

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

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОДИОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Томск 2016

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

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий каф. РЭТЭМ
_____ В.И. Туев
« ____ » _____ 2016 г.

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОДИОДНЫЕ УСТРОЙСТВА

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

Разработали:
Заведующий каф. РЭТЭМ
_____ В.И. Туев

Профессор каф. РЭТЭМ
_____ А.А. Вилисов

Доцент каф. РЭТЭМ
_____ В.С. Солдаткин

Томск 2016

Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И. Светодиоды и светодиодные устройства: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. – 40 с.

Настоящее учебное пособие составлено с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Технология электронных средств». Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих специальную дисциплину по выбору вариативной части профессионального цикла Б1.В.ДВ.9.1 «Светодиоды и светодиодные устройства» и содержат необходимую информацию и курс лекций для изучения дисциплины. При изучении материалов данного учебного пособия, студенты должны расширить свои знания по изучаемой дисциплине, а также данное учебное пособие направлено на формирования у студентов следующих компетенций:

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

ПК-6 – способностью собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии.

ПК-18 – способностью осуществлять сбор и анализ научно-технической информации, обобщать отечественный и зарубежный опыт в области конструирования и технологии электронных средств, проводить анализ патентной литературы.

ПК-20 – готовностью проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять обзоры, отчёты.

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

- основные физические процессы (инжекция, рекомбинация, световывод) происходящие в светодиоде;
- методы получения белого цвета свечения светодиода.

Уметь:

- измерять основные электрические, светотехнические и колориметрические характеристики светодиода;
- рассчитывать оптимальные тепловые режимы эксплуатации светодиода;
- рассчитывать светотехнические характеристики устройств на основе светодиодов.

Владеть:

- основами проектирования и анализа характеристик полупроводниковых светотехнических устройств.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Физические основы работы СД	5
1.1 Инжекция	5
1.2 Рекомбинация	7
1.3 Световывод	9
2. Основные характеристики СД	11
2.1 Электрические характеристики	11
2.2 Светотехнические характеристики	14
2.3 Колориметрические характеристики	18
3. Методы получения белого цвета свечения	22
3.1 RGB метод	22
3.2 Получение белого цвета свечения СД с помощью люминофоров	22
4. Методы измерения основных характеристик СД и устройств на их основе	26
4.1 Методы измерения электрических характеристик	26
4.2 Методы измерения световых характеристик	26
4.3 Методы измерения колориметрических характеристик	26
5. Методы испытаний СД и устройств на их основе	30
5.1 Испытания на климатические воздействия СД и устройств на их основе	30
5.2 Испытания на механические воздействия СД и устройств на их основе	32
5.3 Ресурсные испытания СД и устройств на их основе	33
Список литературы	37

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СД

1.1 Инжекция

Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока. Зонная структура является моделью для изучения свойств твёрдого тела. Твёрдое тело может быть металлом, диэлектриком или полупроводником в зависимости от ширины запрещённой зоны. В полупроводнике ширина запрещённой зоны, как правило, не превышает 3 эВ, а концентрация электронов или дырок в соответствующих зонах обычно не превышает 10^{20} см^{-3} .

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

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

Одной из проблем является формирование омического контакта к *p*-типу GaN. Существующие технологии формирования *p*-контакта позволяют

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

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

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

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

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

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

$$n_{ext} = (P / (hv)) / (I/e) = n_{int} \times n_{extract}, \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) светодиода:

$$n_{power} = P / (I \times U), \quad (2)$$

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

На сегодняшний день КПД кристалла СД составляет на промышленных образцах ~ 50%, а на лабораторных ~ 80%.

1.2 Рекомбинация

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

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

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

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

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

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

Повышение уровня легирования активной области повышает вероятность излучательной рекомбинации. Однако приближение уровня легирования к пределу растворимости примеси приводит к возникновению структурных дефектов, образующих безызлучательные центры рекомбинации. В связи с этим, оптимальный уровень легирования активной области подбирают экспериментально.

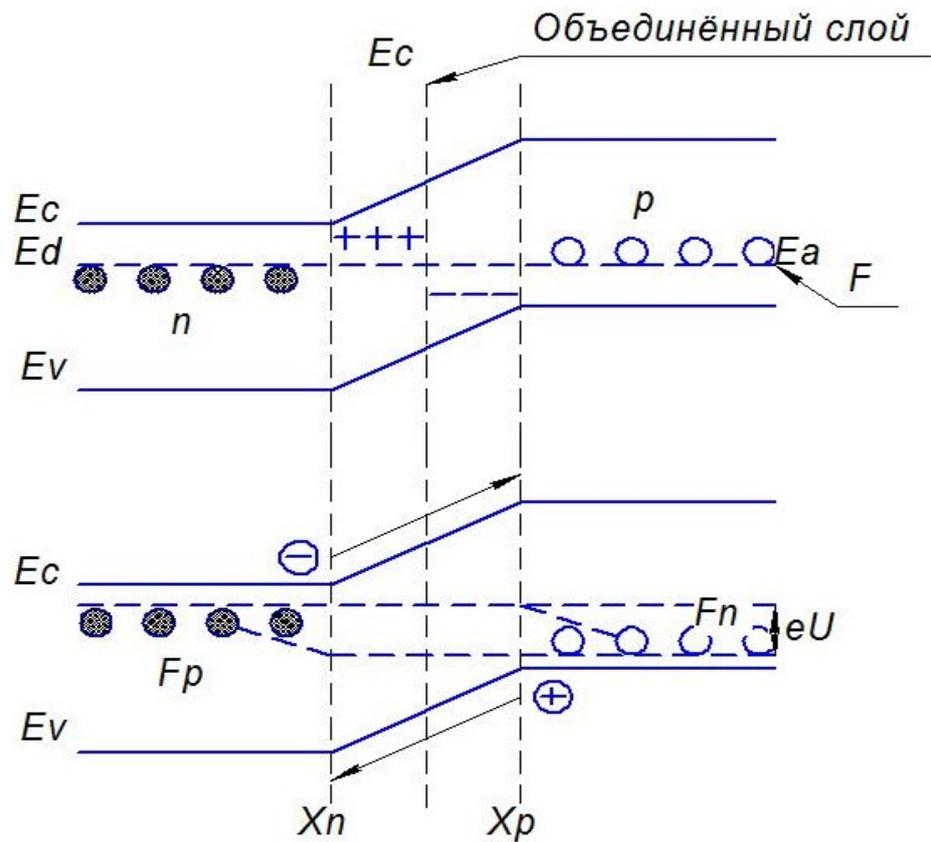


Рисунок 1. Схематическое изображение зонной диаграммы p - n перехода

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

$$n_{int} = (P_{int} / (h\nu)) / (I/e), \quad (3)$$

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

I – ток инжекции.

1.3 Световывод

Из кристалла СД может быть выведена лишь часть сгенерированного излучения. Коэффициент оптического вывода излучения, вышедшего за пределы кристалла СД (является характеристикой кристалла и просветляющего покрытия):

$$n_{extract} = (P / (h\nu)) / (P_{int} / (h\nu)), \quad (4)$$

где P – мощность оптического излучения вышедшего за пределы кристалла;

P_{int} – мощность оптического излучения сгенерированного в активной области кристалла.

При падении светового потока на поверхность какого-либо тела часть этого светового потока отражается (коэффициент отражения ρ), часть рассеивается (коэффициент рассеивания σ), часть поглощается (коэффициент поглощения α) и часть проходит насквозь (коэффициент пропускания τ). Как правило, коэффициент рассеивания и коэффициент поглощения объединяют в коэффициент поглощения

Соответственно:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (5)$$

$$\rho = (n - 1)^2 / (n + 1)^2 \quad (6)$$

где n – показатель преломления.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (7)$$

где I_0 – интенсивность падающего света;

I – интенсивность света, прошедшего через толщину x .

Основные потери при выводе излучения:

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

Часть сгенерированных фотонов поглощается материалом кристалла,

омическими контактами и подложкой полупроводника.

При распространении света из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 часть света отражается обратно от границы раздела. Эти потери света называются френелевскими.

Потери, связанные с критическим углом. Этот вид потерь, приводящих к значительному уменьшению эффективности, обусловлен полным внутренним отражением фотонов, падающих на поверхность кристалла под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины кристалла к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля:

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \Phi, \quad (8)$$

где φ, Φ – угол падения и угол преломления;

n_1, n_2 — показатели преломления первой среды и второй среды, соответственно.

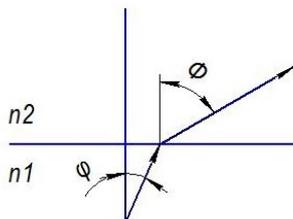


Рисунок 2. Влияние оптического покрытия на эффективность вывода излучения

Угол падения φ , при котором угол преломления Φ составляет 90° , называется критическим углом $\varphi_{кр}$:

$$\varphi_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1), \quad (9)$$

$$P_{внутр} / P_{внеш} = (1/2) \times (1 - \cos \varphi_{кр}), \quad (10)$$

где $P_{внутр}$ – мощность излучения генерируемая внутри полупроводника, $P_{внеш}$ – доля оптической мощности вышедшей из полупроводника.

$$P_{внеш} / P_{внутр} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2). \quad (11)$$

Так критический угол для GaN составляет 23,6 град., а доля вышедшего излучения в воздух 4,18%.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СД

2.1 Электрические характеристики

К электрическим характеристикам СД относятся прямое и обратное напряжения и прямой и обратный ток. СД работает при постоянном токе, все зависимости физических величин измеряются в зависимости от значения постоянного тока.

Известно, что повышенная температура активной области кристалла крайне негативно воздействует на СД. Снижает его срок службы, приводит к катастрофическим отказам, усиливает деградацию и изменяет основные параметры (напряжение, световой поток и спектр излучения) в процессе эксплуатации. Помимо температуры окружающей среды, активная область кристалла СД выделяет тепло. Если рассмотреть современный промышленный СД, то потребляемая мощность (к примеру, один Ватт) поступает на кристалл (КПД кристалла 50%), из неё 50% мощности излучается в виде фотонов, а 50% в виде фононов.

В кристалле основное тепловыделение происходит в активной области. Кроме того, известно существование эффекта стягивания тока, вследствие которого основной нагрев происходит под омическими контактами. Причём, чем выше ток, тем больше нагрев под контактами. Исходя из этого, для надёжной эксплуатации СД необходимо выбирать режимы эксплуатации. Для снижения влияния эффекта стягивания тока производители применяют достаточно сложную топологию омических контактов (рис. 3).

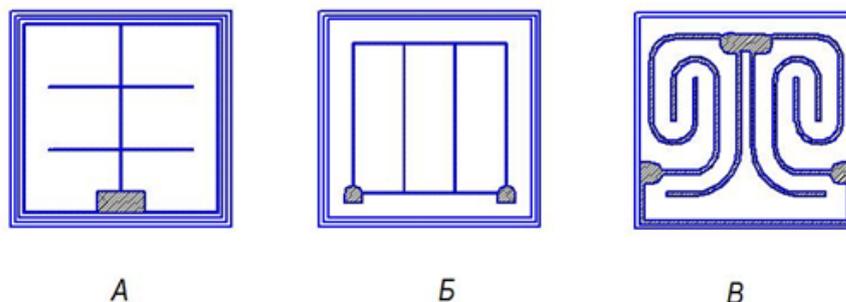


Рисунок 3. Типы топологии омических контактов кристаллов:

А – SemiLEDs, Б – Cree, Г – Epistar

Для СД основе двойных гетероструктур GaN/InGaN зависимость прямого напряжения от температуры светодиода

$$dU / dT = - (1,76 - 2,3) \text{ мкВ/К}, \quad (12)$$

Температурная зависимость ширины запрещённой зоны описывается по формуле:

$$E = E|_{T=0\text{ К}} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (12)$$

где α и β – эмпирически подобранные коэффициенты: $\alpha = 7,7 \times 10^{-4}$ эВ, $\beta = 600$ К. $E|_{T=0\text{ К}}$ – ширина запрещённой зоны при 0 К, 3,47 эВ.

Графически зависимость максимума длины волны излучения кристалла СД от температуры можно представить в линейном виде (рис. 4).

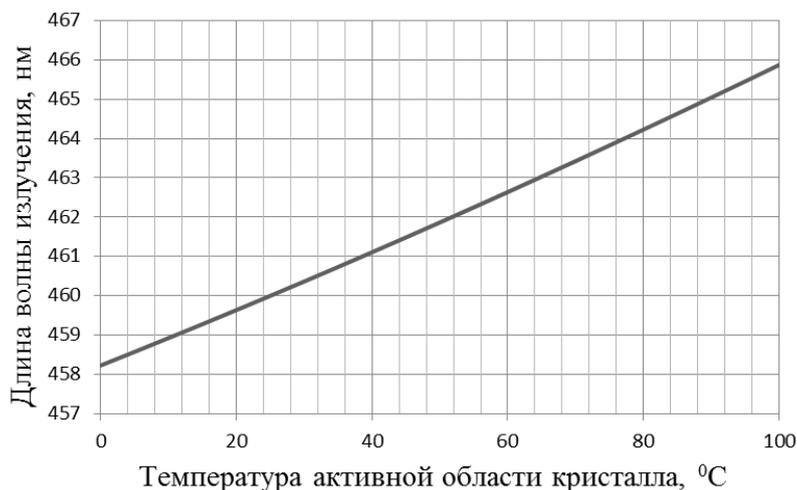


Рисунок 4. Зависимость длины волны излучения кристалла от температуры

Как видно из рис. 4, изменение максимума интенсивности излучения кристалла СД в оптическом спектре в диапазоне длин волн в зависимости от температуры активной области кристалла в диапазоне от 0⁰С до 100⁰С может достигать 10 нм. Изменение длины волны излучения кристалла СД приведёт к изменению цветовых координат белого свечения СД. Также может существенно снизить световую отдачу СД в связи с появлением рассогласованности спектра излучения кристалла и спектра возбуждения люминофора.

Зависимость мощности излучения СД от температуры

$$P = P|_{300\text{ К}} \exp\frac{T-300\text{ К}}{T_i}, \quad (13)$$

T_i – характеристическая температура конкретного светодиода.

Графически зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры можно представить в линейном виде (рис. 5).

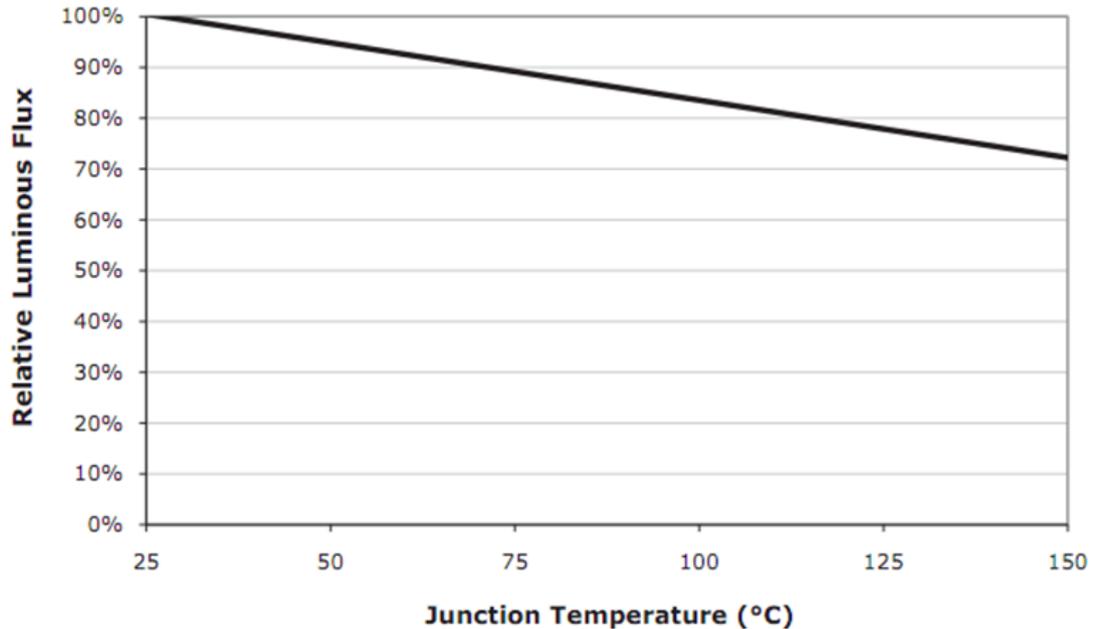


Рисунок 5. Зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры активной области

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

$$R_t = \delta / (\lambda \times S), \quad (14)$$

где, δ – толщина слоя (м);

S – площадь слоя (м^2);

λ – теплопроводность вещества.

Данная формула является вполне приемлемой для проведения расчётов и моделирования.

Для практических измерений используют формулу:

$$P_e = (T_1 - T_2)/R_b \quad (15)$$

где P_e – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;

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

Для измерения теплового сопротивления полупроводника существуют четыре метода. Для измерения теплового сопротивления СД применяют два метода. Первый заключается в подаче на СД импульсного греющего тока, а затем по изменению напряжения при малом токе вычисляют температурный коэффициент напряжения, определяют тепловое сопротивление. Второй метод заключается в нагреве СД с помощью внешнего источника и определении его температуры активной области.

Тепловое сопротивление современных промышленных образцов СД достигает 6 К/Вт. Конструкция СД для поверхностного монтажа позволяет существенно снизить тепловое сопротивление при монтаже СД на печатную плату. Но наиболее важную роль играет в снижении теплового сопротивления материал подложки кристалла.

2.2 Светотехнические характеристики

В таблице 1 приведены характеристики, значения которых характеризуют СД.

Таблица 1. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	Φ_e	Вт	W	N_{ph}/s (кол-во фотонов в секунду)

Энергия излучения	Q_e	Дж	J	N_{ph} (кол-во фотонов)
Энергетическая сила излучения (сила излучения)	I_e	Вт/ср	W/sr	$N_{ph}/sr \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле 1ср в секунду)
Поверхностная плотность потока излучения	M_e	Вт/м ²	W/m^2	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов излучаемых с 1м ² в секунду)
Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	Вт/м ²	W/m^2	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов на 1м ² в секунду)
Энергетическая яркость	L_e	Вт/ср*м ²	$W/sr \cdot m^2$	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле в 1ср на 1м ² в секунду)

Мощность излучения или *поток излучения* это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через известную площадь

$$\Phi_e (P_e) = dQ_e/dt \quad (16)$$

где Φ_e – поток излучения (Вт), P_e – мощность излучения (Вт);

Q_e – энергия излучения (Дж);

t – время (с).

Сила излучения – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется.

$$I_e = \Phi_e/\Omega \quad (17)$$

где I_e – сила излучения (Вт/ср);

Φ_e – поток излучения (Вт);

Ω - телесный угол (ср).

Телесный угол расположен в конусе с вершиной в центре сферы (место расположения источника излучения) и равен отношению площади, вырезанной в сфере этим конусом к квадрату радиуса сферы, измеряется в стерadiansах.

$$\Omega = S/r^2 \quad (18)$$

где Ω – телесный угол (ср),

S – площадь основания конуса ограниченного сферой в которой распространяется излучение,

r – радиус сферы в которой распространяется излучение.

Поверхностная плотность потока излучения – поток излучения, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла.

Если площадка освещается потоком, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической освещенности или облученности:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (19)$$

где E_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – единица площади (м²).

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (20)$$

где M_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²).

Энергетическая яркость – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении:

$$L_e = d^2\Phi_e/d\Omega dS \cos\theta \quad (21)$$

где L_e – энергетическая яркость (Вт/ср·м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²);

θ – угол между направлением излучения и нормалью к площадке.

Свет – электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом (380 – 780) нм.

Переход от энергетических величин к световым осуществляется по

формуле (22):

$$\Phi(\text{Лм}) = 683(\text{Лм/Вт}) \times K \times P(\text{Вт}) \quad (22)$$

где, K – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения

Таблица 2. Фотопическая функция человеческого глаза

λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K
380	0,00004	480	0,139	580	0,870	690	0,0082
390	0,00012	490	0,208	590	0,757	700	0,0041
400	0,00040	500	0,323	600	0,631	710	0,0021
410	0,0012	510	0,503	610	0,503	720	0,00105
420	0,0040	520	0,710	620	0,381	730	0,00052
430	0,0116	530	0,862	630	0,265	740	0,00025
440	0,023	540	0,954	640	0,175	750	0,00012
450	0,038	550	0,995	650	0,107	760	0,00006
460	0,060	555	1,0000	660	0,061	770	0,00003
470	0,091	560	0,995	670	0,032		
		570	0,952	680	0,017		

Световые величины являются аналогами энергетических с учётом фотопической функции человеческого глаза.

Таблица 3. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	Φ_v	лм	lm
Световая энергия	Q_v	лм*с	$lm*s$
Сила света	I_v	лм/ср =кд	$lm/sr=cd$
Поверхностная плотность светового потока	M_v	лм/м ²	lm/m^2
Освещенность	E_v	лк	$lm/m^2 = lx$
Яркость	L_v	лм/ср*м ² = кд/м ² = нит	$lm/sr*m^2 = cd/m^2$ = nit

2.3 Колориметрические характеристики

Способность источника излучения передавать все цвета освещаемого объекта определяется его индексом цветопередачи (*CRI*). Цветовая температура – это такая температура черного тела, при которой его энергетическая светимость равна энергетической светимости данного источника.

Оценка способности тестируемого источника излучения к передаче цветов производится его сравнением с эталонным источником света.

Эталонный источник выбирают из следующих соображений:

- если координаты цветности тестируемого источника лежат на кривой Планка [1], то эталонный источник должен быть абсолютно чёрным телом*, имеющим ту же цветовую температуру, что и тестируемый источник;

- если координаты цветности тестируемого источника не принадлежат кривой Планка, то эталонный источник должен быть абсолютно чёрным телом, имеющим ту же коррелированную цветовую температуру, что и тестируемый источник. [МКО CIE 1995]

В качестве эталонного можно использовать один из стандартных источников МКО (например D65).

В идеальном случае – тестируемый и эталонный источники света имеют одинаковые координаты цветности и световые потоки. $CRI = 100$ для эталонного источника.

$$CRI_{general} = 1/8 \sum_{i=1}^8 CRI_i, \quad (23)$$

CRI_i – частный индекс цветопередачи для 8-и эталонных поверхностей, который определяется по формуле:

$$CRI_i = 100 - 4.6 \Delta E_i^*, \quad (24)$$

где E_i^* - разность цветов эталонной поверхности при её последовательном освещении эталонным и тестовым источниками излучения. $i = 1 - 8$.

14 эталонных поверхностей. Цветовая система Манселла.

Иногда используют дополнительные эталонные поверхности (9 - 14).

CRI9 – CRI14 – частные индексы цветопередачи.

Таблица 4. Значение суммарных индексов цветопередачи наиболее распространённых источников света.

Источник света	Индекс цветопередачи	
	Солнечный свет	100
Кварцевые галогенные лампы с вольфрамовой нитью накаливания	100	Б
Лампы с вольфрамовой нитью накаливания	100	Б
Флуоресцентные лампы	60–95	Б
Трёхцветные светодиоды белого свечения	60–95	Б, В
СД белого свечения на основе люминофоров	55–85	Б, В
Двухцветные светодиоды белого свечения	10–60	Б, В
Ртутные лампы, покрытые люминофором	50	Б
Ртутные лампы	33	Б
Натриевые лампы высокого и низкого давления	10 и 22	Б
Зелёный монохроматический свет	–50	В

Примечание. Эталонные источники: А – солнечный свет; Б – свет лампы накаливания с коррелированной цветовой температурой; В – источник D₆₅; использованы некоторые данные из работы (Kendall, Scholand, 2001).

Вычисление индекса цветопередачи для излучателей, расположенных на кривой Планка.

Приведённые ниже расчёты позволяют найти значение ΔE_i^* , которое в соответствии с уравнением (2) необходимо для определения индекса цветопередачи тестируемого источника. Такие расчёты справедливы для испытуемых излучателей, расположенных либо непосредственно на кривой Планка, либо на очень небольшом расстоянии от неё.

$$\Delta E_i^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (25)$$

где

$$\Delta L^* = L^*_{ref} - L^*_{test} = 116 \frac{Y_{ref,i}}{Y_{ref}}^{\frac{1}{3}} - 16 - [116 \frac{Y_{test,i}}{Y_{ref}}^{\frac{1}{3}} - 16], \quad (26)$$

$$\Delta u^* = u^*_{ref} - u^*_{test} = 13L^*(u_{ref,i} - u_{ref}) - 13L^*(u_{test,i} - u_{ref}), \quad (27)$$

$$\Delta v^* = v^*_{ref} - v^*_{test} = 13L^*(v_{ref,i} - v_{ref}) - 13L^*(v_{test,i} - v_{ref}), \quad (28)$$

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z}, \quad (29)$$

$$v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}, \quad (30)$$

Отметим, что u и v вычисляются по параметрам спектра эталонного источника (индекс *ref*), по спектру излучения тестируемого источника, отражённого от эталонной поверхности (индекс *test, i*). В приведенных выше формулах учитывается способность тестируемого источника передавать не только цветность физических объектов (Δu^* , Δv^*) но и яркость этих объектов (ΔL^*).

По приведённым ниже формулам, рассчитываю координаты цветности:

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (31)$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (32)$$

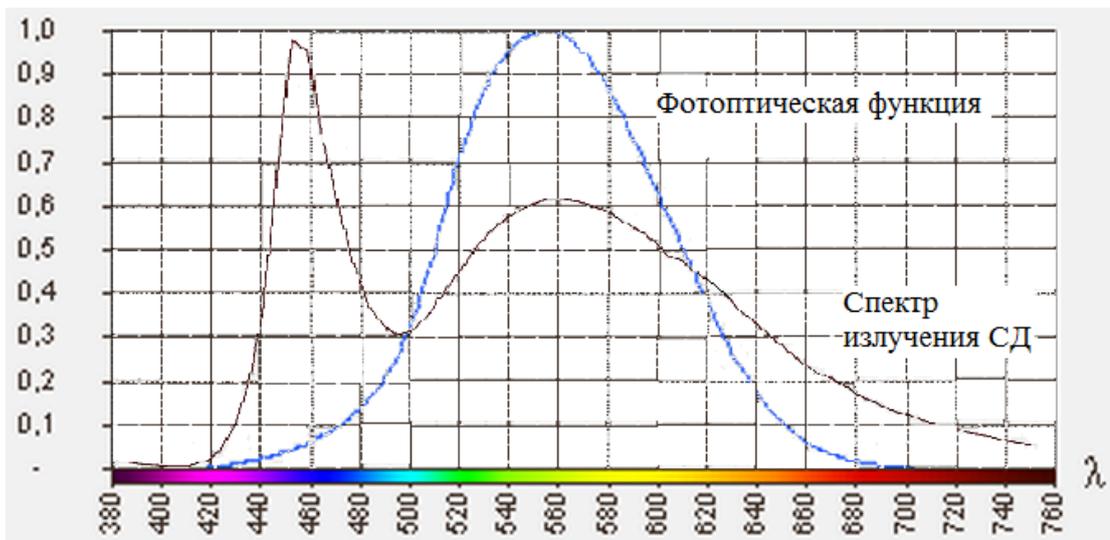
$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (33)$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (34)$$

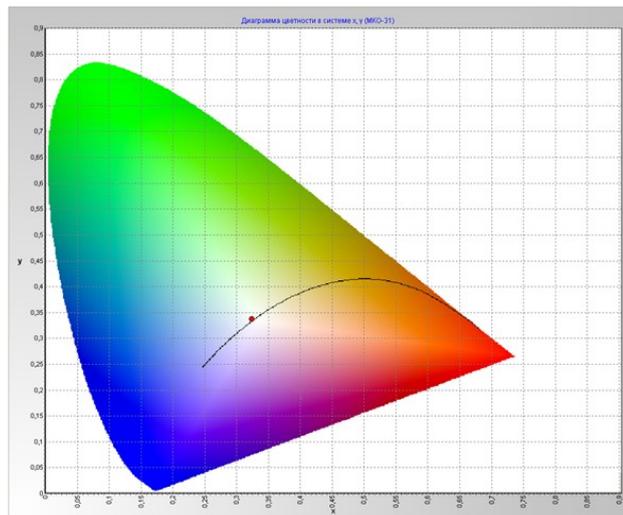
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (35)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y, \quad (36)$$

$x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ – функции согласования цвета.



А



Б

Рисунок 6. А – Относительная чувствительность глаза и спектр излучения типового белого светодиода, Б – диаграмма цветности в системе x, y (МКО-31)

3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ

3.1 RGB метод

Известно, что для того чтобы человек воспринимал электромагнитное излучение оптического спектра как белый цвет, необходимо задействовать два рецептора человеческого глаза. Т.е., достаточно смешать излучение синего цвета с жёлтым. На практике важен не только факт получения белого цвета, но и качество этого цвета. Качественными характеристиками источников белого цвета являются индекс цветопередачи, цветовая температура и координаты цветности.

В одном корпусе размещаются красные (620 нм), синие (460 нм) и зеленые (525 нм) кристаллы светодиода, излучение которых. В результате получается белый свет.

RGB-матрицы широко используются в светодинамических системах. Кроме того, большое количество светодиодов в матрице обеспечивает высокий суммарный световой поток и большую осевую силу света. Но световое пятно из-за aberrаций оптической системы имеет неодинаковый цвет в центре и по краям, а также в связи с неравномерным отводом тепла нагреваются по-разному и по-разному изменяется их цвет в процессе эксплуатации – суммарные цветовая температура и цветовые координаты смещаются.

3.2 Получение белого цвета свечения СД с помощью люминофоров

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



Рисунок 7. Процесс формирования излучения СД с кристаллом синего свечения и люминофором

Световая отдача светодиода является основной характеристикой эффективности светодиода – это отношение излучаемого светового потока к затраченной электрической мощности:

$$\eta = \Phi_v / (I \times U), \quad (37)$$

где, Φ_v – световой поток излучённый светодиодом.

$$\Phi_v = 683 \times P \times k(\lambda), \quad (38)$$

где, P – оптическая мощность излучения,

$k(\lambda)$ – коэффициент чувствительности человеческого глаза к оптическому излучению с длиной волны λ . Связь световой отдачи СД и люминофора выражается по формуле:

$$[(x_w - x_b)^2 + (y_w - y_b)^2]^{1/2} n_b = [(x_w - x_e)^2 + (y_w - y_e)^2]^{1/2} n_e, \quad (39)$$

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

x_w и y_w – цветовые координаты белого цвета,

x_b и y_b – цветовые координаты синего излучения,

x_e и y_e – цветовые координаты излучения люминофора.

Из формулы 11 видно, что на графике цветов МКО можно провести прямую, соединяющую цветовые координаты излучения кристалла СД и цветовые координаты люминофора, затем, варьируя интенсивность излучения кристалла или концентрацию люминофора, определить цветовые координаты белого цвета СД. Также можно оценить зависимость световой отдачи СД белого свечения от концентрации люминофора или интенсивности излучения кристалла. График цветов МКО и формула показывают, что наиболее

эффективным для изготовления СД с кристаллом синего свечения является использование люминофоров с максимумом излучения в жёлто-зелёной области оптического спектра. Люминофоры, излучающие в жёлто-зелёной области оптического спектра и возбуждающиеся от воздействия излучением в синей области оптического спектра, имеют кристаллическую решётку типа гранат, в узлах которой находятся атомы иттрия, алюминия и гадолиния.

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов $(Y_{1-a}Gd_a)Al_5O_{12} \times Ce^{3+}$ (*YGG*). Кристаллическая решетка YAl_5O_{12} активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. *YGG* (*YAG*) имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Два основных механизма работы люминофора:

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

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

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

Как правило, квантовый выход из композиции люминофора и связующего компонента, в котором он растворён, выше в твёрдых растворах,

чем в жидких, так как с повышением вязкости уменьшается вероятность безызлучательных процессов возбуждения через внутреннюю конверсию. Но в твёрдых растворах возможен эффект поляризации так как частицы люминофора «зажаты» между упорядоченными молекулами растворителя.

Для люминофора характерно температурное тушение и концентрационное.

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

4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СД И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

4.1 Методы измерения электрических характеристик

Методика основана на, где погрешность измерений не должна выходить за пределы $\pm 5\%$ с доверительной вероятностью $P^*=0,99$.

На поверенном оборудовании проводятся измерения. В качестве оборудования используется источник питания со стабилизацией по току, амперметр, который включается последовательно в цепь с измеряемым СД, и вольтметр, который включается в цепь параллельно СД. При измерениях прямого тока и напряжения их значения должны иметь следующие порядки: для прямого тока измерения от 1 мА до 1000 мА, для напряжения от 1,000 В до 5,000 В. Измерения проводятся в условиях, соответствующих требованиям.

Для обеспечения контактов светодиода и источника питания используются специальные держатели, т.к. корпус для поверхностного монтажа не имеет штыревых выводов и паять его в процессе неразрушающих исследований нельзя.

В случае, если на СД подаётся высокий прямой постоянный ток, используют держатели, обеспечивающие отвод тепла, или измерение напряжения проводят в импульсном режиме. В случае измерения значения напряжения СД при малых тока, где не требуется специальный отвод тепла, СД выдерживают при электрической нагрузке в течение пяти минут и лишь, затем записывают показание вольтметра.

4.2 Методы измерения световых характеристик

На рис. 8 приведена функциональная схема установки измерения силы света, состоящей из скорректированного фотоприёмного устройства, персонального компьютера (ПК) и угломера – гониометра с установленным на него СД.

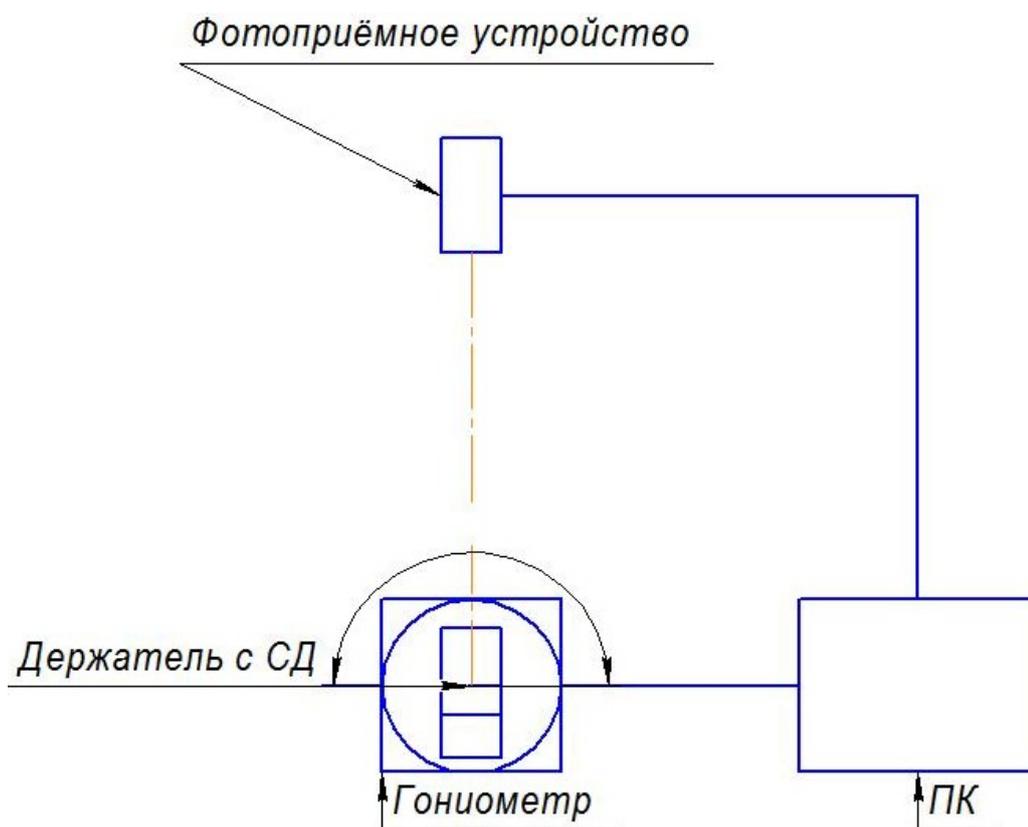


Рисунок 8. Функциональная схема установки для измерения зависимости значения силы света светодиода от угла излучения

Методика основана на, где принцип измерений основан на измерении светового потока, излучаемого СД в направлении его геометрической оси, фотоприёмным устройством, скорригированным под кривую относительной спектральной световой эффективности для дневного зрения по. Измерения проводят в условиях в соответствии с при окружающей температуре $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Держатель с СД устанавливают на гониометр (угломер), выравнивая по геометрической оси к фотоприёмному устройству, на СД подают питание и записывают данные с фотоприёмного устройства. Поворачивая держатель с СД в гониометре определяют кривую распределения силы света, находят максимум силы света на кривой и угол излучения по уровню 0,5 от максимума силы света. Обработывают данные и записывают в виде таблицы или графика. Сила света измеряется в канделах (кд), угол излучения в градусах. Аналогично, как и при измерении значения прямого напряжения,

СД либо выдерживают при электрической нагрузке в течение пяти минут, либо используют специальные теплоотводящие держатели.

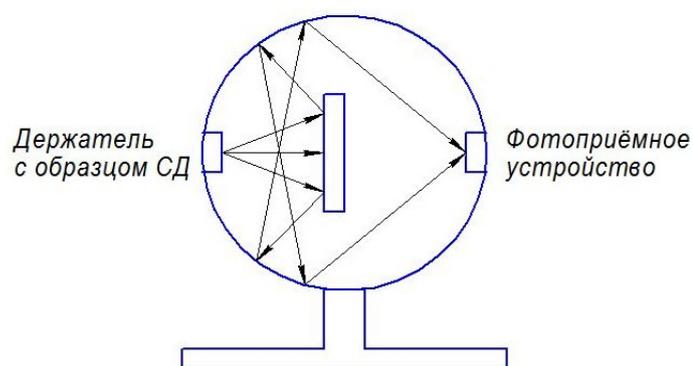


Рисунок 10. Схема фотометрического шара

Световой поток измеряют в фотометрическом шаре. В шар на край сферы помещают держатель с СД. С противоположной стороны установлен корригированный фотоприёмник, а между ними рассеивающий экран. Внутри сфера покрашена белой рассеивающей краской. На СД подают электропитание и записывают показания фотоприёмника, затем данные обрабатывают. Световой поток измеряется в люменах (лм), его можно рассчитать, зная значения силы света на кривой силы света.

4.3 Методы измерения колориметрических характеристик

В соответствии с проводится измерение спектра излучения СД.

Современное оборудование – спектроколориметр, состоит из фокусной линзы, через которую вводится излучение в прибор, дифракционной решётки и линейки фотодиодов, откалиброванных на разные длины волн. Как правило, семь фотодиодов откалиброваны на семь основных цветов. Из спектральной характеристики СД рассчитывают цветовые координаты и цветовую температуру в соответствии с требованиями Международной комиссии по освещению. Так же можно определить и индекс цветопередачи. Для определения индекса цветопередачи используют спектральные характеристики эталонных поверхностей и спектральную характеристику

идеального (эталонного) источника света.

5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СД И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

5.1 Испытания на климатические воздействия СД и устройств на их основе

По степени защиты от воздействия окружающей среды ГОСТ 14254

Таблица 5. Элементы кода IP и их обозначения:

Элемент	Обозначение	Значение для защиты оборудования	Значение для защиты людей
Первая характеристическая цифра		От проникновения внешних твердых предметов:	От доступа к опасным частям:
	0	нет защиты	нет защиты
	1	диаметром ≥ 50 мм	тыльной стороной руки
	2	диаметром $\geq 12,5$ мм	пальцем
	3	диаметром $\geq 2,5$ мм	инструментом
	4	диаметром ≥ 1 мм	проволокой
	5	пылезащищенное	проволокой
Вторая характеристическая цифра	6	пыленепроницаемое	проволокой
		От вредного воздействия в результате проникновения воды:	-
	0	нет защиты	-
	1	вертикальное каплепадение	-
	2	каплепадение (номинальный угол 15°)	-
	3	дождевание	-
	4	сплошное обрызгивание	-
	5	действие струи	-
	6	сильное действие струй	-
	7	временное непродолжительное погружение	-
	8	длительное погружение	-

Распространенные примеры кода IP:

IP21 - Защита от прикосновения рукой (пальцем) со способностью выдерживать вертикальные брызги воды (технически это обычный распределительный шкаф, например навесного исполнения); IP44 - Защита от прикосновения инструментом/провоолокой более 1мм со способностью выдерживать брызги воды со всех направлений (технически это можно представить как уличный выключатель); IP65 - полная защита от попадания пыли со стойкостью к направленному воздействию струей воды (Фара автомобиля, уличный бокс для узла учета).

По климатическому исполнению и категории размещения ГОСТ 15150:
Светильники, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озёрах:

Для макроклиматического района с умеренным климатом (У), (0)

Для макроклиматического района с умеренным и холодным климатом (УХЛ) (1).

Для макроклиматического района с влажным тропическим климатом (ТВ), (2).

Для макроклиматического района с сухим и тропическим климатом (ТС), (3).

Для макроклиматического районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом (Т), (4).

Для макроклиматического района как с умеренным, так и с тропическим климатом (УТ), (0).

Для всех макроклиматического района на суше, кроме климатического района с антарктическим холодным климатом (общее климатическое исполнение) (О), (5).

В зависимости от места размещения:

Для эксплуатации на открытом воздухе (1).

Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе (отсутствие прямого воздействия солнечных лучей и

атмосферных осадков)(2).

Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственного регулируемых климатических условий, где воздействие колебаний температуры и влажности воздуха и воздействия песка, пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе (отсутствие воздействия атмосферных осадков, прямого солнечного излучения, существенное уменьшение ветра, существенное уменьшение или отсутствие рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги) (3).

Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями (4).

Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (5).

Значения температуры окружающего воздуха:

У, ТУ, 1, 1.1, 2, 2.1, 3: +40, -45 – рабочее значение, +45, -50 – предельное значение;

ХЛ 1, 1.1, 2, 2.1, 3: +40, -60 – рабочее значение, +45, -70 – предельное значение;

УХЛ 1, 1.1, 2, 2.1, 3: +40, -60 – рабочее значение, +45, -70 – предельное значение;

УХЛ 4: +35, +1 – рабочее значение, +40, +1 – предельное значение;

УХЛ 4: +25, +10 – рабочее значение, +40, +1 – предельное значение; (для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях).

5.2 Испытания на механические воздействия СД и устройств на их основе

Испытание на вибропрочность проводят методом 103-1.6 ГОСТ 20.57.406. Установку и крепление светодиодов при испытаниях на вибропрочность производят с помощью кассеты. Кассета со светодиодами жестко крепится на платформе вибрационного стенда. Допускается для проведения испытания светодиоды распаивать на печатную плату, которая

затем жестко крепится к стенду.

Направления воздействия ускорения – перпендикулярно основанию светодиода. Контрольная точка для проверки режима испытаний – в центре платформы стенда или на приспособлении, установленном на стенде.

Испытания проводят без электрической нагрузки.

Параметры воздействия:

- степень жесткости – XI;
- частота вибрации – 2 000 Гц;
- амплитуда ускорения – 20 g;
- продолжительность воздействия – 3 ч 18 мин.

После окончания воздействия проводят визуальный осмотр светодиодов. Светодиоды включают и производят проверку светимости и контроль постоянного прямого напряжения Упр.

Испытание на воздействие ударов одиночного действия проводят методом 106-1 ГОСТ 20.57.406.

Параметры воздействия:

- пиковое ударное ускорение – 1 500 (150) м/с² (g);
- длительность действия ударного ускорения – (0,10±0,05) мс;
- форма импульса ударного ускорения – полусинусоидальная.

Направления воздействия ускорения – перпендикулярно основанию светодиода.

После окончания воздействия проводят визуальный осмотр светодиодов. Светодиоды включают и производят проверку светимости и контроль постоянного прямого напряжения Упр.

5.3 Ресурсные испытания СД и устройств на их основе

Важной отличительной особенностью СД от других источников света является его срок службы, производители гарантируют 80 тыс. часов и более. Зарубежные производители СД фирмы Cree, Philips Lumileds, Nichia, Osram применяют для определения срока службы светодиодов стандарт LM-80. В

процессе испытания партии СД строят зависимость светового потока от времени испытаний.

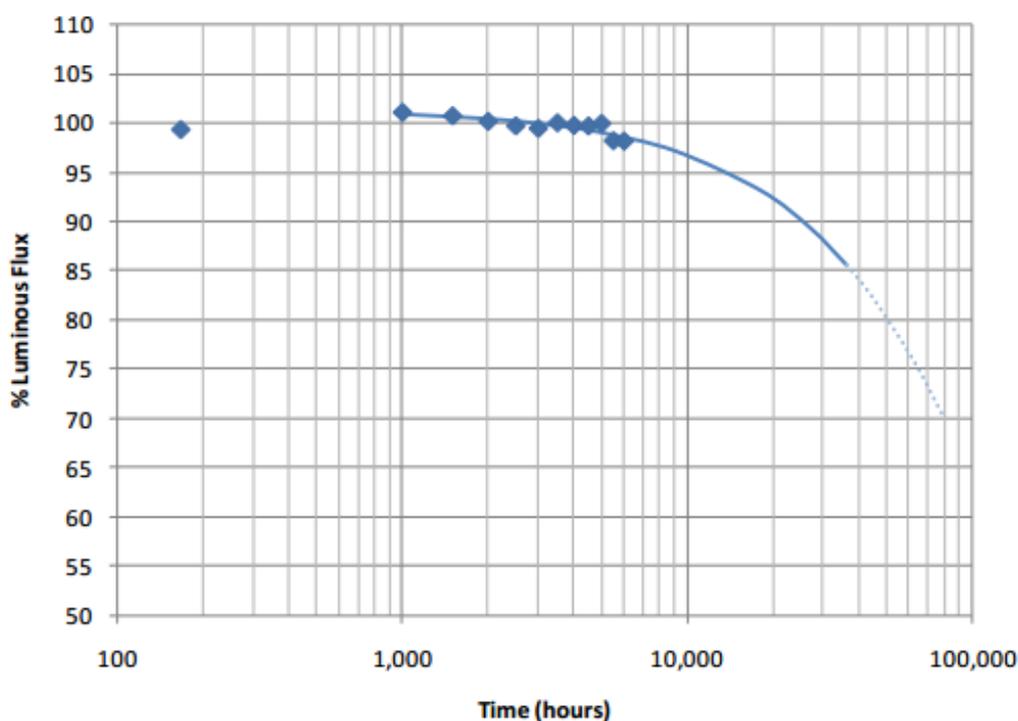


Рисунок 10. Прогнозируемый срок службы СД и результаты испытаний

На срок службы СД влияет ряд факторов, как эксплуатационных, так и технологических. К эксплуатационным факторам можно отнести режимы эксплуатации светодиода: электрические, климатические и воздействие на СД специальных факторов и сред. К технологическим относятся: технология выращивания эпитаксиальной структуры, материал подложки, методы и материалы омических контактов, метод монтажа кристалла в корпус (посадки на клей или пайка), метод монтажа электрических соединений (воздействием давления и температурой или ультразвуком), метод герметизации СД. При этом наиболее уязвимым технологическим фактором является технология монтажа электрических соединений.

В процессе эксплуатации СД при высоких температурах (100°C) наблюдаются три основных зависимости квантового выхода СД от времени эксплуатации: снижение квантового выхода после 1000 часов; повышение

квантового выхода в первые 100 – 1000 часов эксплуатации, а затем его снижение; резкое снижение квантового выхода при времени эксплуатации менее 1000 часов. Наиболее распространён вариант с первой зависимостью квантового выхода СД от времени эксплуатации.

В отечественной промышленности для определения срока службы полупроводниковых приборов используют стандарт ОСТ11-336.938-83, данный стандарт описывает методику проведения ускоренных испытаний, методику выбора режимов и методику определения энергии активации отказов. Согласно методике, ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов деградации СД без изменения основных механизмов отказов.

Коэффициент ускорения определяется энергией активации отказов (E_a).

$$K_y = \exp(E_a / k) \times (1 / (Q_{pn} + 273) - (1 / (Q_{pny} + 273)), \quad (40)$$

где K_y – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

E_a – энергия активации отказов, эВ; k – постоянная Больцмана;

Q_{pn} – температура р-п перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С;

Q_{pny} – температура р-п перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

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

$$t_{ном} = t_y \times K_y \quad (41)$$

где t_y – время испытаний в ускоренном режиме. Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 часов.

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 июля 2011 г. N 602 г. Москва «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения» светодиодные источники света должны обеспечивать продолжительность горения не менее 25000 часов.

Энергия активации отказов E_a определяется методом ступенчатых испытаний в соответствии с ОСТ. Результаты обрабатываются по формуле графическим или аналитическим методом:

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times ((\ln t_a - \ln t_b) / ((10^3 / T_a) - (10^3 / T_b)), \quad (42)$$

где $\ln t_a$ и $\ln t_b$ логарифм времени наработки до отказа в точке (a) и в точке (b), T_a и T_b температура р-п перехода в момент отказа СД в точке (a) и в точке (b) на графике линейной регрессии.

Для прогнозирования срока службы СД необходимо провести целый комплекс испытаний. Определить его энергию активации отказов, область допустимого форсирования и провести ускоренные испытания на определение срока службы.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

переменного тока в целях освещения».

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

21. ГОСТ 19834.3-76. Излучатели полупроводниковые. Метод

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

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

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

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

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

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

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