдвига. Эталонные значения U^*_{ri}, V^*_{ri}, W^*_{ri}, u_{r}, v_{r} даны в таблице Б.7 и в таблице Б.8 приложения Б ГОСТ 23198-94.

5. Для расчета различия между воспринимаемым цветом контрольного образца, освещенного испытуемым источником света, и цветом того же образца, освещенного эталонным источником, используют формулу цветового различия Публикации МКО 1964 г.:

$$\Delta E_{\mathrm{i}} = \sqrt{(U^*_{\mathrm{ri}} - U^*_{\mathrm{ki}})^2 + (V^*_{\mathrm{ri}} - V^*_{\mathrm{ki}})^2 + (W^*_{\mathrm{ri}} - W^*_{\mathrm{ki}})^2}.$$

6. Для каждого контрольного образца рассчитывают специальный индекс цветопередачи (R_i):

$$R_{\mathrm{i}} = 100 - 4{,}6 \cdot \Delta E_{\mathrm{i}}.$$

7. Общий индекс цветопередачи R_{a} находят как среднее арифметическое восьми значений R_{i} для контрольных образцов

$$R_{\mathrm{a}} = \frac{1}{8}\sum_{\mathrm{i}=1}^{8} R_{\mathrm{i}}.$$

Результат округляют до ближайшего целого числа.

Именно такой метод реализован в программах по расчету индекса цветопередачи, в том числе и тех, которые входят в программное обеспечение к приборам для измерения оптических характеристик светодиодных устройств.

Данная лабораторная работа проводится в программе, разработанной сотрудниками кафедры Светодиодных технологий. Кроме индекса цветопередачи программа выдает значения координат цветности стандартной колориметрической системы публикации МКО 1931 г., координат цветности равноконтрастного цветового графика варианта 1960 г., коррелированную цветовую температуру. Кроме данной функции программа позволяет рассчитывать итоговый спектр светодиодной лампы в зависимости от спектров отдельных светодиодов.

Для получения высокого индекса цветопередачи необходимо создать

источник, спектр излучения которого будет равен солнечному.

Светодиодные источники света можно использовать для создания специального спектра, например, спектра поглощения растений, ответственных за определенную стадию их роста. На рисунке 4.6 представлены спектры поглощения растений на этапах синтеза хлорофилла, фотосинтеза, фотоморфогенеза.

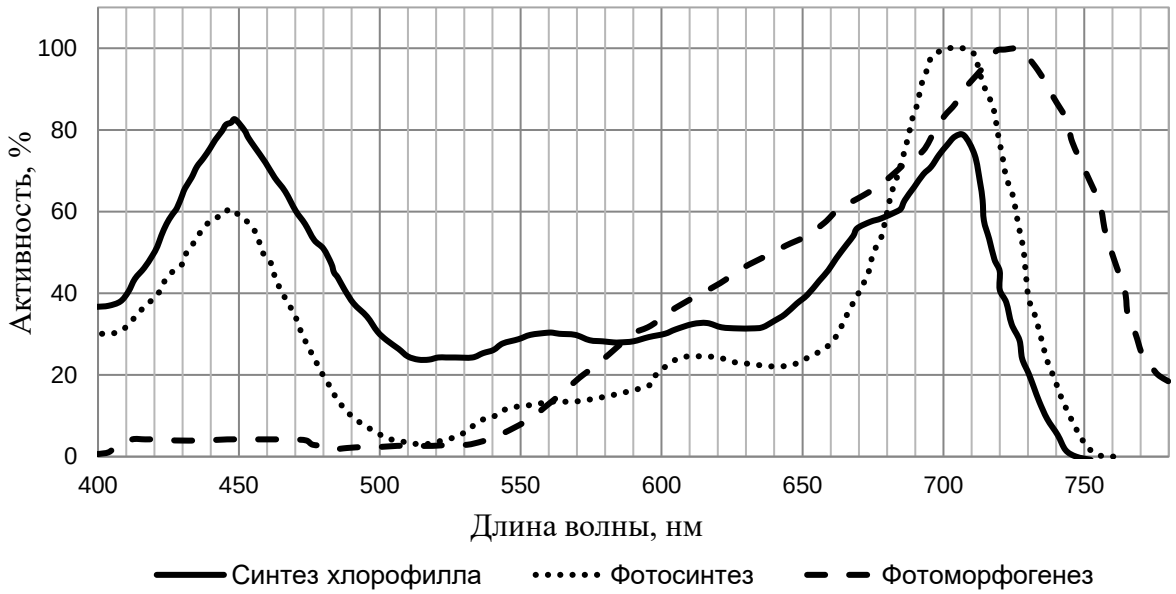


Рисунок 4.6 – Спектр поглощения хлорофилла

Проведение лабораторной работы

1. Получите вариант задания от преподавателя. Из Приложения 1 определите спектр, который Вам нужно создать.
2. Ознакомьтесь с содержанием программы «Расчет цветовых характеристик источника света».
3. Смоделируйте заданный спектр из имеющихся в программе спектров. В случае, если этих спектров не хватает, создайте спектр светодиода с заданной Вами пиковой длиной волны. Сохраните полученный спектр единичного светодиода и основные оптические характеристики.
4. Зафиксируйте характеристики полученного спектра, заполнив таблицу

Координаты цветности испытуемого источника 1931г.		ССТ, К	Температура эталонного источника, К	Координаты цветности испытуемого источника 1960г.		Координаты цветности испытуемого источника 1976г.	
x_k	y_k	*Tc*	*T*	*u*	*v*	*u'*	*v'*
...	...	...	...	...	...	...	...
Общий индекс цветопередачи		Световой поток, лм	Оптическая мощность, Вт	Электрическая мощность системы, Вт		Световая эффективность, лм/Вт	

Ra	*Flux, lm*	*Popt, W*	*Pel, W*	*lm/W*
…	…	…	…	…

Скопируйте моделированный спектр в отчет к лабораторной работе.

5. На основе имеющихся в программе спектров цветных светодиодов, спектры которых представлены на рисунке 14, создайте спектр, индекс цветопередачи которого равен 98.

Контрольные вопросы и задания

1. Составьте отчет к лабораторной работе. Включите в него результаты расчетов, используемые спектры.
2. Какой минимальный набор цветов обеспечит белый цвет с CRI > 90?
3. Оцените эффективность источника белого цвета, созданного на базе системы RGB. В каких световых системах оправдано использовать такую систему цветов?
4. Объясните, почему в системах общего освещения используются светодиоды белого цвета, созданные на базе «желтый люминофор – синий чип».
5. Объясните разницу в цветовых координатах МКО 1931 г. и 1976 г. Объясните термин эллипсы Мак Адама. Дайте описание равноконтрастной цветовой диаграмме. Приведите случаи, в которых ее используют.

Рекомендуемая литература

1. Шуберт Ф. Е. // Светодиоды. Пер. с англ. под ред. Юновича А. Э. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. ГОСТ 23198-94 Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик.
3. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Лабораторная работа №5. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ZEMAX. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: знакомство с возможностями программного пакета ZEMAX [1] в области численного моделирования оптических систем светоизлучающих приборов: построение геометрии, задание свойств материалов (отражение, поглощение, объемное и поверхностное светорассеяние, светопропускание, показатель преломления), моделирование источников света, обработка результатов.

Общие сведения:

ZEMAX — это программный пакет, позволяющий моделировать и анализировать различные оптические системы. Этот пакет использует трассировку лучей по методу Монте-Карло [2], суть которого заключается в отслеживании траектории лучей и расчета взаимодействий с лежащими на траекториях объектами.

В ZEMAX реализовано два режима расчета: последовательная трассировка лучей (*Sequential ray tracing*) и непоследовательная трассировка лучей (*Non-sequential ray tracing*). Расчет системы в последовательном режиме означает, что лучи последовательно проходят через ряд оптических поверхностей. Каждая поверхность характеризуется радиусом кривизны, толщиной (расстоянием вдоль оси до следующей поверхности) и материалом (марка стекла), возможно так же задание объектов сложной геометрии. Непоследовательный режим подразумевает, что нет заданной последовательности между объектами, через которые проходят лучи. Объекты в непоследовательном режиме могут обладать любой геометрией, для них задается расположение в пространстве, материал (в том числе возможно задание объемного рассеяния), свойства поверхностей. При непоследовательной трассировке лучи могут попадать на любую поверхность любого непоследовательного объекта, могут попадать на один и тот же объект несколько раз или вообще не попадать на него, в отличие от последовательной трассировкой лучей, где все трассируемые лучи должны распространяться через один и тот же набор поверхностей в порядке следования этих поверхностей.

Использование последовательного режима ограничивается расчетами систем формирования или обработки изображений и афокальных оптических систем, в то время как непоследовательный режим может быть использован для анализа рассеянного света, лучей, претерпевающих полное внутреннее отражение (ПВО), освещения и любых других оптических систем, для которых применим расчет с помощью трассировки лучей.

Примеры использования последовательного и непоследовательного режима можно найти в информационной базе данных производителя ZEMAX [3].

В данной работе приведен порядок постановки задачи в непоследовательном режиме.

Порядок постановки задачи можно разбить на несколько этапов:

1. ***Геометрия оптической системы***. Оптическая система состоит из отдельных непоследовательных объектов, для каждого из которых задается расположение в пространстве и свойства. Непоследовательными объектами могут быть геометрические объекты – детали устройства (напр. поверхности корпуса, отражатель, чип, оптический элемент и т.д), источники света (излучающие поверхности, точки или объемы), детекторы.
2. ***Свойства материалов***. Каждый геометрический объект обладает своими оптическими свойствами. Для непрозрачных объектов это свойства поглощения, отражения и поверхностного рассеяния света.

Рассеяние света на поверхности характеризуется функцией двунаправленного поверхностного рассеивания (англ. Bi-Directional Scatter Distribution Function (BSDF))

$$BSDF(\theta_{\mathrm{i}}, \varphi_{\mathrm{i}}, \theta_{\mathrm{s}}, \varphi_{\mathrm{s}}) = \frac{dL_{\mathrm{s}}(\theta_{\mathrm{s}}, \varphi_{\mathrm{s}})}{dE_{\mathrm{i}}(\theta_{\mathrm{i}}, \varphi_{\mathrm{i}})}.$$

Здесь L — яркость, E — освещенность, полярные координаты луча: θ — нормальный угол, φ — азимутальный угол, индексы i и s соответствуют падающему (incident) и рассеянному (scattered) направлению (рисунок 5.1).

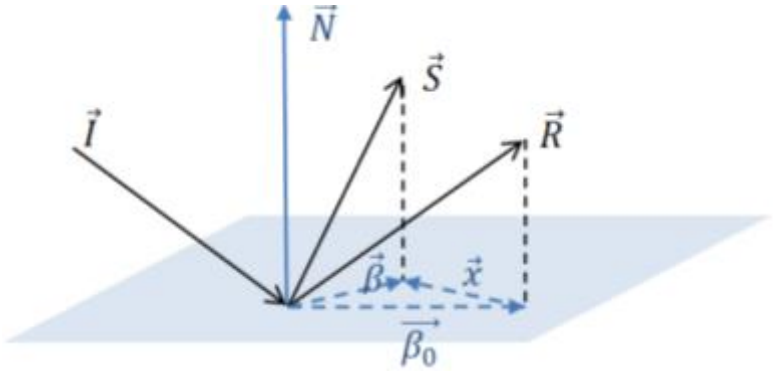


Рисунок 5.1 – Схематическое изображение падающего (I), зеркально отраженного (R) и рассеянного(S) луча, относительно нормали к поверхности (N)

BDSF может быть так же определена как функция вектора $\vec{x}$. Так же важным параметром для многих моделей рассеивания является интегральная характеристика Total Integrated Scatter (TIS), которая определяется следующим образом:

$$TIS(\theta_{\mathrm{i}}, \varphi_{\mathrm{i}}) = \iint BSDF(\theta_{\mathrm{i}}, \varphi_{\mathrm{i}}, \theta, \varphi) cos\theta sin\theta d\theta d\varphi$$

В ZEMAX есть несколько моделей поверхностного рассеяния света, рассмотрим основные из них:

- Ламбертовское рассеивание (*Lambertian scattering*) — рассеяние света на поверхности происходит по всем направлениям, и не зависит от телесного угла, в пределах которого падает световой поток:

  $$BSDF = 1/\pi.$$

  Световой поток выходит после такого рассеивателя равномерно распределенным в пределах телесного угла 2π. Примером может служить белая бумага или молочное стекло. Яркость такой поверхности постоянна по всем направлениям и не зависит от направления падающего света, то есть полностью подчиняется закону Ламберта. Кривая распределения силы света таких поверхностей имеет форму окружности.
- Гауссово рассеивание (*Gaussian scattering*) определяется следующим образом:

  $$BSDF(\vec{x}) = Ae^{\frac{-|\vec{x}|^2}{\sigma^2}},$$

  где A — нормировочная константа. Распределение рассеянных лучей осесимметрично в пространстве направляющих косинусов. Безразмерная величина σ определяет ширину Гауссова распределения. Величины σ больше 5,0 приближают это рассеивание к ламбертовскому.
- ABg модель рассеивания определяется следующим образом:

  $$BSDF(\vec{x}) = \frac{A}{B + |\vec{x}|^g}.$$

  На коэффициенты этой модели накладываются следующие ограничения: $A \geq 0; B \geq 10^{-12}$.
  Эта модель часто используется для поверхностей с однородной шероховатостью, если характерные размеры шероховатости меньше длины волны падающего света.

Для прозрачных объектов задается интенсивность светопропускания, коэффициент преломления и объемное светорассеяние (bulk scattering).
Интенсивность светопропускания определяется законом Бера:

$$t = e^{-\alpha\tau}.$$

Здесь α — показатель поглощения, который зависит от длины волны света, τ — длина пути луча внутри прозрачного материала.

В ZEMAX есть большой каталог различных прозрачных материалов, для которых все оптические свойства уже определены и не требуют дополнительного задания.
Если в материале имеются какие-то частицы или неоднородности, то так же следует задавать объемное светорассеяние. Объемное светорассеяние определяется функцией распределения вероятности P для угла рассеяния θ (угол, на которой отклоняется луч после светорассеяния) и свободным пробегом луча до светорассеяния.
Некоторые из предлагаемых моделей объемного рассеяния приведены ниже:

- Угловое рассеяние (Angle Scattering). После рассеяния направление луча меняется случайным образом, но лежит в пределах некоторого конуса, угол которого является параметром модели. Вероятность рассеяния по направлению любого угла постоянна:
$$P = 1/2.$$
- Полиномиальное рассеяние (Poly bulk scat):
$$P(\theta) = \sum c_{\mathrm{i}} \theta^{\mathrm{i}}.$$
- Рассеяние Хеньи—Гринштейна (Henyey-Greenstein). Обычно характеризует рассеяние света на маленьких частицах (например, в тумане):
$$P(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}},$$
параметр g характеризует распределение, например, если $g = 0$, то рассеяние на всех углах равновероятное, при приближении g к единице, распределение имеет высокий пик в окрестности $\theta = 0$.
- Рассеяние Рэлея (Rayleigh). Характеризует рассеяние на частицах, размер которых сильно меньше длины волны света и средняя длина пробега луча до светорассеяния пропорциональна длине волны света ($\sim\lambda^4$):
$$P(\theta, \lambda) = 0{,}375 \frac{1 + \cos^2\theta}{\lambda^4}.$$

3. ***Источники света.*** Возможны различные варианты источников света: точечные, плоские, объемные. Для каждого источника требуется задать количество лучей, длину волны испускаемого света и энергию лучей (или световой поток), для некоторых источников (например, прямоугольный источник) задается так же распределение энергии в зависимости от угла наклона луча.

4. ***Детекторы.*** Для обработки полученных результатов перед запуском расчетов необходимо так задать детекторы – поверхности, на которых будет фиксироваться информация о лучах, которые на них попадают. Например, детекторы могут быть плоские или в виде сферы, включающей в себя всю оптическую систему.

После постановки задачи следует указать параметры расчета, такие как количество возможных пересечений и столкновений лучей с объектами, минимальная учитываемая мощность луча и т.д. (*system-general-Non Sequential*). Затем запускается расчет после чего следует обработка результатов. По результатам расчета можно провести анализ световых или энергетических потерь в оптической системе, вклады в эти потери отдельных объектов системы, возможно построение диаграммы направленности осветительного прибора.

Проведение лабораторной работы

Лабораторная работа проводится в программном комплексе ZEMAX. В процессе выполнения работы происходит знакомство с интерфейсом программы, построение простых геометрических объектов (линза) и задание их оптических свойств (показатель преломления, светопропускание), построение простого источника света (прямоугольный источник), построение детектора.

Этап 1. Знакомство с интерфейсом ZEMAX. Построение простых геометрических объектов

1. Запустите программу Zemax. Для моделирования светодиодных устройств используйте непоследовательную трассировку лучей (*FILE - Non-Sequential mode*). При запуске откроется окно непоследовательных компонентов (*non-sequential component editor*), которое будет содержать в себе все компоненты оптической системы (геометрические объекты, источники, детекторы) и их геометрические и физические параметры.
2. Создайте новый объект: после двойного щелчка по «*Null object*» откроется окно «*object 1 properties*» (рисунок 5.2). В этом окне выберете тип нового объекта – линза (*Standart lens*). В списке представлены основные типы геометрических объектов, источников и детекторов.
3. Аналогичным образом создайте прямоугольный источник (*Source Rectangle*) и плоский детектор (*Detector Rectangle object*). Таким образом, мы заполнили окно компонентов тремя объектами (рисунок 5.3).
4. Задайте геометрические характеристики (для линзы – радиусы кривизны и толщину, для прямоугольного детектора и источника – ширину и высоту) и расположите их в пространстве относительно друг друга, путем заданием параметров в окне «non-sequential component editor». Так

же следует задать энергетические характеристики источника и количество лучей для расчета.

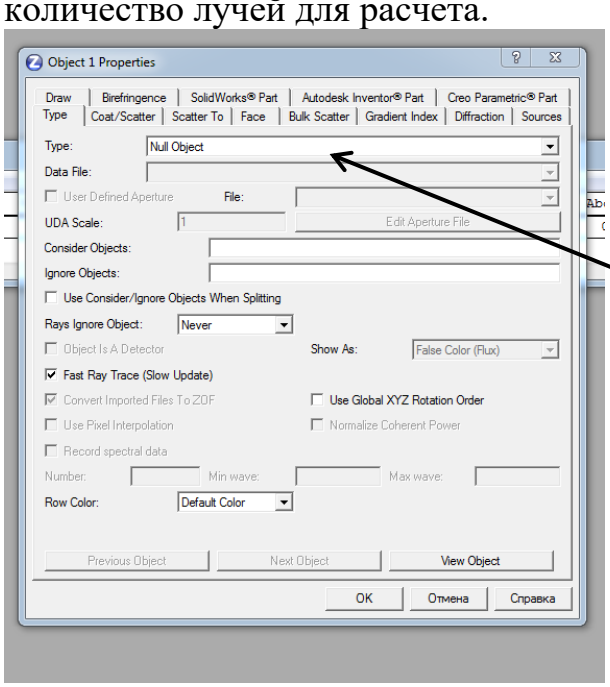


Рисунок 5.2 – Окно «object 1 properties»

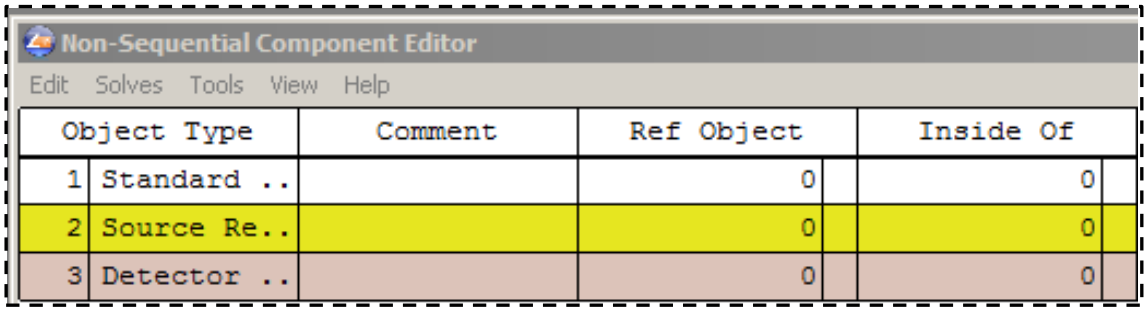


Рисунок 5.3 – Окно «non-sequential component editor»

5. Чтобы визуально оценить всю систему в верхнем меню нажмите «L3n» или «LSn» и откройте окно «NSC 3D layout» или, соответственно, «NSC shaded model» (рисунок 5.4).

Для примера, зададим для линзы следующие размеры и расположение: радиус кривизны второй поверхности (*Radius 2*) – -5 мм, толщина линзы (*Thickness*) – 0,2 мм, расположение по оси Z (*Z position*)– 2 мм. Для источника: размеры (*X Half Width, Y Half Width*) – 0,2 мм и 0,2 мм, количество лучей для расчета (*Analysis Rays*) – 10000, мощность (*Power*) – 1 Вт. Для детектора: расположение по оси Z – 5 мм, 1000*1000 пикселей. Остальные параметры оставим без изменения.

Чтобы задать материал линзы выберем каталог зеркал во вкладке «Gla» в верхнем меню. Затем в окне *«non-sequential component editor»* установим

материал для линзы, в нашем примере это будет каталог «SCHOTT» и стекло K4.

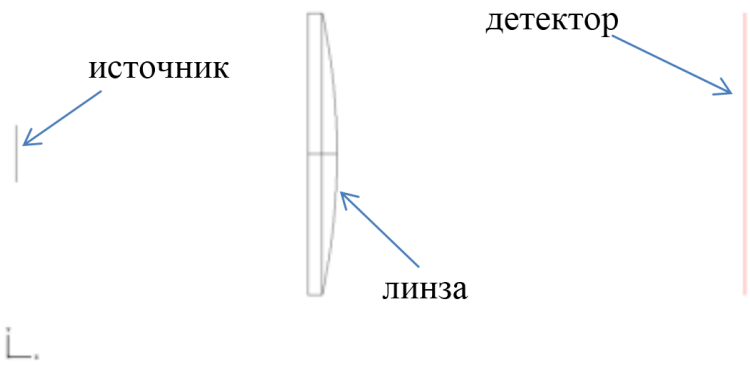


Рисунок 5.4 – Схема оптической системы

Этап 2. Проведение расчета и анализ результатов

1. После постановки задачи (построения геометрии, источников и детекторов) укажите параметры расчета, такие как максимальная учитываемая мощность луча, количество возможных пересечений и столкновений луча с объектами и пр. Все это задается в меню *System-General* вкладка *non-sequential*. Когда параметры установлены, откройте окно запуска расчета *«Rtc»*, в нем укажите так же параметры расчета – учет рассеивания, поляризации и разделения лучей (*Split rays, Scatter rays*).
2. Запустите расчет (*Trace*).
3. Для анализа результатов откройте показания детектора *«Dvr»*.

Из анализа *Total Power* видно, что на детектор попали лучи общей мощностью 0,91803 Вт, а общая мощность источника 1 Вт (рисунок 5.5).

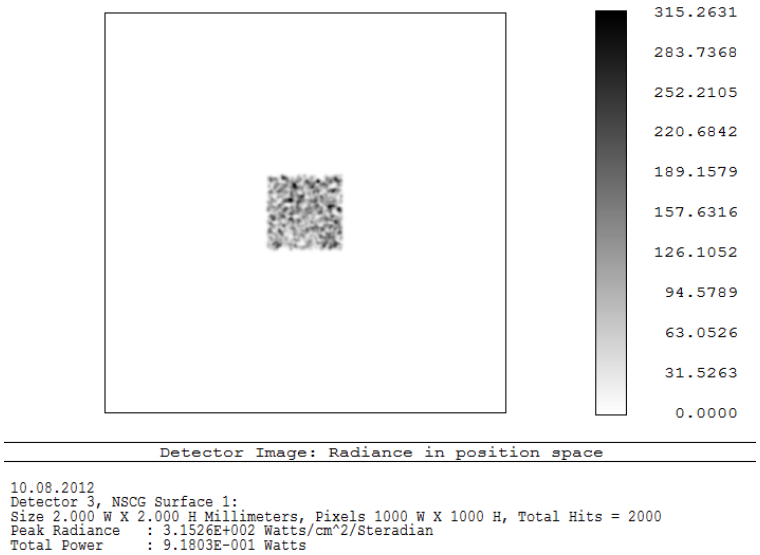


Рисунок 5.5 – Показания детектора

<u>Контрольные вопросы и задания</u>

1. Какой численный метод использует программа ZEMAX?
2. Какие оптические свойства требуется задавать для прозрачных и непрозрачных материалов?
3. Как моделируется поверхностное рассеяние света на поверхностях?
4. Каким образом можно провести моделирование наличия частиц люминофора в прозрачном материале?
5. Напишите отчет к лабораторной работе. Отчет должен содержать:
   а) Постановку задачи: геометрия оптической системы, свойства материалов, свойства источников.
   б) Постановку расчета: количество расчетных лучей, количество возможных пересечений и столкновений лучей с объектами, минимальная учитываемая мощность луча.
   в) Анализ результатов: показания детектора.
   г) Выводы: причины, по которым на детектор попала не вся энергия источника.

Рекомендуемая литература

1. Zemax User's Manual. January 2012. P. 835.
2. Szirmay-Kalos L. // Monte-Carlo methods in global illumination. Institute of Computer Graphics. University of Technology. 2000. P. 118.
3. http://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase?categoryname=Knowledgebase
4. Ландсберг Г. С. // Оптика. ФИЗМАТЛИТ. 2003. С. 848.
5. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Лабораторная работа №6.ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ZEMAX. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОРПУСИРОВАННОГО СВЕТОДИОДНОГО ЧИПА

Цель работы: расчет вывода света из простейшей модели корпусированного светодиода в программном комплексе ZEMAX [1]. Исследование потерь мощности, сравнение диаграмм направленности двух светодиодных излучателей с разной оптикой.

Общие сведения:

При моделировании светодиодных осветительных приборов ключевыми моментами является анализ потерь мощности и анализ диаграммы направленности.

Причины потерь мощности в оптической системе могут быть следующие: поглощение поверхностями объектов, объемное поглощение в прозрачных материалах, френелевские потери, т.е. частичное отражение света при прохождении границы между двумя прозрачными средами (из 1 в 2). Доля этого отражения определяется по формуле $100\% \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$, где n_1 и n_2 коэффициенты преломления сред [2].

Диаграмма направленности характеризует пространственное распределение силы света.

Проведение лабораторной работы

Этап 1. Построение геометрии оптической системы

В качестве исследуемых объектов возьмем два корпусированных светодиода. Моделируемый светодиод представляет собой прямоугольный источник излучения, расположенный на «дне» светоотражающего корпуса и покрытый прозрачным герметизирующем веществом. Для первого светодиода поверхность герметизирующего вещества является плоской, для второго – на поверхности герметизирующего вещества расположена выпуклая сферическая линза (рисунок 6.1).

Размеры и расположение объектов оптической системы изображено на рисунке 6.2. Оптическая система состоит из следующих объектов: *Cylinder Volume*, *Standart lens*, *Source Rectangle*. Помимо этого, для дальнейшей обработки результатов требуется создать детектор типа *Detector Polar* – объемный детектор в виде сферы с радиусом, достаточным для того, что бы вместить всю оптическую систему.

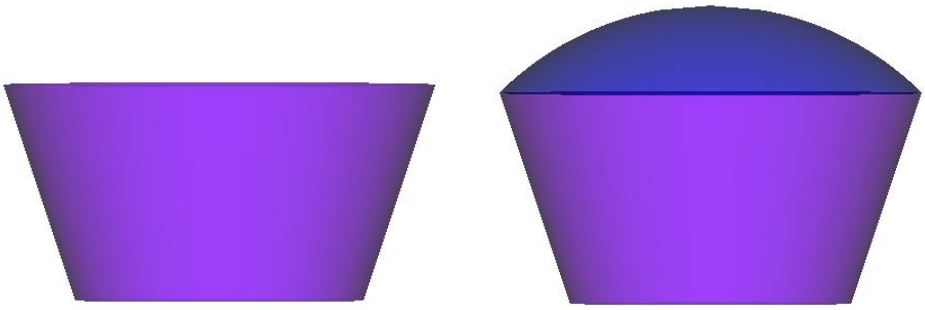
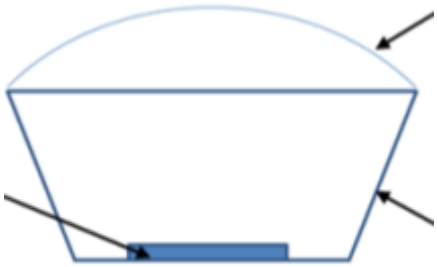


Рисунок 6.1 – Схема двух рассчитываемых светодиодов



Линза
- Rc — радиус кривизны, 17 мм
- r — радиус основания, 12 мм
- h – высота, 5 мм

Источник излучения
- a — ширина, 10 мм
- b — длина, 10 мм
- Cosine Exponent – 1

  $I(\theta) = I_o \cos(\theta)$

Корпус
- светоотражающая поверхность стенок
- внутреннее пространство заполнено эластомером
- r_1 — радиус основания, 8 мм
- r_2 — радиус верхней поверхности, 12 мм
- h – высота, 12 мм

Рисунок 6.2 – Геометрические характеристики объектов оптической системы

Этап 2. Задание оптических свойств объектов и свойств источника

Объект *Cylinder Volume* является светоотражающим корпусом, заполненным герметизирующим покрытием: материал объекта SILICA (каталог MISC) [3], боковую поверхность и «дно» имеют отражающее покрытие, которое отражает все лучи зеркально и поглощает 5% падающей энергии (*coat/scatter - side face, front face, Face Is: Reflective, Coating: I.95*). Для линзы *Standart lens* зададим материал PMMA [3].

Источник представляет собой параллелепипед, объем которого испускает лучи одинаковой интенсивности по всем направлениям. Количество лучей для расчета – 10^6, мощность – 1Вт, длина волны – 0,45 мкм.

Этап 3. Проведение расчёта и анализ результатов

Расчет проводится с учётом рассеивания, отражения и преломления лучей. После расчёта строится диаграмма направленности для двух случаев и проводится оценка потерь мощности.

Контрольные вопросы и задания:

1. Анализ каких параметров следует проводить после расчета оптической системы?
2. Каковы возможные причины энергетических потерь в оптических системах?
3. Напишите отчет к лабораторной работе. Отчет должен содержать:

   а) постановку задачи: геометрия оптической системы, свойства материалов, свойства источников;

   б) постановку расчета: количество расчетных лучей, количество возможных пересечений и столкновений лучей с объектами, минимальная учитываемая мощность луча;

   в) анализ результатов: сравнение диаграмм направленности двух корпусированных светодиодов: с линзой и без, сравнение потерь мощности;

   г) выводы: причины потерь мощности, объяснение различий в диаграммах направленности двух корпусированных светодиодов: с линзой и без, и их особенностей.

Рекомендуемая литература

1. Zemax User's Manual, January, 2012, 835 p.
2. Ландсберг Г. С., Оптика // ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 848 с.
3. Bass M., et al. (eds.) OSA, Handbook of Optics Vol. II // CRC Press LLC, 2003.
4. Виноградов К. А., Липницкая С.Н., Бугров В. Е. Оптоэлектроника светодиодов //СПб.: Национальный исследовательский университет. – 2013.

Приложение 1

Варианты заданий

Таблица 1 – Варианты заданий

Вариант задания	Модель чипа	Модель светодиода
1	OHT- H 102300x-JD	OLP-D5050F6C-50D6
2	OHT- x454510x-MB	OLP-N5050F6C-40A1
3	OHT- B 171700x-GC	OLP-W5050F6C-30B2
4	OHT- D 102300x-CC	OLP-C5050F6C-65E5
5	OHT- B 171700x-EC	OLP-D5050F6C-50C3
6	OHT- x454510x-LA	OLP-D5050F6C-50F7
7	OHT- B 102300x-FB	OLP-N5050F6C-40C1
8	OHT- D 171700x-AB	OLP-W5050F6C-30A2
9	OHT- B 102300x-EA	OLP-C5050F6C-65E3
10	OHT- H 171700x-IA	OLP-D5050F6C-50B3
11	OHT- x454510x-MD	OLP-N5050F6C-40D2
12	OHT- B 102300x-EE	OLP-W5050F6C-30C4
Вариант задания	Модель светодиодного модуля	Спектр излучения
1	OMA-X100H86-XXFB	Синтез хлорофилла
2		Фотосинтез
3		Фотоморфогенез
4		CRI = 80
5	OMA-X100H87-XXFA	CRI = 85
6		CRI = 95
7		Спектр контрольного цвета R5
8		Спектр контрольного цвета R6
9	OMA-X252R186-XXFX	Спектр контрольного цвета R7
10		Спектр контрольного цвета R8
11		Спектр контрольного цвета R11
12		Спектр контрольного цвета R14

Приложение 2

Спецификации на светодиодные чипы

Внешний вид и характерные размеры светодиодных чипов

Структура, то есть последовательность слоев светодиодных чипов, выращенных на сапфире, представлен на рисунке 1. В Таблице 1 представлены геометрии контактных площадок к *p*- и *n*- областям и характерные параметры светодиодных чипов моделей:

- ОНТ- Х 102300х-хх
- ОНТ- Х 171700х-хх
- ОНТ- х454510х-хх.

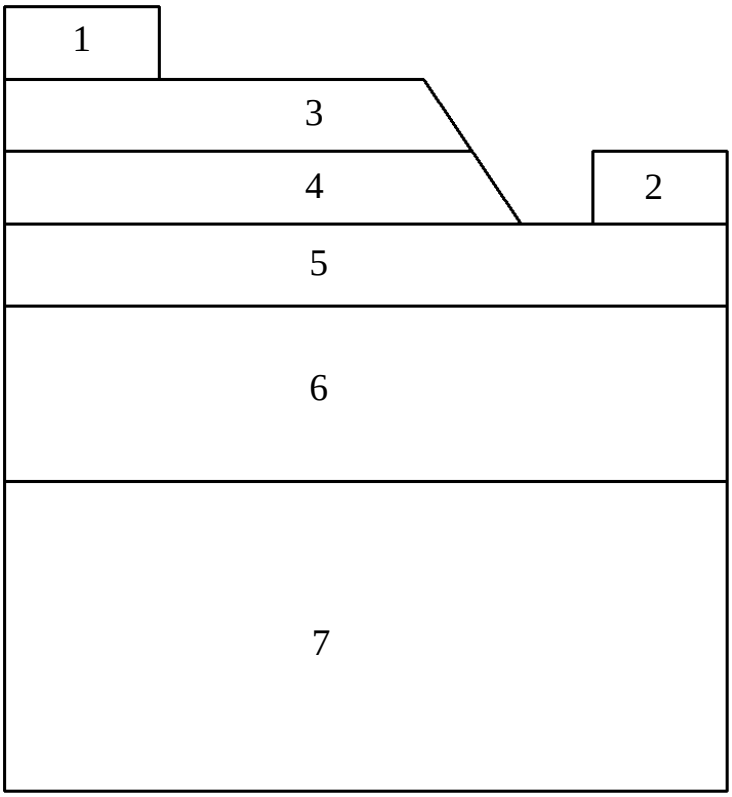
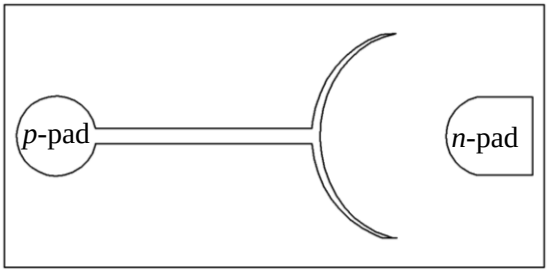
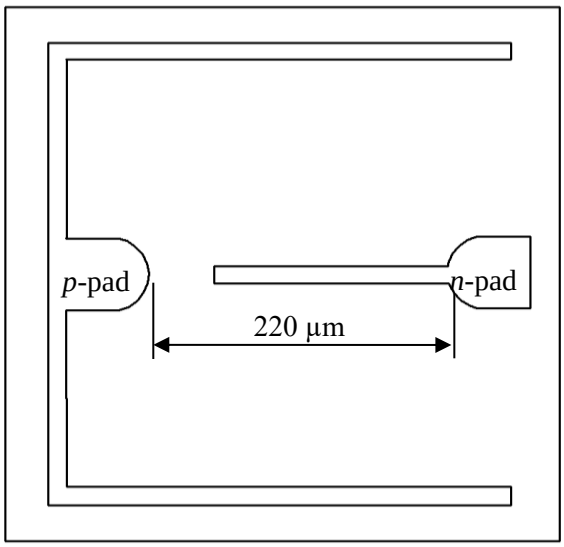
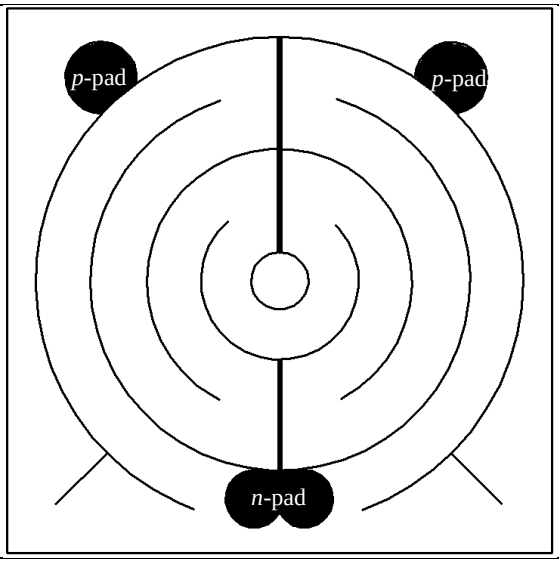


Рисунок 1 – Структура чипов GaN, выращенных на сапфире. Вид сбоку.

На рисунке обозначены:

1. Анод
2. Катод
3. *p*-GaN
4. InGaN EPAC активная область
5. *n*-GaN оболочка/контактный слой
6. ULD GaN буферные слои
7. Сапфировая подложка

Таблица 1 – Светодиодные чипы моделей ОНТ- Х 102300х-хх, ОНТ- Х 171700х-хх, ОНТ- х454510х-хх. Вид сверху и характерные параметры

	ОНТ- Х 102300х-хх ▪ Размер чипа: 240±10 × 560±10 мкм^2 (10×23 мм^2) ▪ Эффективный размер чипа: 220×540 мкм^2 ▪ Размеры светоизлучающей области: 0.1 мм^2 ▪ Линейный размер контактной площадки: 70±5 мкм ▪ Толщина чипа: 90±10 мкм
	ОНТ- Х 171700х-хх ▪ Размер чипа: 430±10 × 430±10 мкм^2 (17×17 мм^2) ▪ Эффективный размер чипа: 390×390 мкм^2 ▪ Размеры светоизлучающей области: 0,1 мм^2 ▪ Линейный размер контактной площадки: 70±5 мкм ▪ Толщина чипа: 90±10 мкм
	ОНТ- х454510х-хх ▪ Размер чипа: 1150±25 × 1150±25 мкм2 (45×45 мм^2) ▪ Линейный размер контактной p-площадки: 100±10 мкм ▪ Линейный размер контактной n-площадки: 2 х (110±10) мкм ▪ Толщина чипа: 150±10 мкм

Код светодиодного чипа

Каждый производитель светодиодных чипов и светодиодов по своему усмотрению приводит информацию о характеристиках продукта и в каждой спецификации указывается обозначение той или иной позиции в виде кода. В любом случае код содержит информацию о производителе, часто – о типе и размере чипов, бин по длине волны, бин по силе света, по мощности излучения или по световому потоку, бин по напряжению.

Для примера рассмотрим следующий код, характеризующий светодиодные чипы компании Оптоган.

$$\underbrace{\text{ОНТ-}}_{1}\ \underbrace{\text{D}}_{2}\ \underbrace{171}_{3}\underbrace{700\text{x}}_{4}\text{-}\underbrace{\text{xx}}_{5}$$

1 — обозначение компании-производителя, в данном случае, компании Оптоган;
2— бин по длине волны;
3 — размер сторон чипа в мм;
4 — позиции, оставленные производителем для введения новых бинов, например, по типу чипа — латеральный или вертикальный;
5 — бин по мощности излучения и длине волны.

Бининг по мощности излучения и доминантной длине волны

В Таблицах 2–8 представлены кодовые обозначения светодиодных чипов. Под таблицей указан диапазон мощности излучения, слева от таблицы — диапазон доминантных длин волн.

Рассмотрим в качестве примера код светодиодного чипа ОНТ- В 102300x-GC.

Данный код означает, что:
- чип произведен компанией Оптоган,
- имеет размер 10×23 мм,
- обладает доминантной длиной волны в диапазоне 445,0–447,5 нм,
- значение мощности излучения 25–30 мВт.

Таблица 2

ОНТ- D 171700x-xx (445-455 нм)

мВт: 45, 40, 35, 30, 25

AD	BD	CD	DD
AC	BC	CC	DC
AB	BB	CB	DB
AA	BA	CA	DA

445.0 447.5 450.0 452.5 455.0

нм

Таблица 3

ОНТ- D 102300x-xx (445-455 нм)

мВт: 27.5, 26.0, 24.5, 23.0, 21.5, 20.0

AE	BE	CE	DE
AD	BD	CD	DD
AC	BC	CC	DC
AB	BB	CB	DB
AA	BA	CA	DA

445.0 447.5 450.0 452.5 455.0

нм

Таблица 4

ОНТ- B 171700x-xx (455-465 нм)

мВт: 45, 40, 35, 30, 25

ED	FD	GD	HD
EC	FC	GC	HC
EB	FB	GB	HB
EA	FA	GA	HA

455.0 457.5 460.0 462.5 465.0

нм

Таблица 5

ОНТ- B 102300x-xx (455-465 нм)

мВт: 27.5, 26.0, 24.5, 23.0, 21.5, 20.0

EE	FE	GE	HE
ED	FD	GD	HD
EC	FC	GC	HC
EB	FB	GB	HB
EA	FA	GA	HA

455.0 457.5 460.0 462.5 465.0

нм

Таблица 6

ОНТ- H 171700x-xx (465-475 нм)

мВт: 45, 40, 35, 30, 25

ID	JD
IC	JC
IB	JB
IA	JA

465.0 467.5 470.0

нм

Таблица 7

ОНТ- H 102300x-xx (465-475 нм)

мВт: 27.5, 26.0, 24.5, 23.0, 21.5, 20.0

IE	JE
ID	JD
IC	JC
IB	JB
IA	JA

465.0 467.5 470.0

нм

Таблица 8

ОНТ- x454510x-xx (445-465 нм)

мВт: 450, 410, 380, 350, 325

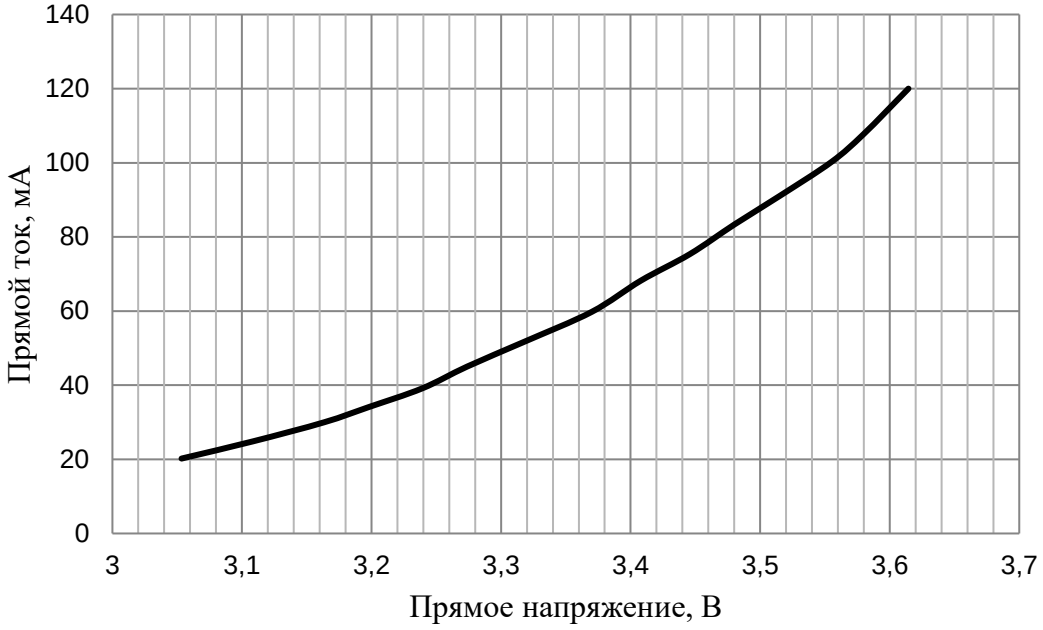
LD	MD
LC	MC
LB	MB
LA	MA

445.0 455.0 465.0

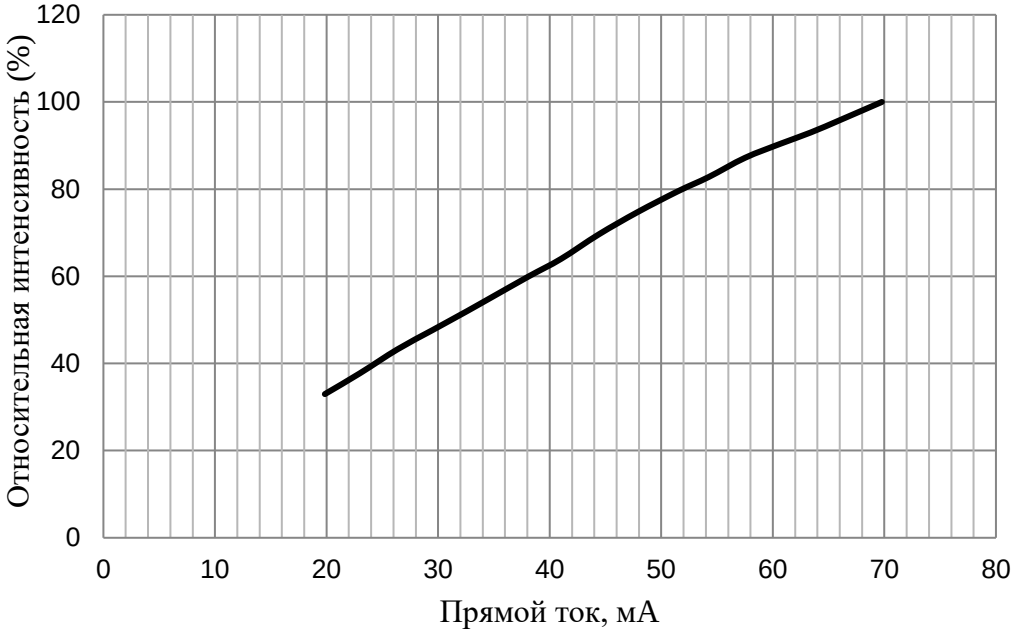
нм

Типичные зависимости вольт-амперной характеристики, зависимости интенсивности излучения от прямого тока при температуре окружающей среды T_a = 25 ºС для моделей чипов ОНТ- Х 171700х-хх и ОНТ- Х х102300х:

Зависимость прямого напряжения от прямого тока (T_a = 25 °С)



Зависимость прямого тока от относительной интенсивности (T_a = 25 °С)



Типичные и максимальные значения основных характеристик светодиодных чипов модели ОНТ- Х 171700х-хх при температуре окружающей среды T_a = 25 ºС

Таблица 9 – Оптические и электрические характеристики (T_a = 25 °С)

ОНТ- Х 171700х-хх

Характеристика	Обозначение	Состояние	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Прямое напряжение	V_F	I_f = 30 мА	2,8	3,2	3,4	В
Доминирующая длина волны	λ_{dom}	I_f = 30 мА	445	–	470	нм
Обратный ток	I_{rev}	V_{rev} = 5 В	–	–	2	мкА
Спектральная полуширина	$\Delta\lambda$	I_f = 30 мА	20	–	25	нм
Тепловое сопротивление	R_{th}	I_f = 30 мА	–	16	–	К/Вт
Классификация электростатических разрядов - класс 2. Предварительная подготовка-согласно уровню JEDEC 3.						

Таблица 10 – Абсолютные предельные значения (T_a = 25 °С) ОНТ- Х 171700х-хх

Характеристика	Обозначение	Абсолютные предельные значения	Единица Измерения
Прямой ток (DC)	I_F	60	мА
Пиковый прямой ток*	I_{FP}	100	мА
Обратное напряжение	V_{rev}	5	В
Рабочая температура	T_{opr}	-40…+85	°С
Температура хранения	T_{stg}	-40…+100	°С
* Частота = 1 кГц, рабочий режим = 1/10.			

Типичные и максимальные значения основных характеристик светодиодных чипов модели
ОНТ- Х х102300х
при температуре окружающей среды T_a = 25°С

Таблица 11 – Оптические и электрические характеристики (T_a = 25°С) ОНТ- Х х102300х

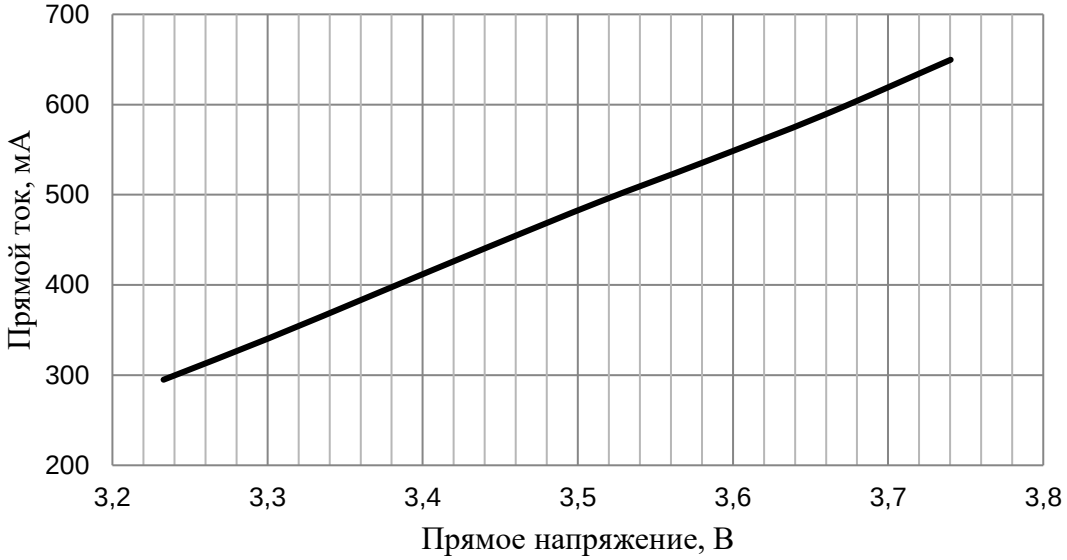
Характеристика	Обозначение	Состояние	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Прямое напряжение	V_F	I_f = 20 мА	2,8	3,2	3,4	В
Доминирующая длина волны	λ_{dom}	I_f = 20 мА	445	–	470	нм
Обратный ток	I_{rev}	V_{rev} = 5 В	–	–	2	мкА
Спектральная полуширина	$\Delta\lambda$	I_f = 20 мА	20	–	25	нм
Тепловое сопротивление	R_{th}	I_f = 30 мА	–	16	–	К/Вт
Классификация электростатических разрядов - класс 2. Предварительная подготовка-согласно уровню JEDEC 3.						

Таблица 12 – Максимальные значения (T_a = 25°С) ОНТ- Х х102300х

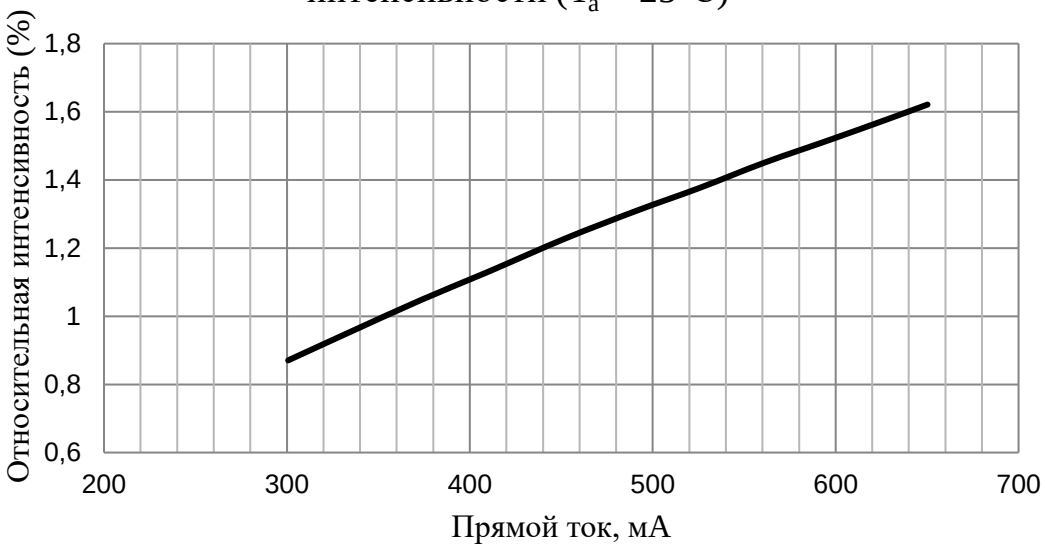
Характеристика	Обозначение	Абсолютные предельные значения	Единица Измерения
Прямой ток (DC)	I_F	30	мА
Пиковый прямой ток*	I_{FP}	100	мА
Обратное напряжение	V_{rev}	5	В
Рабочая температура	T_{opr}	-40…+85	°С
Температура хранения	T_{stg}	-40…+100	°С
* частота = 1 кГц, рабочий режим = 1/10.			

Типичные зависимости вольт-амперной характеристики, зависимости интенсивности излучения от прямого тока при температуре окружающей среды 25°С для модели чипов
ОНТ- Х 454510х-хх

Зависимость прямого напряжения от прямого тока
(T_a = 25°C)



Зависимость прямого тока от относительной интенсивности (T_a = 25°C)



Типичные и максимальные значения основных характеристик светодиодных чипов модели

ОНТ- Х 454510х-хх

при температуре окружающей среды T_a = 25°С

Таблица 13 – Оптические и электрические характеристики (T_a = 25°C)

ОНТ- Х 454510х-хх

Характеристика	Обозначение	Состояние	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Прямое напряжение	V_F	I_f = 350 мА	3,0	3,3	3,5	В
Доминирующая длина волны	λ_{dom}	I_f = 350 мА	445	–	470	нм
Обратный ток	I_{rev}	V_{rev} = 5 V	–	–	2	мкА
Спектральная полуширина	$\Delta\lambda$	I_f = 350 мА	20	–	25	нм
Тепловое сопротивление	R_{th}	I_f = 350 мА	–	3	–	К/Вт
Классификация электростатических разрядов - класс 2.						

Таблица 14 – Максимальные значения (T_a = 25°C) ОНТ- Х 454510х-хх

Характеристика	Обозначение	Абсолютные предельные значения	Единица Измерения
Прямой ток (DC)	I_F	700	мА
Пиковый прямой ток*	I_{FP}	900	мА
Обратное напряжение	V_{rev}	5	В
Рабочая температура	T_{opr}	-30…+85	°С
Температура хранения	T_{stg}	-40…+85	°С
* частота = 1 кГц, рабочий режим = 1/10.			

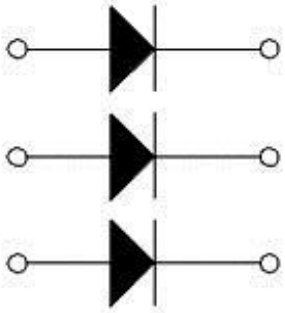
Приложение 3

Электрические схемы соединений светодиодных чипов и светодиодов

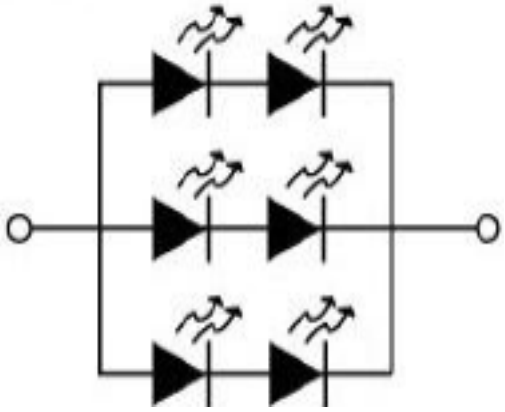
Представлены 5 электрических схем соединения светодиодных чипов и светодиодов. Схема V содержит 20 рядов по 7 светодиодов в каждом:

I

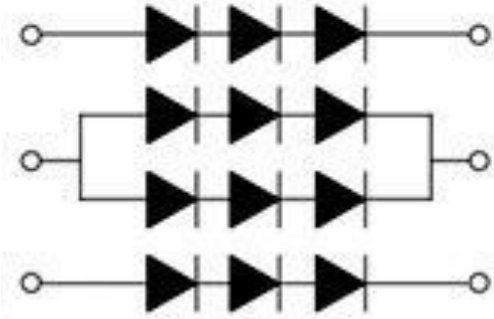
II



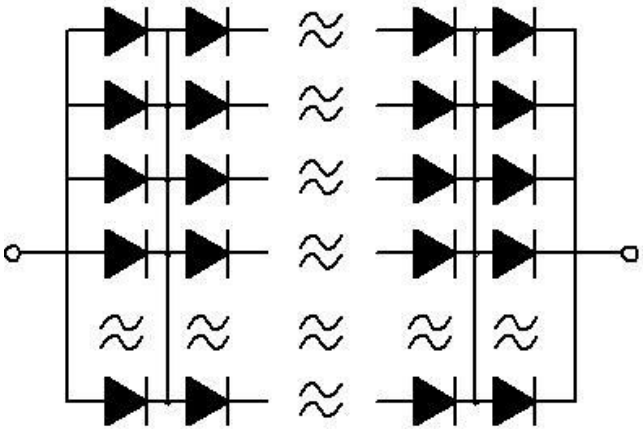
III



IV



V



Приложение 4

Виды светодиодных корпусов

Светодиоды, применяемые в устройствах освещения, чаще всего имеют пластиковый, керамический или *MCPCB* корпус. Чем мощнее светодиод, тем большую тепловую мощность должен рассеять корпус, то есть тем большей теплопроводностью должны обладать материалы, из которых он изготовлен.

Корпуса светодиодов, представленные на рисунке 1, используются для систем «чип на плате» (*chip on board)*. Их изготавливают из керамики AlN, Al_2O_3 или алюминия, меди с прослойками диэлектрика, отделяющего токоведущие элементы от основания корпуса. Корпуса на рисунке 1 (г, д) предназначены для светодиодов высокой яркости (*high bright LED*), часто изготавливаются из пластика полиметилметакрилата (PMMA).

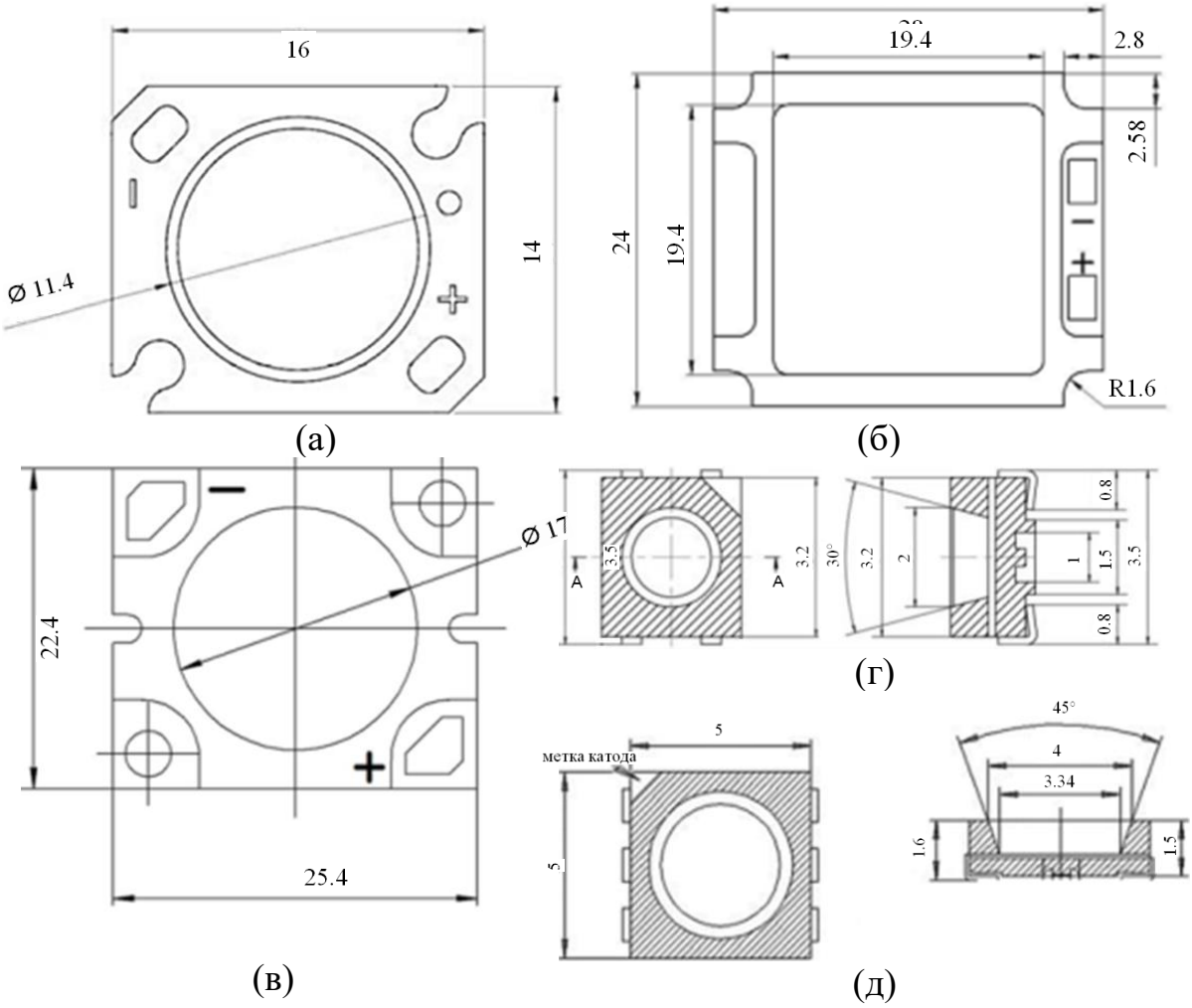


Рисунок 1 – Виды корпусов светодиодов:
корпус на металлическом или керамическом основании для устройства «чип на плате»: (а, в) - вид сверху;
корпус из PMMA для светодиода высокой яркости: (г, д) - вид сверху и сбоку. Размеры на чертежах указаны в мм

Приложение 5

Спецификация на светодиод модели OLP-X5050F6C-XXXX[1]

Таблица 1 – Оптические и электрические характеристики (T_a = 25ºC)

Характеристика	Обозначение	Условия	Минимальное значение	Типичное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Прямое напряжение*	V_F	I_F = 100 мА	8,8	–	10,8	В
Координаты цветности	(x, y)	I_F = 100 мА	–	(0,3447; 0,3553)	–	–
Световой поток	Φ_V	I_F = 100 мА	75	–	105	лм
Двойной угол половинной яркости	$2\theta^{1/2}$	I_F = 100 мА	–	120	–	град
Тепловое сопротивление чип/корпус	R_{th}	I_F = 100 мА	–	60	–	ºC/Вт

* В случае специального запроса возможна сортировка светодиодов по величине прямого напряжения в диапазоне 0.4 В.

Таблица 2 – Абсолютные максимальные значения (T_a = 25 ºC)

Характеристика	Обозна-чение	Абсолютное максимальное значение	Единица измерения
Потребляемая мощность	P_D	1.2	Вт
Постоянный прямой ток	I_F	120	мА
Пиковый прямой ток ($t \leq 0.1$ мсек, $D \leq 1/10$)	I_{FP}	150	мА
Диапазон рабочих температур	T_{opr}	-40…+100	ºC
Температура хранения	T_{stg}	-40…+100	ºC
Температура плавления припоя	T_{sol}	+260**	ºC

** Время воздействия должно составлять не более 5 сек.

[1] На основании материалов http://www.optogan.ru/products/led_components/leds/smd

Код светодиода

$$\underbrace{\text{OLP}}_{1}\text{-}\underbrace{\text{X}}_{2}\underbrace{\text{5050}}_{3}\underbrace{\text{F6C}}_{4}\text{-}\underbrace{\text{x x}}_{5}\underbrace{\text{x}}_{6}\underbrace{\text{x}}_{7}$$

1 — обозначение компании-производителя, в данном случае, компании Оптоган;
2— вид цвета;
3 — размер сторон светодиода в мм;
4 — позиции, оставленные производителем для введения новых бинов, например, по типу чипа — латеральный или вертикальный;
5 — цветовой бин;
6 — бин по световому потоку;
7 — бин по прямому напряжению.

Бины по прямому напряжению, световому потоку

Таблица 3 – Бины по прямому напряжению

Код бина	Прямое напряжение, В
1	8,8–9,2
2	9,2–9,6
3	9,6–10,0
4	10,0–10,4
5	10,4–10,8
6	10,8–11,2
7	11,2–11,6

Таблица 4 – Бины по световому потоку

Код бина	Световой поток, лм
A	75–80
B	80–85
C	85–90
D	90–95
E	95–100
F	100–105

Цветовые бины

Таблица 5 – Цветовые бины согласно стандарту Energy Star Requirements for solid state lighting

Вид цвета	Холодный белый		Дневной белый		Нормальный белый		Теплый белый	
Цветовой бин	6500 К		5000 К		4000 К		3000 К	
ССТ, К	6530±510		5028±283		3985±275		3045±175	
Код бина	65		50		40		30	
Цветовые координаты	x	y	x	y	x	y	x	y
	0,3250	0,3481	0,3551	0,3760	0,4006	0,4044	0,4562	0,4260
	0,3028	0,3304	0,3376	0,3616	0,3736	0,3874	0,4299	0,4165
	0,3068	0,3113	0,3366	0,3369	0,3670	0,3578	0,4147	0,3814
	0,3221	0,3261	0,3515	0,3487	0,3898	0,3716	0,4373	0,3893

Расположение цветовых бинов на диаграмме цветности

На рисунке 1 приведены цветовые бины и линия абсолютно черного тела.

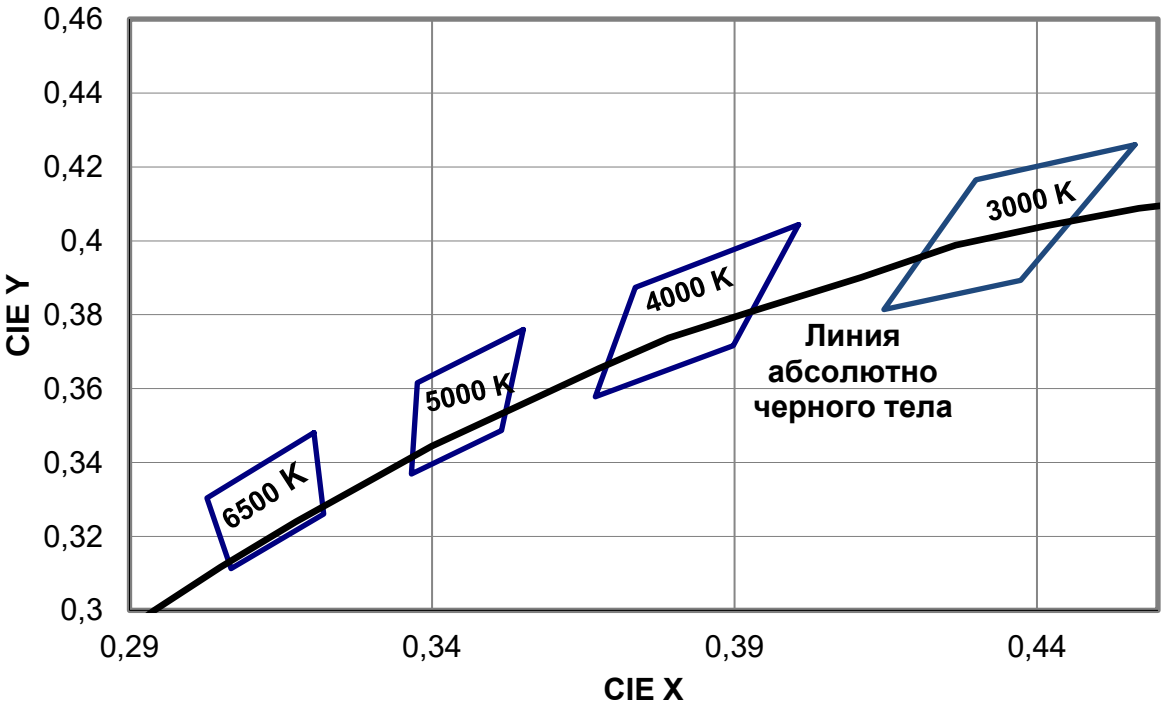
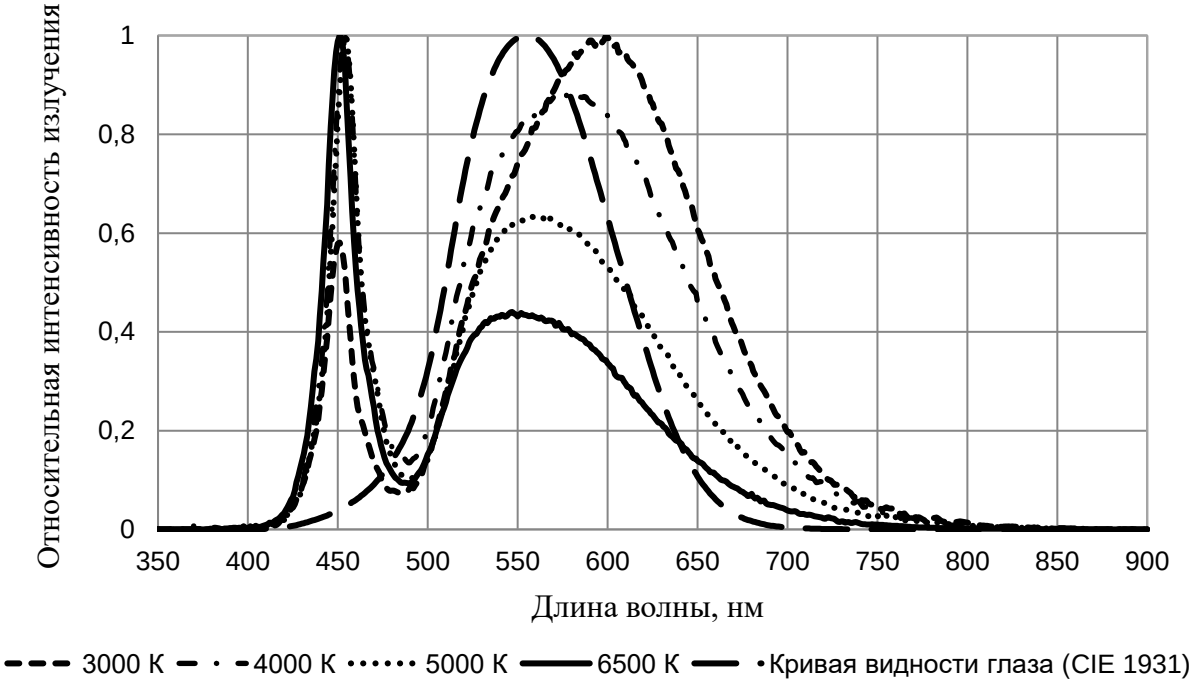
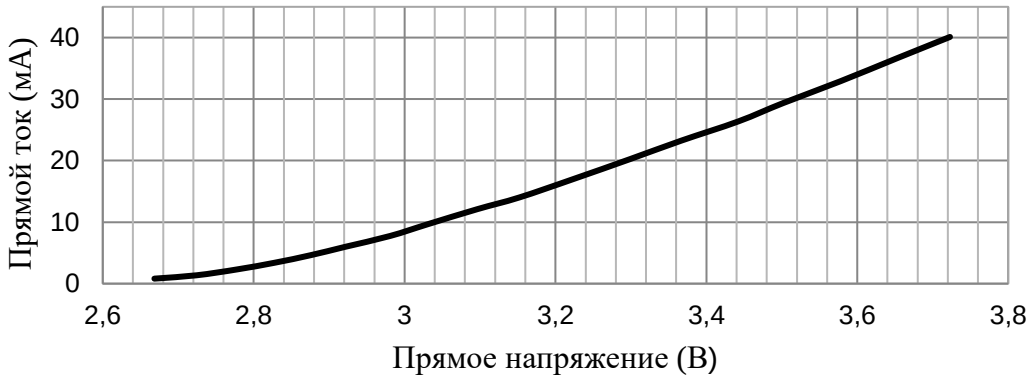


Рисунок 1 – Бины по цветовой температуре и линия абсолютно черного тела

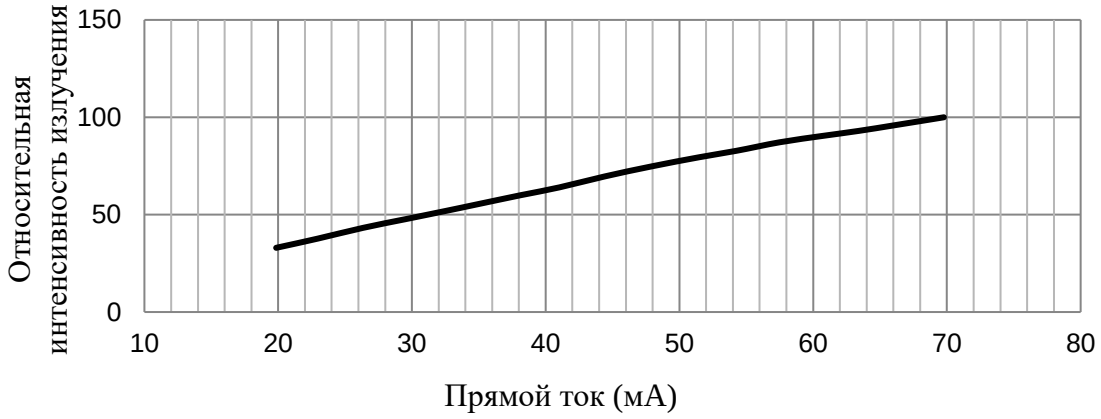
Зависимость интенсивности излучения от длины волны



Вольт-амперная характеристика

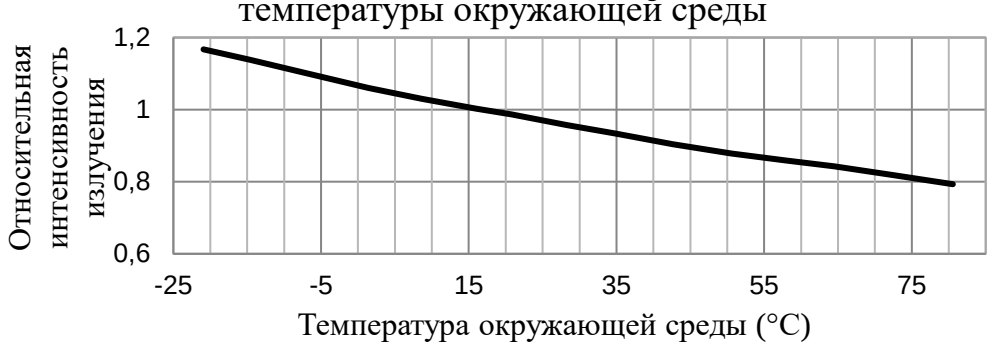


Зависимость интенсивности излучения от прямого тока



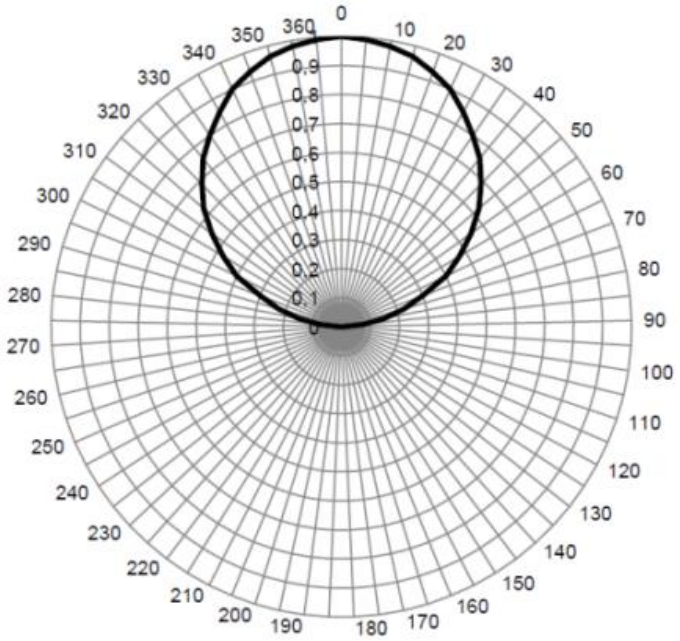
Зависимость прямого тока от температуры окружающей среды

Зависимость интенсивности излучения от температуры окружающей среды

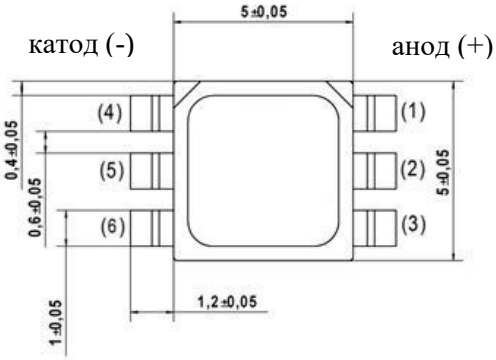


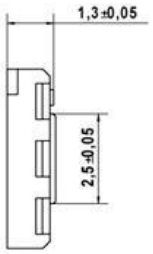
Отношение световых потоков при температуре перехода 100°C и 25°C (*hot-cold factor, HC*) составляет 74.3 %.

Диаграмма направленности

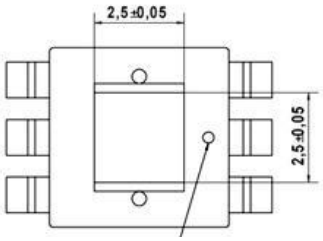


Габаритные размеры, схема подключения светодиодов, внешний вид



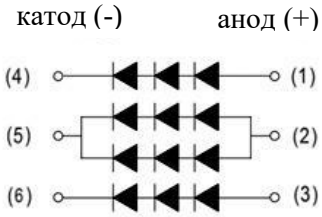


Внешний вид светодиода OLP-X5050F6C-XXXX

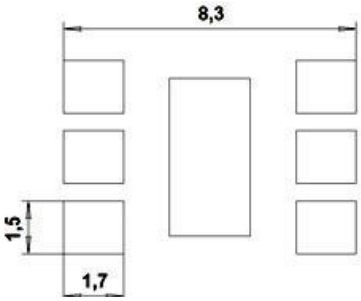


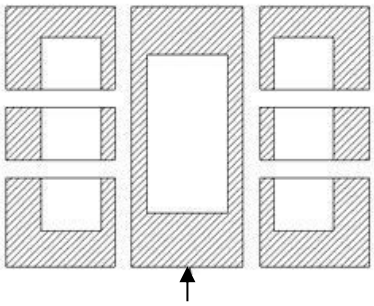
метка анода

Схема электрической цепи



Размеры контактных площадок для монтажа светодиодов на печатную плату





дополнительные медные площадки для улучшения теплоотвода

Материалы элементов корпуса светодиода

Таблица 6 – Основные материалы конструктивных элементов светодиода

Элемент корпуса	Материал*
Герметизирующая оболочка	Силикон
Корпус	Пластик
Выводная рамка	Медь, покрытая серебром

* Среди материалов, из которых изготовлен светодиод, свинец отсутствует.

Приложение 6

Спецификации на радиаторы

Ниже представлены модели промышленно-выпускаемых ребристых радиаторов PTP 3270, PTP 3225, HS155, HS156, HS172, HS178 и игольчатых радиаторов И-650, И-110 и техническая информация о них. Принятые сокращения: $P_{рас.}$ — рассеиваемая радиатором мощность; R_{Θ} — тепловое сопротивление, К/Вт; W_T — погонный вес, кг/м. Размеры на чертежах указаны в мм.

PTP 3270

$P_{рас.}$ = 1 Вт

PTP 3225

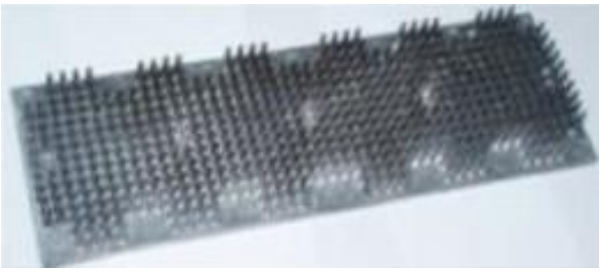
$P_{рас.}$ = 2,5 Вт

И-650

Радиатор изготовлен из силумина.
Технические характеристики:

- площадь поверхности 102 см^2
- мощность рассеивания 6 Вт
- масса радиатора 30 г
- габаритные размеры 59×36×14 мм

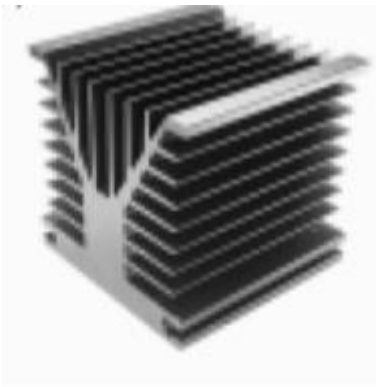
И-110

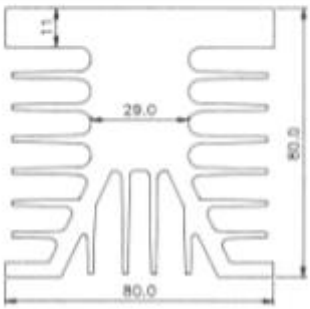


Радиатор изготовлен из силумина.
Технические характеристики:

- площадь поверхности 1160 см^2
- мощность рассеивания 70–75 Вт
- масса радиатора 30 г
- габаритные размеры 90×268×20 мм

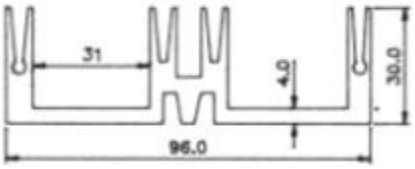
HS155-xx





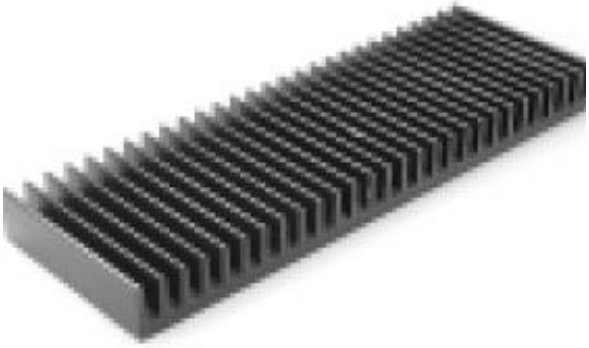
R_Θ = 2.7 К/Вт
W_T = 9.44 кг/м

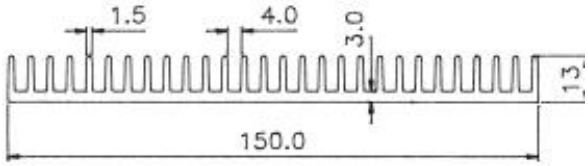
HS156-xx



R_Θ = 5.9 К/Вт
W_T = 2.29 кг/м

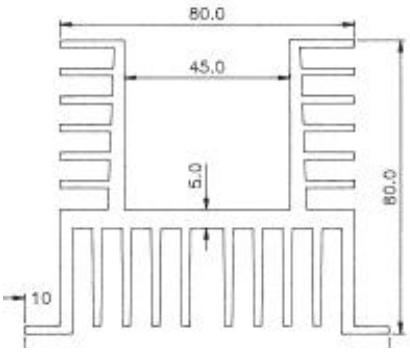
HS172-xx





R_Θ = 3.1 К/Вт
W_T = 2.54 кг/м

HS178-xx



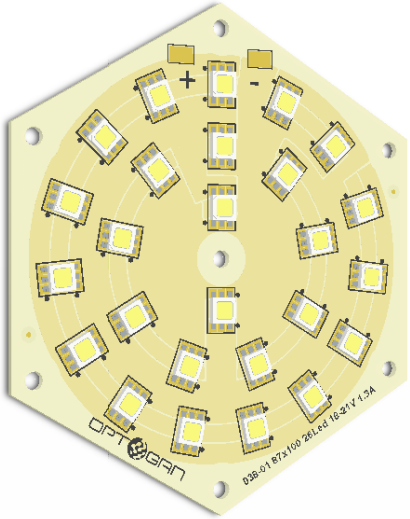
R_Θ = 2.9 К/Вт
W_T = 4.9 кг/м

Приложение 7

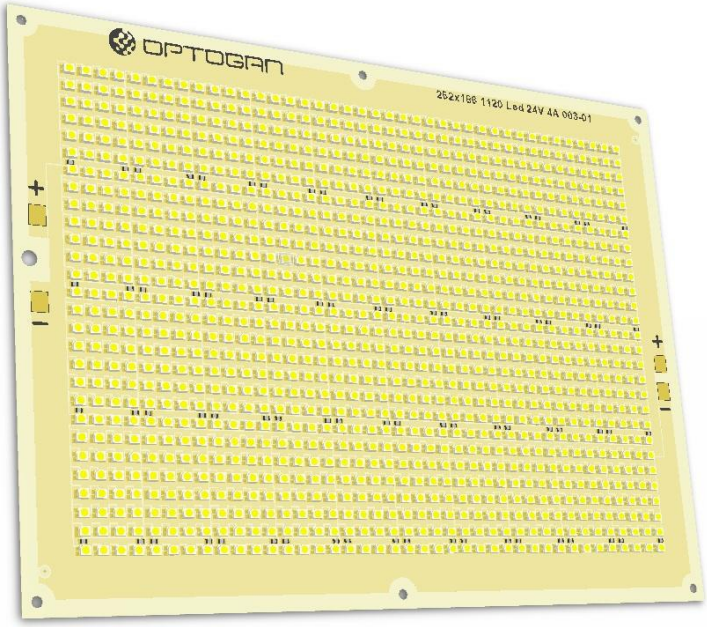
Спецификации на светодиодные модули[2]

Краткие характеристики светодиодных модулей OMA-X100H86-XXFB, OMA-X100H87-XXFA, OMA-X252R186-XXFD, производимые компанией «Оптоган», представлены на рисунке 1 и в Таблицах 1–3.

(а)



(б)



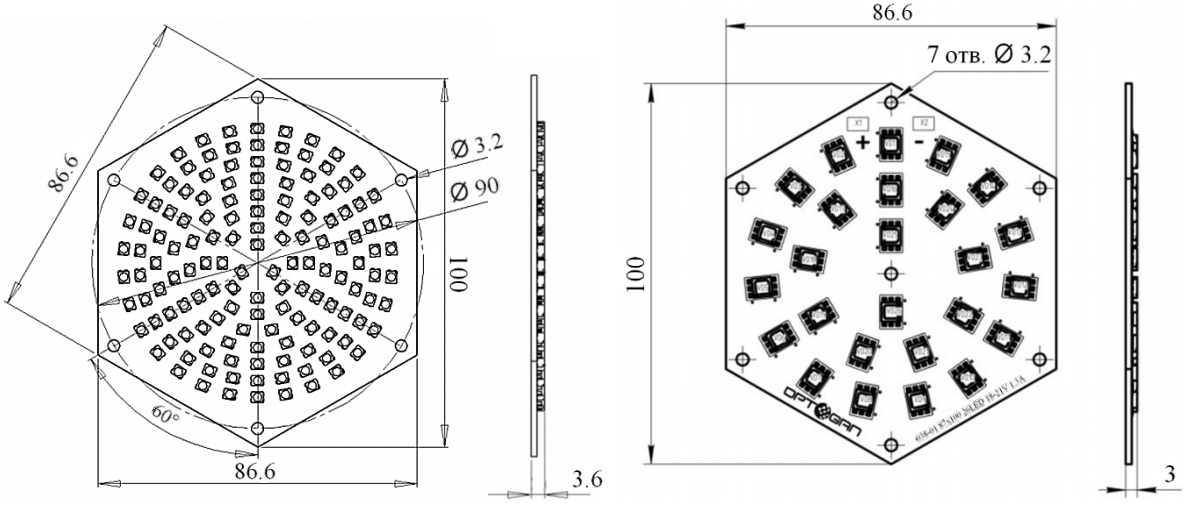
(в)

Рисунок 1 – Внешний вид светодиодных модулей, выпускаемых компанией «Оптоган»:
(а) модель OMA-X100H86-XXFB;
(б) модель OMA-X100H87-XXFA;
(в) модель OMA-X252R186-XXFD.

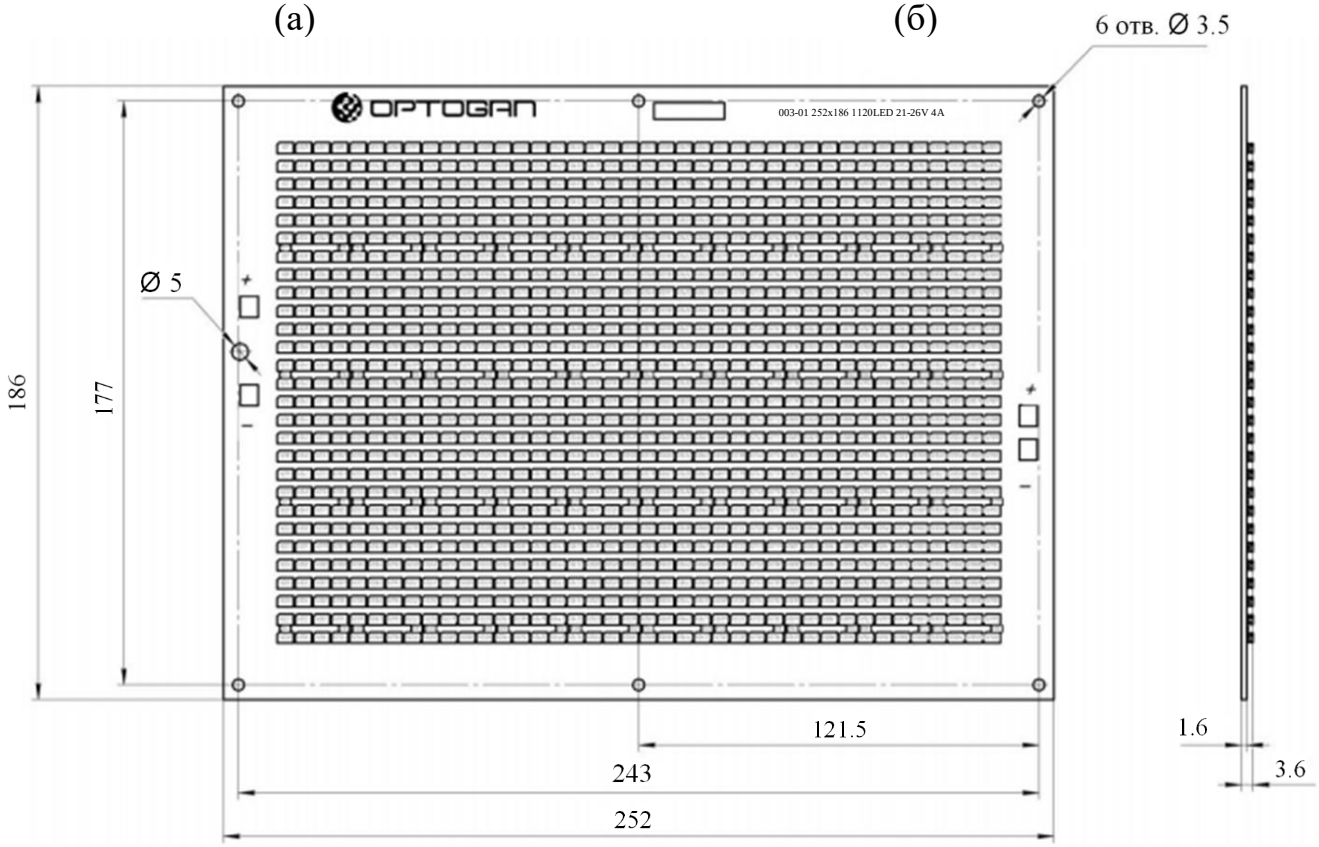
[2] На основании материалов http://www.optogan.ru/products/led_components/led_modules

Габаритные размеры светодиодных модулей
OMA-X100H86-XXFB, OMA-X100H87-XXFA, OMA-X252R186-XXFD

На рисунке 2 (а–в) указаны характерные размеры светодиодных модулей.



(а) (б)



(в)

Рисунок 2 – Характерные размеры светодиодных модулей:
модель OMA-X100H86-XXFB (а);
модель OMA-X100H87-XXFA (б);
модель OMA-X252R186-XXFD (в)

Основные технические характеристики светодиодного модуля

OMA-X100H86-XXFB

Таблица 1 – Характеристики светодиодного модуля OMA-X100H86-XXFB

Описание продукта			
Модель	OMA-X100H86-XXFB		
Материал печатной платы	Алюминий		
Количество светодиодов	140 шт.		
Потребляемая мощность	12 Вт		
Срок службы	50 000 часов		
Электрические характеристики			
Напряжение питания	36 В		
Ток питания	350 мА		
Режим работы драйвера	Постоянный ток		
Светотехнические характеристики			
Тип светодиодов	OLP-X3528F4A-XXXX OLP-X3528F2A-XXXX		
Световой поток	Не менее 950 лм		
Угол излучения	120 град.		
Механические характеристики			
Общая масса нетто	50 г		
Диапазон рабочих температур	-40°C ÷ +50°C		
Температура хранения	-60°C ÷ +50°C		
Минимальная площадь рассеивающего радиатора	0.006 м^2		
Возможные модификации			
Модель	Оттенок белого	Цветовая температура, К	Световой поток, лм
OMA-X100H86-30FA	Теплый белый	3000	950
OMA-X100H86-40FA	Нормальный белый	4000	980
OMA-X100H86-50FA	Дневной белый	5000	980
OMA-X100H86-65FA	Холодный белый	6500	980

Основные технические характеристики светодиодного модуля

OMA-X100H87-XXFA

Таблица 2 – Характеристики светодиодного модуля OMA-X100H87-XXFA

Описание продукта			
Модель	OMA-X100H87-XXFA		
Материал печатной платы	Алюминий		
Количество светодиодов	26 шт.		
Потребляемая мощность	25 Вт		
Срок службы	50 000 часов		
Электрические характеристики			
Напряжение питания	18–21 В		
Ток питания	1300 мА		
Режим работы драйвера	Постоянный ток		
Светотехнические характеристики			
Тип светодиодов	OLP-X5050F6C-XXXX		
Световой поток	Не менее 2100 лм		
Угол излучения	120 град.		
Механические характеристики			
Общая масса нетто	50 г		
Диапазон рабочих температур	-40 °C ÷ +50 °C		
Температура хранения	-60 °C ÷ +50 °C		
Минимальная площадь рассеивающего радиатора	0.1 м^2		
Возможные модификации			
Модель	Оттенок белого	Цветовая температура, К	Световой поток, лм
OMA-X100H87-30FA	Теплый белый	3000	2100
OMA-X100H87-40FA	Нормальный белый	4000	2200
OMA-X100H87-50FA	Дневной белый	5000	2200
OMA-X100H87-65FA	Холодный белый	6500	2200

Основные технические характеристики светодиодного модуля

OMA-X252R186-XXFD

Таблица 3 – Характеристики светодиодного модуля OMA-X252R186-XXFD

Описание продукта			
Модель		OMA-X252R186-XXFD	
Материал печатной платы		Алюминий	
Количество светодиодов		1120 шт.	
Потребляемая мощность		96 Вт	
Срок службы		50 000 часов	
Электрические характеристики			
Напряжение питания		21–26 В	
Ток питания		4 А	
Режим работы драйвера		Постоянный ток	
Светотехнические характеристики			
Тип светодиодов		Серия OLP-X3528F2A	
Световой поток		Не менее 10 000 лм	
Угол излучения		120 град.	
Механические характеристики			
Общая масса нетто		260 г	
Диапазон рабочих температур		-40°C ÷ +85°C	
Температура хранения		-60°C ÷ +100°C	
Минимальная площадь рассеивающего радиатора		0.5 $м^2$	
Возможные модификации			
Модель	Оттенок белого	Цветовая температура, К	Световой поток, лм
OMA-N252R186-40FD	Нормальный белый	4000	10 000
OMA-D252R186-50FD	Дневной белый	5000	10 000
OMA-C252R186-65FD	Холодный белый	6500	10 000

Приложение 8

Спецификации на источники питания для светодиодных источников света

Представлены две серии источников питания для светодиодных источников света. На рисунке 1 приведен внешний вид драйверов LXC40 и LPF-40.

(а) (б)

Рисунок 1 – Внешний вид источников питания для светодиодного источника света: модель LXC40 производства Excelsys Technologies (а), модель LPF-40 Mean Well производства TRC Electronic Incorporation (б)

В Таблице 1 приведены основные характеристики серии источников питания постоянного тока LXC40, производимых компанией Excelsys Technologies.

В Таблице 2 представлены основные характеристики серии источников питания постоянного тока LPF-40 Mean Well, производимых компанией TRC Electronic Inc.

Оба рассмотренных изделия обеспечивают до 40 Вт мощности на выходе. В серии LXC40 возможна реализация до 3,33 А выходного тока и до 114 В выходного напряжения. В серии LPF-40 — до 3.34 А и 54 В.

На рисунках 2–4 приведены особенности поведения характеристик источника питания Mean Well LPF-40: зависимость нагрузки источника питания от температуры окружающей среды и входного напряжения (рисунок 2), зависимость коэффициента мощности (рисунок 3) и эффективности (рисунок 4) от нагрузки.

В Таблицы 1 и 2 входит техническая информация на источники питания, взятая из соответствующих спецификаций.

Таблица 1 – Технические характеристики источников питания для светодиодных источников света серии LXC40 производителя Excelsys Technologies

Модель	Выходное напряжение, В	Выходной ток, мА	Входное напряжение, В (VAC[3])	OVP[4] максимальная, В	Эффективность, %
LXC40-0350SW	38–114	350	90–305	130	88,0
LXC40-0450SW	30–89	450	90–305	101	88,0
LXC40-0700SW	18–54	700	90–305	60	87,0
LXC40-1050SW	12–36	1050	90–305	42	87,0
LXC40-1280SW	10–29	1280	90–305	37	87,0
LXC40-1400SW	10–25	1400	90–305	37	87,0
LXC40-1660SW	8–23	1660	90–305	32	86,0
LXC40-2220SW	6–16	2220	90–305	25	85,0
LXC40-3330SW	4–11	3330	90–305	17	84,0

Характеристики входного сигнала

Параметр	Условия/Описание	Минимальное значение	Номинальное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Диапазон входного напряжения	Широкий входной сигнал	90		305	VAC
Входной диапазон частот		47		63	Гц
Входной ток	100 VAC, 40 Вт на выходе			0,48	A
Ток включения	230 VAC, 25°C, включение в холодном состоянии			60	A
Коэффициент мощности	220 VAC, 110 VAC	0,92		0,98	

Характеристики выходного сигнала

Параметр	Условия/Описание	Минимальное значение	Номинальное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Нестабильность выходного тока/напряжения по сети				±2	%
Стабилизация по нагрузке				±5	%

[3] VAC – напряжение переменного тока (volt alternating current).
[4] OVP — защита от перегрузок по напряжению (over voltage protection).

Диапазон напряжений	см. «Выходное напряжение» выше				
Диапазон выходного тока	см. «Выходной ток» выше				
Пульсация и шум	Пропускная способность 20 МГц, см. примечание 1	3		5	В
Перерегулировка				10	%
Задержка на включение	измеряется при 220 В переменного тока и полной нагрузке			2,0	сек
Защита от короткого замыкания	Автоматическое восстановление		1,25 В, максимум		
Общие технические требования					
Параметр	Условия/Описание	Минимальное значение	Номинальное значение	Максимальное значение	Единица Измерения
Изоляционное напряжение	вход для вывода см. примечание 2 вход в шасси	3000 1500			VAC VAC
Эффективность	зависит от модели		87		%
Одобрение службы безапасности	UL 8750 соответствует UL 1310 класс 2 EN61347-1, -2-13				
Отсутствие рассеиваемой мощности	Измеренный при 120 VAC и 220 VAC			6	Вт
Среднее время безотказной работы	MIL HDBK 217-F, 110 VAC входной, 80% нагрузка, 25 °C		487 000		час
Время жизни	45 °C, 110 VAC входное, 80% от нагрузки		77 000		час
Вес			300		гр
Диапазон рабочих температур		-20		+60	°C
Температура хранения		-40		+85	°C
Относительная влажность воздуха	без конденсации (при работе)	10		100	% RH[5]

Примечание 1. Выход соединен параллельно с керамическим конденсатором 0,1

[5] RH – относительная влажность.

мкФ и электролитическим конденсатором 10 мкФ.
Примечание 2. Испытание первичной и вторичной изоляции не выполняется при электропитании.

Таблица 2 – Технические характеристики источников питания для светодиодных источников света серии Mean Well LPF-40 производителя TRC Electronic Incorporation

Область	Модель	LPF-40-12	LPF-40-15	LPF-40-20	LPF-40-24	LPF-40-30	LPF-40-36	LPF-40-42	LPF-40-48	LPF-40-54
Выходные характеристики	Постоянное напряжение, В	12	15	20	24	30	36	42	48	54
	Режим постоянного тока (прим. 4), В	7,2 ~ 12	9 ~ 15	12 ~ 20	14,4 ~ 24	18 ~ 30	21,6 ~ 36	25,2 ~ 42	28,8 ~ 48	32,4 ~ 54
	Номинальный ток, А	3,34	2,67	2	1,67	1,34	1,12	0,96	0,84	0,76
	Номинальная мощность, Вт	40,08	40,08	40	40,08	40,2	40,32	40,32	40,32	41,04
	Пульсация и шум (max.) (note 2), mVp-p	150	150	150	150	200	250	250	250	350
	Допустимое отклонение напряжения (прим. 3), %	±4	±4	±4	±4	±4	±4	±4	±4	±4
	Нестабильность выходного тока/напряжения по сети, %	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5
	Стабилизация по нагрузке, %	±2,0	±1,5	±1,0	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5
	Установка, время нарастания (прим. 7)	1000 мсек, 80 мсек / 115 VAC при полной нагрузке 1200 мсек, 80 мсек / 230 VAC								
	Время ожидания (тип.)	16 мсек / 230 VAC 16 мсек / 115 VAC при полной нагрузке								
Входные характеристики	Диапазон напряжений (прим. 5)	90~305 VAC 127~431 VDC								
	Диапазон частот	47 ~ 63 Гц								
	Коэффициент мощности, (тип.)	PF>0,97/115 VAC, PF>230 VAC, PF>0,92/277 VAC при полной нагрузке (см. “ «Характеристика коэффициента мощности» Кривая)								
	Эффективность	84	85	86	87	88	88	88.5	90	90

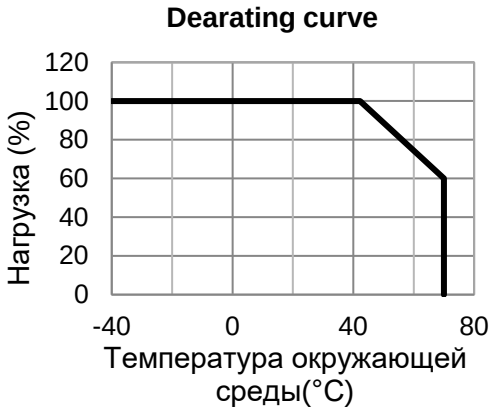
Приложение 8

Спецификации на источники питания для светодиодных источников света

Продолжение

Область	Модель	LPF-40-12	LPF-40-15	LPF-40-20	LPF-40-24	LPF-40-30	LPF-40-36	LPF-40-42	LPF-40-48	LPF-40-54
	(тип.), %									
	Переменный ток (тип.)	0,6 A / 115 VAC 0,3 A / 230 VAC								
	Пусковой ток (тип.)	Включение в холодном состоянии 75A / 230 VAC								
	Ток утечки	< 0.75 mA / 240 VAC								
Защита	Перегрузка (прим. 4)	95 ~ 108%								
		тип защиты: постоянное ограничение тока, автоматически восстанавливается после устранения неисправности								
	Короткое замыкание	Режим защиты устройства питания от перегрузки по току, автоматически восстанавливается после устранения неисправности								
	Перенапряжение	15 ~ 17 В	17,5 ~ 21 В	23 ~ 27 В	28 ~ 35 В	34 ~ 40 В	41 ~ 49 В	46 ~ 54 В	54 ~ 63 В	59 ~ 66 В
		Тип защиты: выключение и выключение напряжения о/р, включение питания для восстановления								
	Избыточный нагрев	90 °C ± 10 °C (тиристор обратной проводимости 2)								
		Тип защиты: выключить напряжение о/р, перезагрузить для восстановления								
Окружающая среда	Температурный режим при работе	-40°C ~ +70°C (см. «Кривая зависимости силы тока от окружающей температуры »)								
	Рабочая влажность	20 ~ 95% RH без конденсации								
	Температура хранения, влажности	-40°C ~ +80°C, 10 ~ 95% RH								
	Температурный коэффициент	±0,03% (0 ~ 50 °C)								
	Вибрация	10 ~ 500 Гц, 5G 12 мин. / 1 цикл, период в течение 72 мин. по осям X, Y, Z								
Электробезопасность	Стандарты безопасности (прим. 6)	UL8750, EN61347-1, EN61347-2-13 независимый, J61347-1, J61347-2-13, IP67 одобрен: конструкция соответствует UL60950-1, TUV EN60950-1								
	Выдерживаемое напряжение	I/P-O/P: 3,75 KVAC								
	Сопротивление изоляции	I/P-O/P: 100 МОм / 500 VDC / 25°C / 70% RH								
	ЭМС-излучение	соответствие EN55015, классу C EN61000-3-2 (≥ 60% нагрузки); EN61000-3-3								
	ЭМС-помехоустойчивость	соответствие EN61000-4-2, 3, 4, 5, 6, 8, 11; EN61547, EN55024, уровень легкой промышленности (всплеск 2 кВ), критерии A								
	Среднее время безотказной работы	438,8 кчас минимум. MIL-HDBK-217F (25°C)								
	Размер	162,5*43*32 mm (L*W*H)								

Область	Модель	LPF-40-12	LPF-40-15	LPF-40-20	LPF-40-24	LPF-40-30	LPF-40-36	LPF-40-42	LPF-40-48	LPF-40-54
	Упаковка	0,44 кг; 32 шт. / 15,08 кг / 0,93 CUFT								
Примечания	1. Все параметры, специально не упомянутые, измеряются при напряжении 230 В переменного тока, номинальной нагрузке и температуре окружающей среды 25°C.									
	2. Пульсация и шум измеряются с полосой пропускания 20 МГц с использованием 12-дюймовой витой пары, заключенной с параллельным конденсатором с напряжением 0,1 мкФ и 47 Ом.									
	3. Допуск: включает настройку допуска, регулировку линии и регулировку нагрузки									
	4. Рабочая область постоянного тока находится в пределах 60% ~ 100% номинального выходного напряжения. Это подходящая рабочая область для устройств, связанных с LED, но, пожалуйста, подтвердите специальные электрические требования для некоторых конкретных системных разработок.									
	5. При низких входных напряжениях может потребоваться снижение мощности. Проверьте статические характеристики для получения более подробной информации.									
	6. Подходит для использования в помещении или на открытом воздухе без воздействия прямых солнечных лучей. Избегайте погружения в воду в течение 30 минут.									
	7. Длительность времени установки измеряется при первом холодном запуске. Включение/выключение питания может привести к увеличению времени настройки.									
	8. Источник питания рассматривается как компонент, который будет работать в сочетании с окончательным оборудованием. Поскольку на производительность EMC будет влиять полная установка, производители окончательного оборудования должны снова переопределить Директиву по электромагнитной совместимости при полной установке.									



(а)

(б)

Рисунок 2 – Зависимость нагрузки источника питания Mean Well LPF-40 от температуры окружающей среды (а) и от входного напряжения (б)

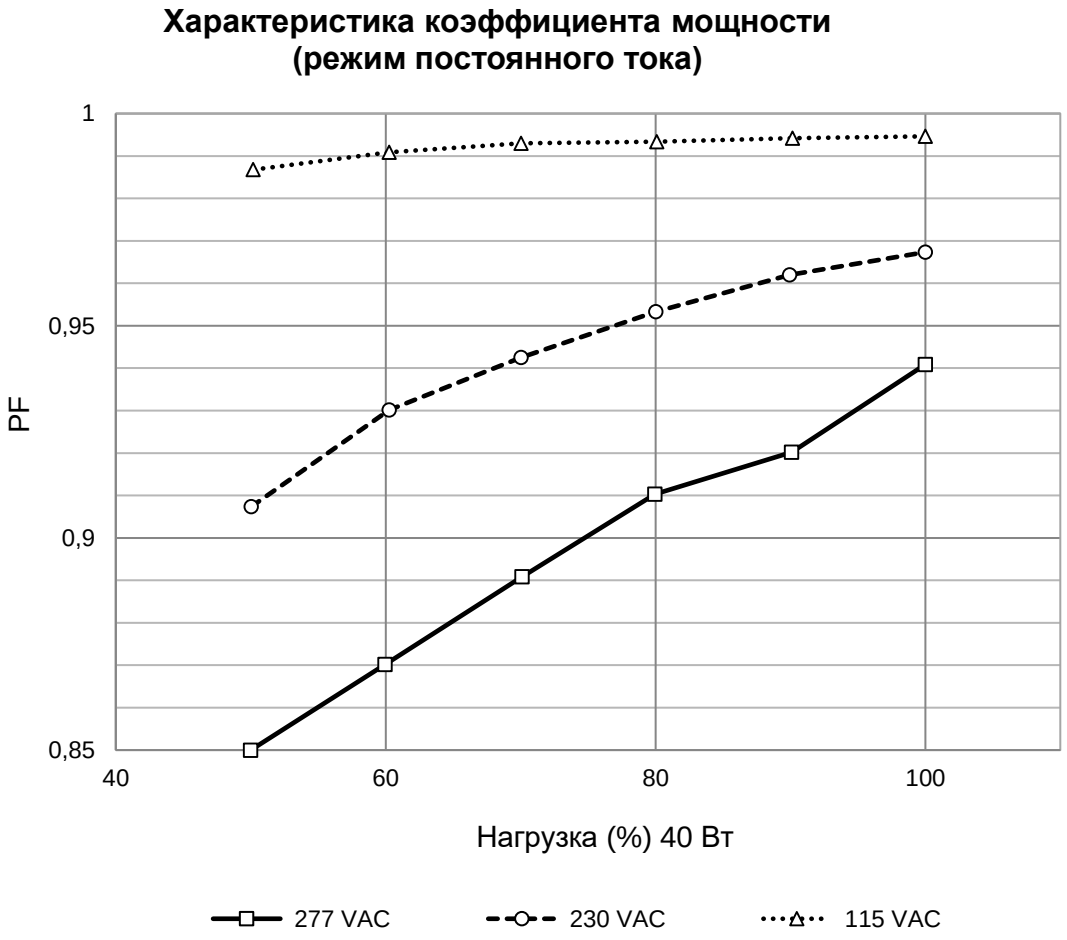


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента мощности источника питания Mean Well LPF-40 от нагрузки

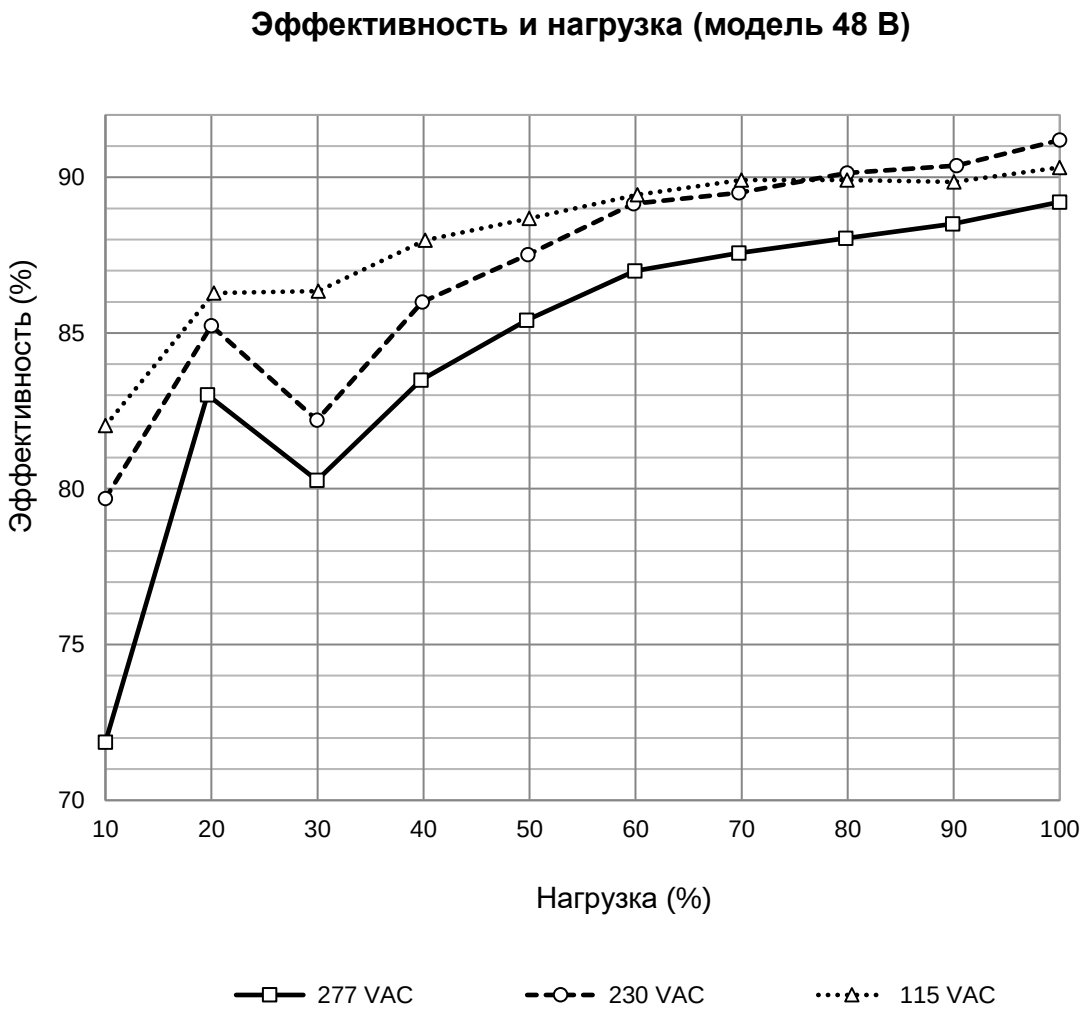


Рисунок 4 – Зависимость эффективности источника питания Mean Well LPF-40 от нагрузки

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА СВЕТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра световых технологий и оптоэлектроники была создана в 2015 году объединением кафедры твердотельной оптоэлектроники (ТТОЭ) и базовой магистерской кафедры светодиодных технологий. С момента основания кафедры до настоящего времени ее заведующим является доцент, д.ф.-м.н. Владислав Евгеньевич Бугров.

Сотрудники кафедры СТО — ведущие специалисты в области физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур и приборов, физического материаловедения, а также производства светодиодов и светодиодных устройств. Они обладают большим опытом научной, преподавательской и производственной деятельности, а кафедра располагает оснащенными учебными и научными лабораториями.

На кафедре проводится обучение магистров по направлению 16.04.01 «Оптоэлектроника» по программе 12.04.02 «Светодиодные технологии» и аспирантов по специальностям: 01.04.05 «Оптика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 05.11.07 «Оптические и оптоэлектронные приборы и комплексы», 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела». Целью обучения является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих компетенциями и навыками для работы в инновационной сфере оптоэлектронных технологий.

Основными направлениями научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ студентов и аспирантов на кафедре световых технологий и оптоэлектроники являются:

– Элементная база устройств фотоники, включая создание новых источников, преобразователей и приемников оптического излучения;

– Конструирование и технологии производства элементов и узлов оптической техники;

– Техническое зрение и управление производственными процессами лазерно-оптических измерений и диагностики;

– Фотонные технологии нанодиапазона, включая получение нанообъектов, их диагностику и манипулирование ими;

– Фотонные технологии обеспечения безопасности, включая распознавание образов, детектирование следовых количеств веществ, скрытые наблюдения;

– Энергоэффективное освещение с использованием светодиодов;

– Фотометрия и колориметрия.

Более подробную информацию о кафедре световых технологий и оптоэлектроники вы можете получить на сайте кафедры http://sto.ifmo.ru/.

Арина Валерьевна Кремлева
Светлана Николаевна Липницкая
Алексей Евгеньевич Романов
Владислав Евгеньевич Бугров

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Часть 1

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД №
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49