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

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Томск 2015

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
«31» августа 2015 г.

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки
211000.62 – 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 2015

Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Туев В.И. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2015. – 45 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 «Полупроводниковая светотехника» и содержит необходимую информацию для изучения дисциплины. В результате изучения материалов данного учебного пособия студенты должны расширить свои знания по изучаемой дисциплине.

Учебное пособие направлено на формирования у студентов следующих компетенций:

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

ОК-8 – способностью осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.

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

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

-основные физические явления, определяющие работоспособность и эффективность светодиодов;

-особенности физических процессов в полупроводниковых светодиодах, являющихся элементами светотехнических устройств.

Уметь:

-проводить оценки основных параметров, характеризующих физические процессы в светодиодах;

-рассчитывать статические и динамические характеристики полупроводниковых светодиодов на предмет их применения в осветительных устройствах различного назначения;

-пользоваться монографической, а также периодической научно-технической литературой по физике полупроводников и полупроводниковым приборам, по полупроводниковой светотехнике.

Владеть:

- основами проектирования и анализа характеристик полупроводниковых светотехнических устройств.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
1 Процесс генерации излучения в светодиоде 6
2 Процесс вывода излучения из светодиода 10
3 Метод получения белого цвета свечения светодиода 12
4 Люминофор для светодиода 15
5 Методы герметизации светодиода 16
6 Влияние температуры на характеристики светодиода 18
7 Современные светодиодные кристаллы 22
8 Срок службы светодиода 25
9 Стойкость светодиодов к воздействию быстрыми нейтронами 27
10 Методы измерения параметров светодиода 29
11. Разновидности светильников 36
12 Требования к светодиодным лампам 41
Список цитируемой литературы 43

Введение

За последнее время произошло мощное развитие светодиодных технологий. Внутренний квантовый выход светодиодов (СД) близок к 100%, внешний квантовый выход 50%, а световая отдача 140 лм/Вт. Такие параметры СД в конце XX века позволяют применять СД в осветительных приборах. На сегодняшний день лабораторные образцы светодиодов имеют световую отдачу 250 лм/Вт, внешний квантовый выход порядка 80%.

СД получили широкое применение в светотехнике, как для уличного освещения, так и для офисного, светодиодную лампочку можно купить в магазине.

Таблица 1. Светоотдача источников света

Источник света	Световая отдача лм/Вт
Натриевые лампы низкого давления	200
Натриевые лампы высокого давления	130
Металло-галоидные лампы	110
Флуоресцентные лампы	90
Ртутные лампы высокого давления	60
Галогенные лампы	30
Лампы накаливания	15

Таблица 2. Стоимость одного люмена (для СД со световым потоком ~200 лм)

Производитель	Примерная стоимость одного люмена, Руб./лм
Nichia	0.81
Philips Lumileds	0.7
Osram Opto	0.7
Seoul Semiconductor	0.84
Cree Lighting	1
LedEngin	0.7

Таблица 3. Основные производители СД

Производитель	Страна
Nichia	Япония
Cree Lighting	США
Seoul Semiconductor	Южная Корея
Sharp	Япония
Osram Opto	Германия
Edison	Тайвань

Фирма Cree Lighting на форуме в г. Москве в апреле 2012 года представила стратегию повышения эффективности своей продукции (СД).

Таблица 4.Стратегия повышения светоотдачи СД Cree Lighting

Год	Светоотдача, лм/Вт
2014	231
2013	208
2012	186

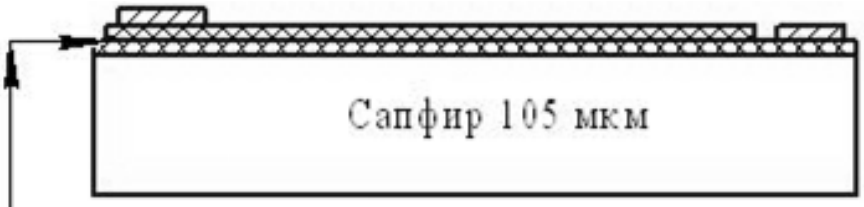
Светодиодные технологии очень быстро развиваются, появляются новые достижения и всё больше СД светотехнических устройств появляется на рынке.

1. Процесс генерации излучения в светодиоде

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).



Наименование слоя	Толщина слоя
p - тип GaN	0,2 мкм
p - тип AlGaN	0,03 мкм
Активная область InGaN/GaN	0,2 мкм
n - тип GaN	2,5 мкм
u - тип GaN	2 мкм

Рисунок 1 Гетероструктура GaN/InGaN

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

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 *ITO* (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):

$$n_{ext} = (P / (h\nu)) / (I/e) = n_{int} \times n_{extract}, \qquad (1)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) светодиода:

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

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%.

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.

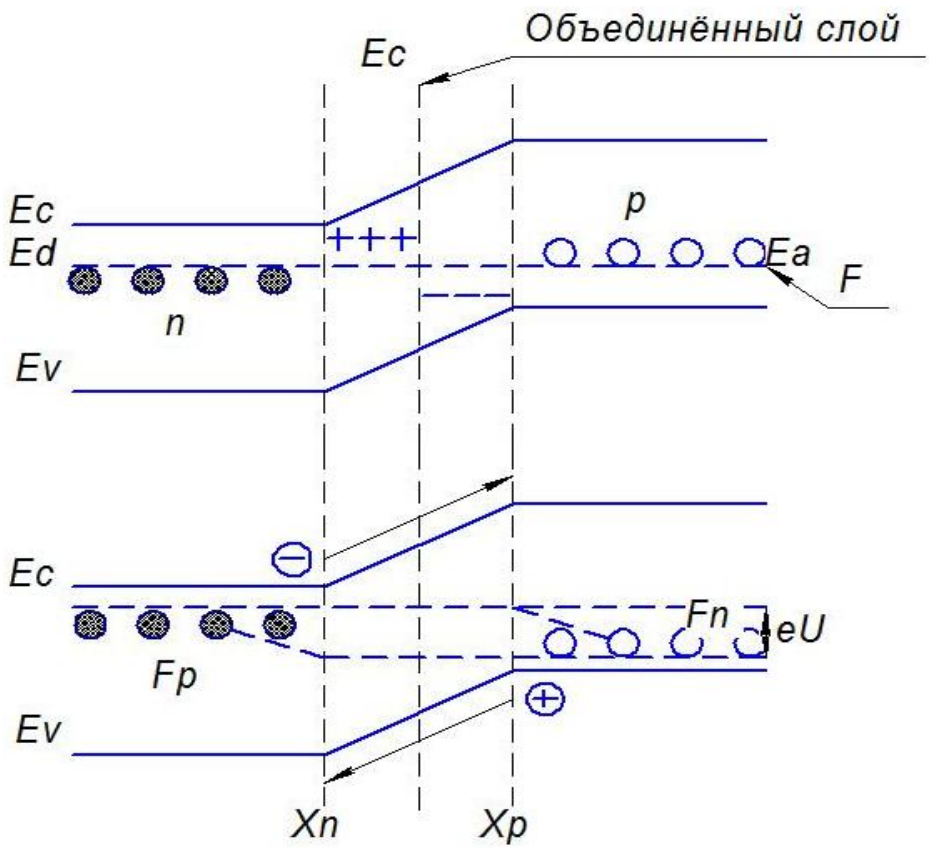


Рисунок 2. Схематическое изображение зонной диаграммы *p-n* перехода

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

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

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

I – ток инжекции.

2 Процесс вывода излучения из светодиода

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):

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

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 и коэффициент поглощения

Соответственно:

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

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

где n – показатель преломления.

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

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 па поверхность кристалла под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины

кристалла к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля:

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

где φ, Ф – угол падения и угол преломления;

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

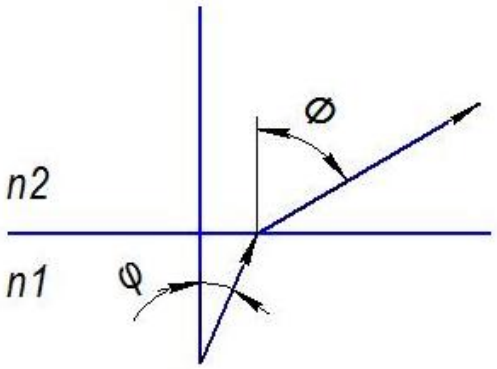


Рисунок 3. Влияние оптического покрытия на эффективность вывода излучения

Угол падения φ, при котором угол преломления Ф составляет 90^0, называется критическим углом $\varphi_{кр}$:

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

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

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

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

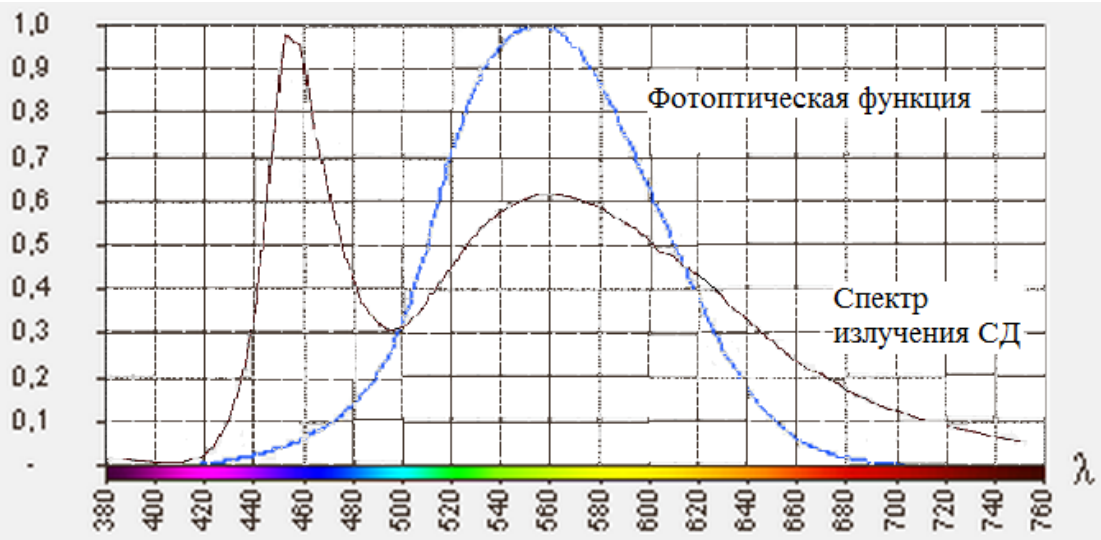
Так критический угол для GaN составляет 23,6 град., а доля вышедшего излучения в воздух 4,18%.

3. Метод получения белого цвета свечения светодиода

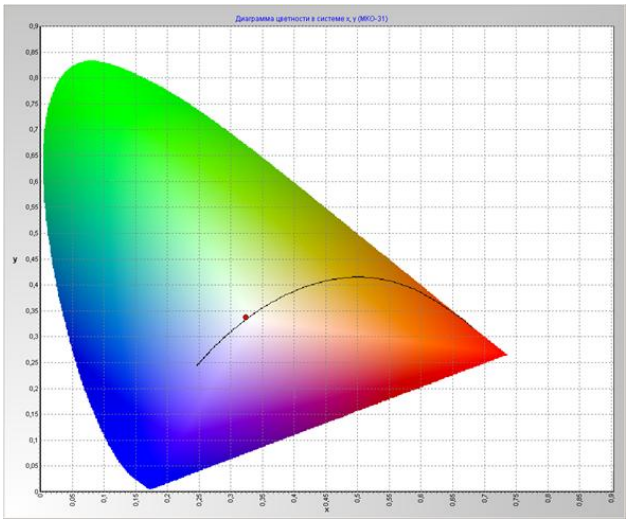
Известно, что для того чтобы человек воспринимал электромагнитное излучение оптического спектра как белый цвет, необходимо задействовать два рецептора человеческого глаза. Т.е., достаточно смешать излучение синего цвета с жёлтым. На практике важен не только факт получения белого

цвета, но и качество этого цвета. Качественными характеристиками источников белого цвета являются индекс цветопередачи, цветовая температура и координаты цветности.

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.



А



Б

Рисунок 4. А – Относительная чувствительность глаза и спектр излучения типового белого светодиода, Б – диаграмма цветности в системе *x*, *y* (МКО-31)

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).

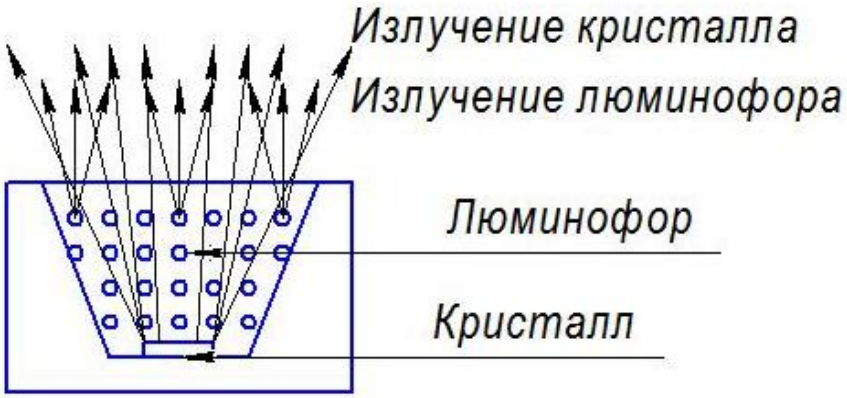


Рисунок 5. Процесс формирования излучения СД с кристаллом синего свечения и люминофором

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

$$n = \Phi_v / (I \times U), \qquad (12)$$

где, Φ_v – световой поток излучённый светодиодом.

$$\Phi_v = 683 \times P \times k(\lambda), \qquad (13)$$

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:

$$[(x_w - x_b)^2 + (y_w - y_b)^2]^{1/2}\, n_b = [(x_w - x_e)^2 + (y_w - y_e)^2]^{1/2}\, n_e, \qquad (14)$$

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 (14) 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.

4. Люминофор для светодиода

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов ((Y_{1-a} Gd_a) Al_5 O_{12} × Ce^{3+} (*YGG*)). Кристаллическая решетка Yal_5O1_2 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 так же 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 $1{,}50 \leq n_{фл} \leq 1{,}85$. Люминофоры, удовлетворяющие таким условиям, предпочтительно использовать для изготовления СД белого свечения.

5. Методы герметизации светодиода

Герметизация СД может осуществляться по четырём основным технологиям (рис. 6):

1. Отражатель с кристаллом СД до краёв заполняют смесью люминофора и компаунда.

2. Люминофор наносят непосредственно на поверхность кристалла.

3. Отражатель с кристаллом заполняют прозрачным компаундом и на его поверхности или в верхней части отражателя наносят слой смеси люминофора и компаунда.

4. На пути вывода излучения СД синего свечения ставят пластину с люминофором, при этом между СД и пластиной существует воздушный зазор.

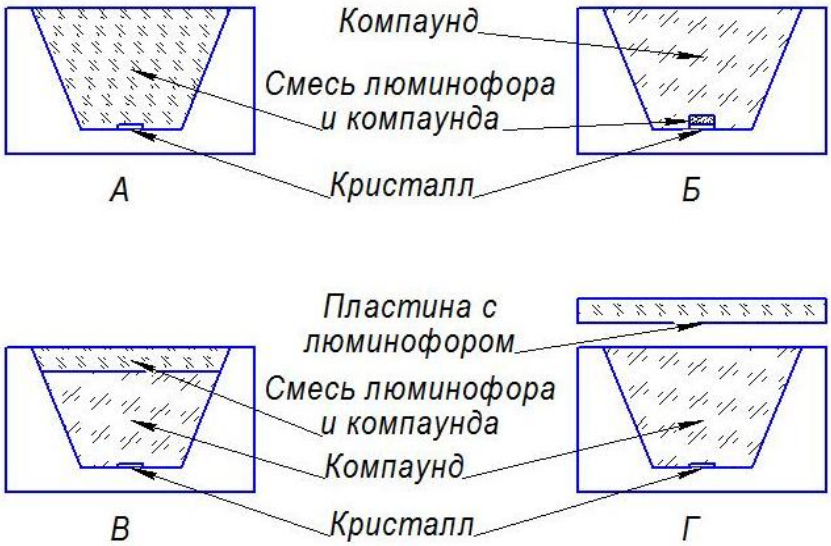


Рисунок 6. Методы герметизации СД

Известно, что удаление люминофора от кристалла на определённое расстояние позволяет увеличить световую отдачу по сравнению с классическим заполнением смесью компаунда с люминофором отражателя с кристаллом. Так в работе показано, что если люминофор удалить от кристалла на расстояние, превышающее поперечное сечение кристалла, то можно повысить световую отдачу СД на 20 – 30%. В работах показано, что более высокое увеличение световой отдачи можно получить за счёт разнесения люминофора и кристалла на высоту 2-3 поперечных сечения кристалла, причём на отражатель в СД наносят тонкий слой компаунда с люминофором, отражатель полностью заполняется прозрачным компаундом с

показателем преломления 1,5, а затем сверху на него наносят слой компаунда с люминофором, толщиной 100±50 мкм.

Увеличение световой отдачи СД за счёт удаления люминофора от кристалла, обеспечивается за счёт снижения доли внутреннего отражения обратно в кристалл СД. Причём использование такой технологии, как правило, для каждой конструкции уникально, т.к. может отличаться глубина отражателя, размер кристалла или количество кристаллов. Поэтому для каждого типа СД требуется проведение исследований для определения оптимальных соотношений компаунда и люминофорной композиции по толщине.

6 Влияние температуры на характеристики светодиода

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. 7).

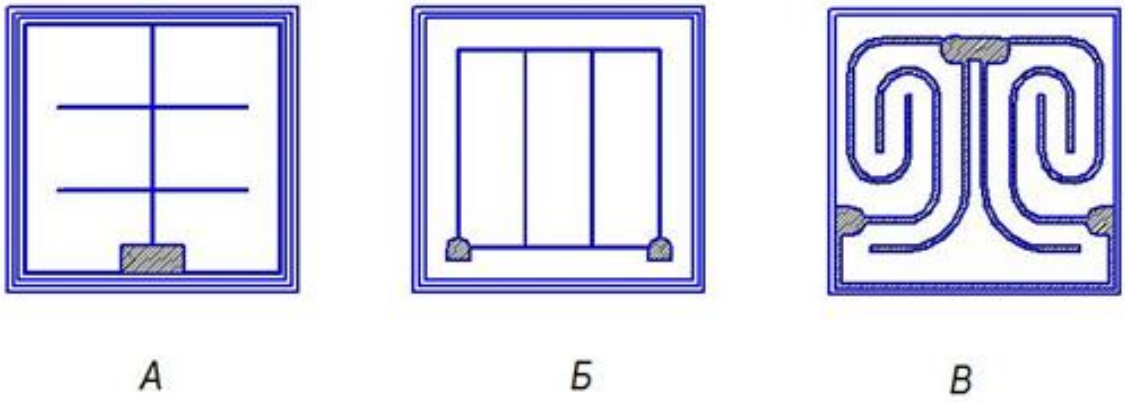


Рисунок 7. Типы топологии омических контактов кристаллов:
А – SemiLEDs, Б – Cree, Г – Epistar

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

$$dU / dT = -(1{,}76 – 2{,}3) \text{ мкВ/К}, \qquad (15)$$

Температурная зависимость ширины запрещённой зоны описывается по формуле:

$$E = E|_{T=0\,K} - \frac{\alpha T^2}{T+\beta}, \qquad (16)$$

где α и β – эмпирически подобранные коэффициенты: $\alpha = 7{,}7\times10^{-4}$ эВ, β = 600 К. $E|_{T=0\,K}$ – 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. 8).

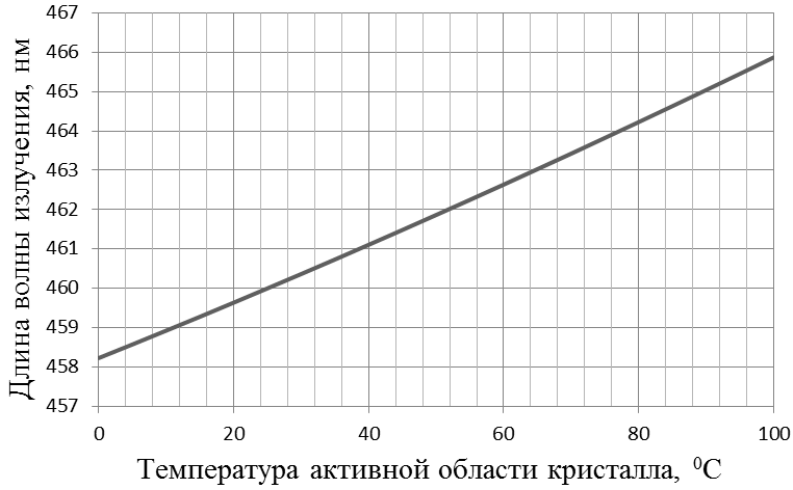


Рисунок 8. Зависимость длины волны излучения кристалла от температуры

Как видно из рис. 8, изменение максимума интенсивности излучения кристалла СД в оптическом спектре в диапазоне длин волн в зависимости от температуры активной области кристалла в диапазоне от 0^0С до 100^0С 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

$$P = P|_{300\,\mathrm{K}} \exp\frac{T-300\mathrm{K}}{Ti}, \qquad (17)$$

T_i – характеристическая температура конкретного светодиода.

Графически зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры можно представить в линейном виде (рис. 9).

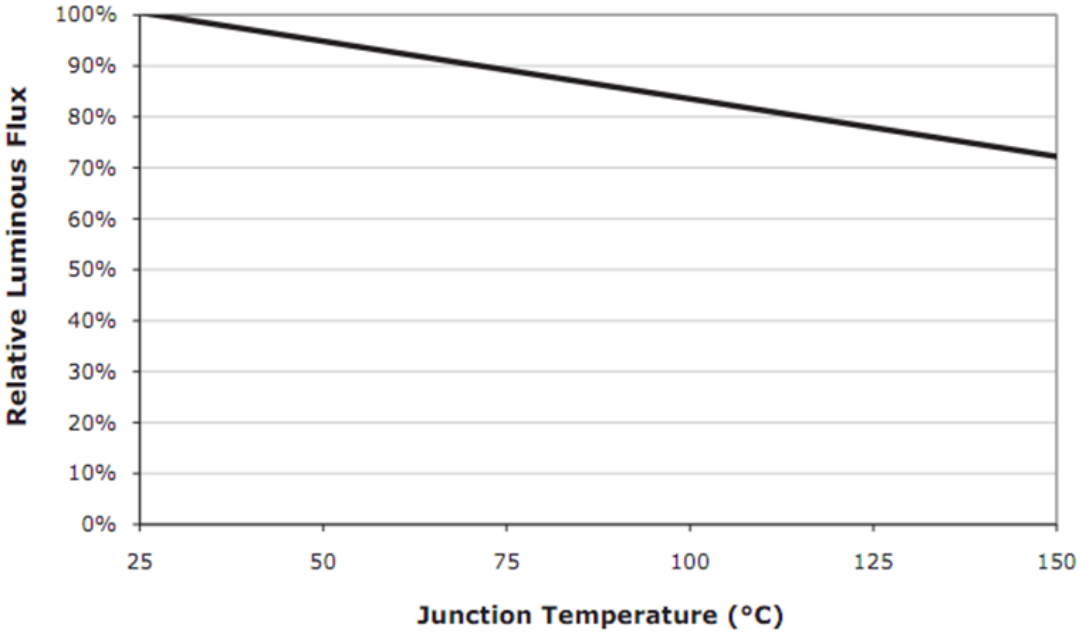


Рисунок 9. Зависимость относительного потока излучения кристалла СД от температуры активной области

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 Вт/м×К), считают, что всё тепло отводится через подложку кристалла, клей и корпус СД. Для каждого слоя приближённо:

$$R_t=\delta/(\lambda\times S), \qquad (18)$$

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:

$$P_e = (T_1 - T_2)/R_t, \qquad (19)$$

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.

7 Современные светодиодные кристаллы

Полупроводниковые кристаллы, выращенные на сапфировой подложке, представлены многими производителями, например, корпорацией Epistar. Кристалл планарного типа с рабочим током 350 мА с размерами 965×965×150 мкм^3 излучает с оптической мощностью ~300 мВт в спектре с длиной волны максимума интенсивности 460 нм. Максимально допустимая температура p-n перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 115^{0}С. Альтернативой ростовой подложки из сапфира является кремний и карбид кремния. Технологией выращивания эпитаксиальных структур GaN на карбиде кремния обладает корпорация Cree, которая с 80-х годов занималась разработкой и изготовлением элементов на GaN для применения их в космической отрасли. На сегодня Cree является монополистом в изготовлении кристаллов GaN, выращенных на карбиде кремния. Кристаллы Cree с рабочим током 350 мА и размерами 980×980×100 мкм^3 вертикальной конструкции излучают ~450 мВт, в спектре с длиной волны 460 нм. Максимально допустимая температура p-n перехода для данного кристалла из спецификации от производителя составляет 145^{0}С. Также на рынке представлены кристаллы, выращенные на кремнии. Корпорация Lattice Power производит кристаллы, выращенные на кремнии, при рабочем токе 350мА кристаллы с размерами 960×960×200 мкм^3 вертикальной конструкции излучают в спектре с длиной волны 460нм оптическую мощность до 420 мВт. Вертикальные кристаллы изготавливают по различным технологиям. Корпорация SemiLEDs изготавливает кристалл по технологии *lift-off*. Суть технологии *lift-off* заключается в отделении сапфировой подложки от структуры GaN при помощи лазерного сканирования и перенос GaN на теплопроводящую подложку из меди. При рабочем токе 350мА вертикальные кристаллы SemiLEDs, с размерами 1070×1070×145 мкм^3 излучают оптическую мощность до 500 мВт, с длиной волны 460нм. Максимально допустимая температура *p-n*-перехода 125^{0}С.

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

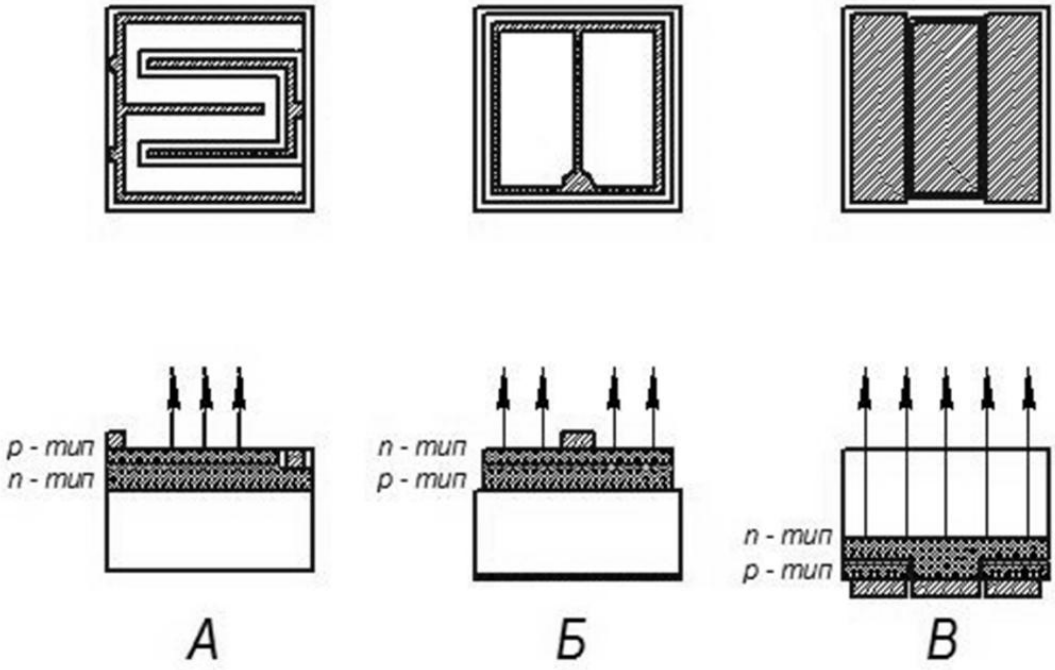


Рисунок 10. Основные виды конструкции кристаллов СД

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

Планарный кристалл с подложкой из сапфира (производители: Epistar, Epiled) имеет основные недостатки: требуется дополнительное электрическое

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

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

В работах приведены результаты моделирования транзисторов на основе нитрида галлия с использованием медной подложки и алмазной. Моделировался слой InGaN/GaN толщиной 7 мкм, выращенный на алмазной и медной подложке толщиной 100 или 500 мкм. Температура основания задавалась 70^0С. Теплопроводность алмаза принималась равной 600 Вт/м×К. Таким образом, разница в максимальных температурах в зависимости от толщины алмазной подложки по моделированию составила, для толщины подложки 100 мкм – 3.4^0С, а для толщины 500 мкм – 7.4^0С. Благодаря высокой теплопроводности и большой ширине запрещённой зоны алмаз давно привлекает внимание разработчиков как в качестве теплопроводящих

подложек для приборов, так и в качестве материала активного тела приборов. Возможность осаждения поликристаллических алмазных пленок в плазме сильноточного тлеющего разряда описана в работах. *CVD*-реактор и технология осаждения подробно описаны в работах. Для изготовления алмазного основания сначала осаждают пленку толщиной до 100 мкм на подложку из монокристаллического кремния, а затем кремний стравливливается в растворе кислот HNO_3/HF.

8. Срок службы светодиода

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.

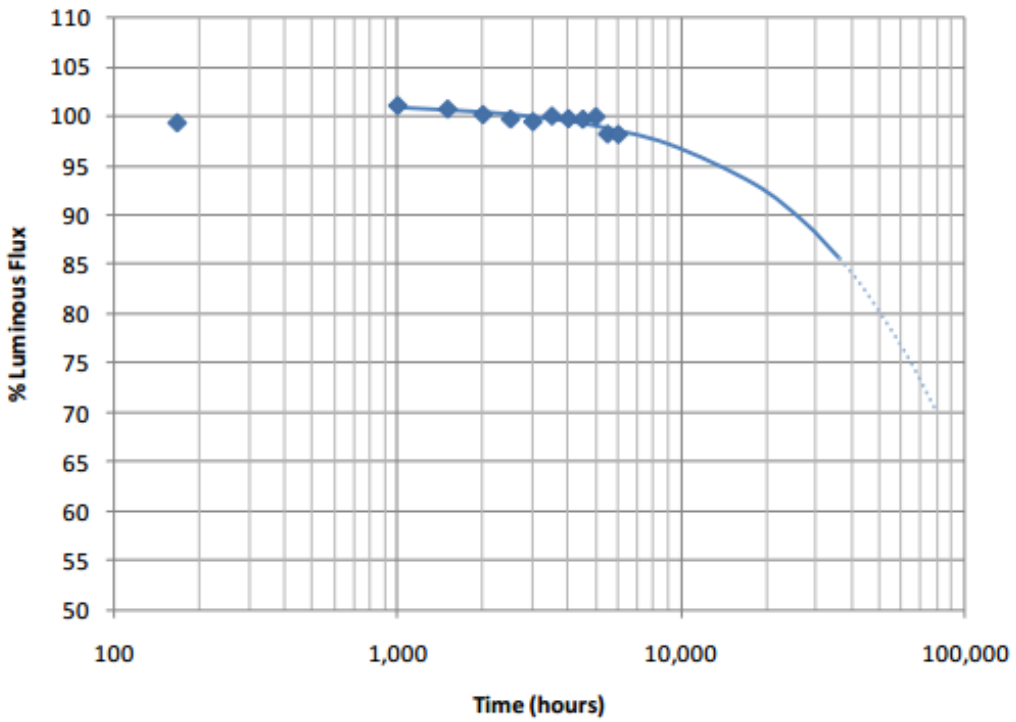


Рисунок 11. Прогнозируемый срок службы СД и результаты испытаний

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 (100^0С) 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).

$$K_y = \exp (E_a / k) \times (1 / (Q_{pn} + 273) - (1 / (Q_{pny} + 273), \quad (20)$$

где K_y – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

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

Q_{pn} – температура p-n перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), ^{0}C;

Q_{pny} – температура p-n перехода в ускоренном режиме испытаний, ^{0}C.

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

$$t_{ном} = t_y \times K_y \qquad (21)$$

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:

$$E_a = 8{,}62 \times 10^{-2} \times ((\ln t_a - \ln t_b) / ((10^3 / T_A) - (10^3 / T_b), \qquad (22)$$

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 p-n 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.

9. Стойкость светодиодов к воздействию быстрыми нейтронами

Облучение быстрыми нейтронами носит объемный характер и вызывает нарушение структуры вещества (смещение атомов в кристаллической решетке, образование примесей других элементов и, в

частности, образование радиоактивных изотопов); ионизацию (в небольшой степени) вследствие выделения из атомов заряженных частиц. Для оценки дозы облучения применяется физическая величина флюенс. Флюенс нейтронов – величина, равная отношению числа нейтронов, падающих за данный интервал времени на поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения нейтронного излучения, к площади этой поверхности.

Радиационное воздействие на СД приводит к изменению спектра локализованных состояний, связанных с дефектами, что влияет на характеристики СД. Дефекты в структуре кристалла СД бывают точечные, линейные и объёмные. Радиационное воздействие бывает электронным, ионным или нейтронным.

Снижение мощности излучения СД на основе InGaN/GaN в процессе облучения быстрыми нейтронами происходит в два этапа: первый этап – радиационная перестройка дефектов в структуре кристалла СД с образованием безызлучательных центров рекомбинации на основе *Mg-H,* второй этап – снижение мощности излучения за счёт дефектов радиационного характера.

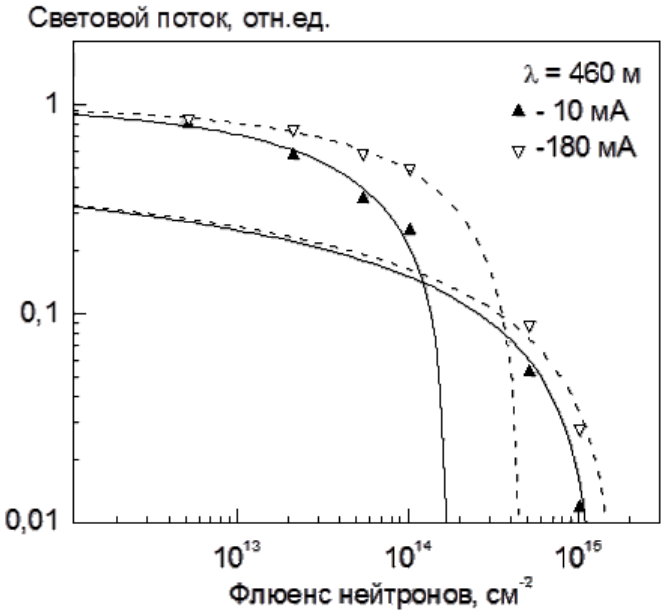


Рисунок 12. Изменение светового потока при облучении быстрыми нейтронами светодиодов синего цвета

В работах приводятся предельные значения потока быстрых нейтронов, определяющих стойкость различных СД к облучению: для AlGaInP (СД красного цвета свечения) (2,4±0,5) × 10^{14} $см^{-2}$, для AlInGaN (СД зелёного цвета свечения) (0,7±0,1) × 10^{16} $см^{-2}$, для AlInGaN с люминофором (СД белого цвета свечения) (4,3±1,2) × 10^{15} $см^{-2}$, AlInGaN (СД синего цвета свечения) (5,0±0,1) × 10^{16} $см^{-2}$. Видно, что стойкость СД белого свечения не намного отличается от стойкости СД синего свечения. Разница значений потока практически укладывается в рамки погрешности измерений.

Светодиоды синего и белого цвета свечения на основе нитрида галлия и его соединений являются достаточно стойкими к воздействию быстрых нейтронов, как показано в работах.

10. Методы измерения параметров светодиода

Основные энергетические и световые величины

В таблице 5 и 6 приведены характеристики, значения которых характеризуют СД.

Таблица 5. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	$Ф_e$	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}	$W/sr*m^2$	$N_{ph}/sr{\cdot}m^2*s$ (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

$$\Phi_e\ (P_e) = dQ_e/dt \qquad (23)$$

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.

$$I_e = \Phi_e/\Omega \qquad (24)$$

где I_e – сила изучения (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 стерадианах.

$$\Omega = S/r^2 \qquad (25)$$

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:

$$E_e = d\Phi_e/dS \qquad (26)$$

где E_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м^2);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – единица площади (м ^{2}).

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

$$E_e = d\Phi_e/dS \qquad (27)$$

где M_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м^2);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м ^{2}).

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

$$L_e = d^2\Phi_e/d\Omega\, dS \cos\theta \qquad (28)$$

где L_e – энергетическая яркость (Вт/ср·м^2);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м^2);

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 (26):

$$\Phi(Лм) = 683(Лм/Вт) \times K \times P(Вт) \qquad (29)$$

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

Таблица 6. 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 6. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	$Ф_v$	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*

Метод измерения постоянного прямого напряжения и постоянного прямого тока

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

На повереном 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.

Метод измерения силы света, кривой силы света и светового потока светодиода

На рис. 13 приведена функциональная схема установки измерения силы света, состоящей из корригированного фотоприёмного устройства, персонального компьютера (ПК) и угломера – гониометра с установленным на него СД.

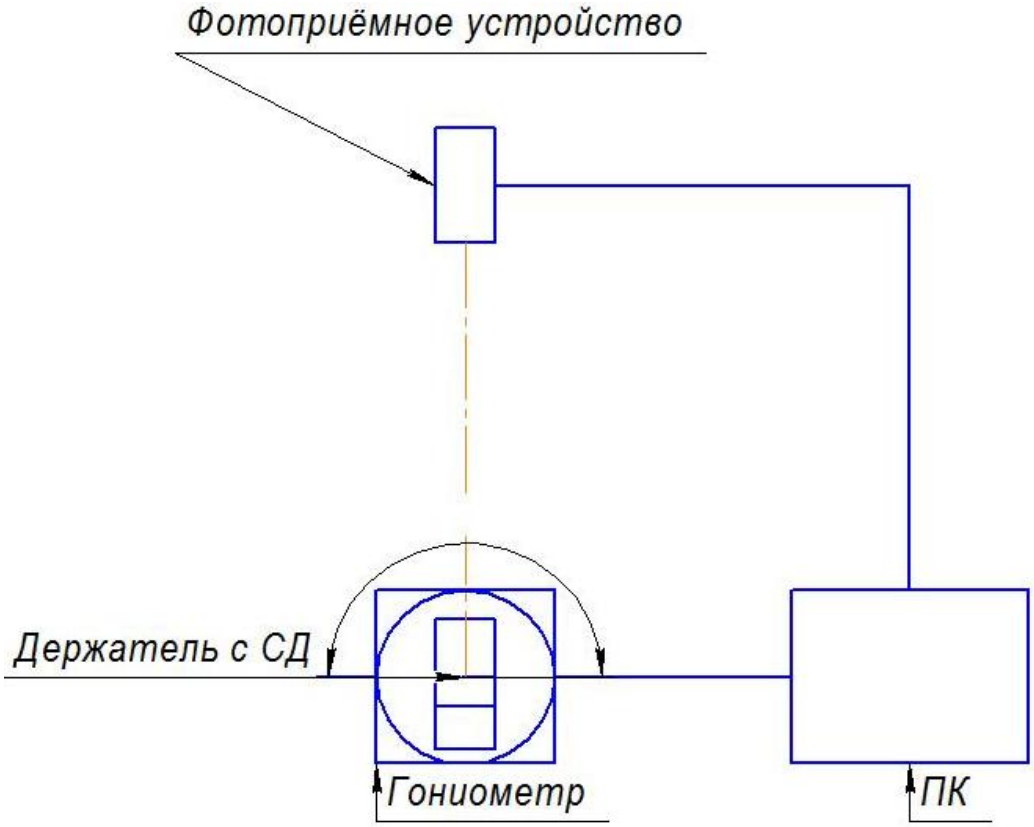


Рисунок 13. Функциональная схема установки для измерения зависимости значения силы света светодиода от угла излучения

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 $(25\pm5)^0$С.

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. Обрабатывают 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.

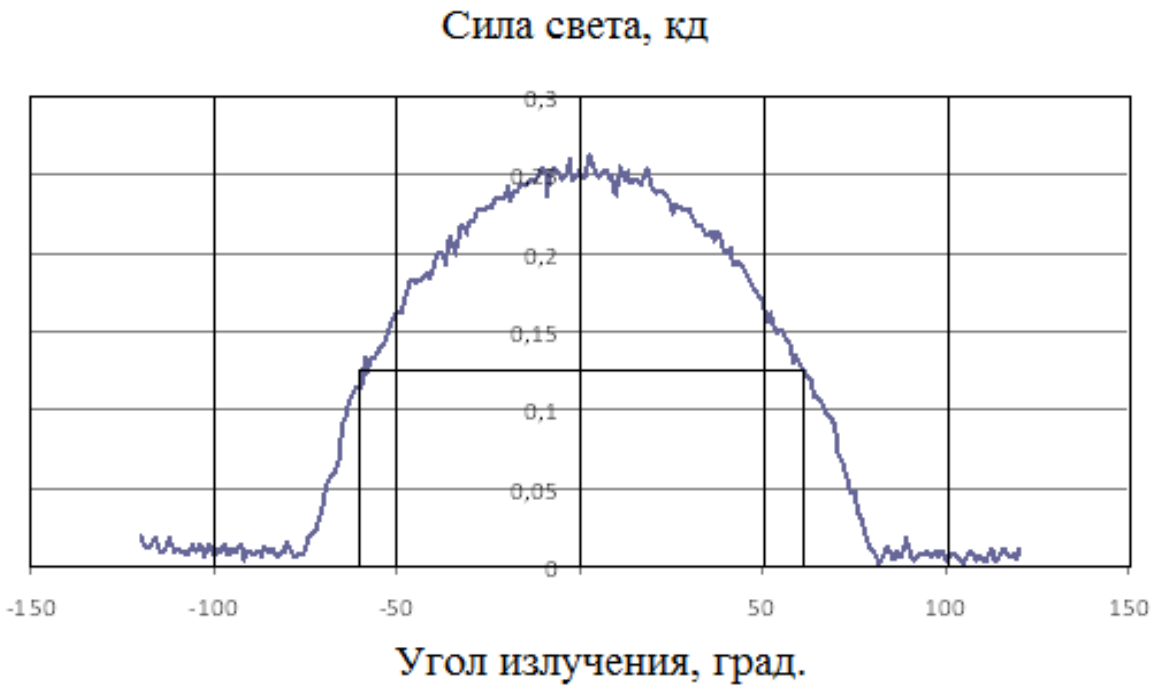


Рисунок 14. Зависимость значения силы света светодиода от угла его излучения – кривая распределения силы света

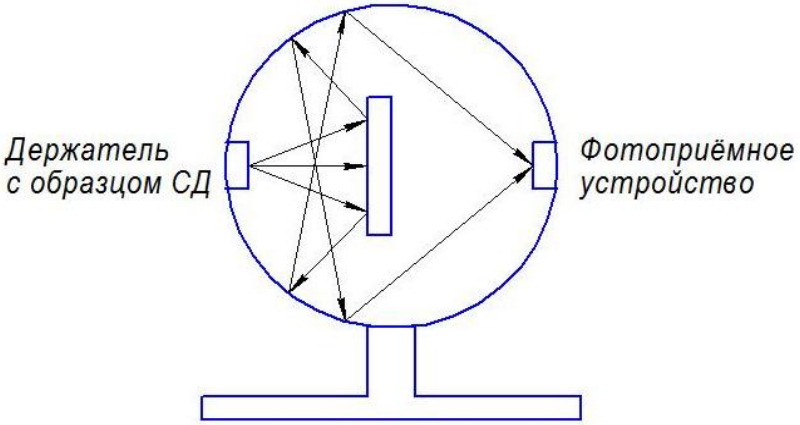


Рисунок 15. Схема фотометрического шара

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.

Метод измерения спектра излучения светодиода

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.

11. Разновидности светильников

В соответствии с ГОСТ 17677-82 светильники можно классифицировать по светотехническим характеристикам:

✓ По классам светораспределения:

прямого света (П) – доля светового потока, направляемого в нижнюю полусферу, от всего светового потока светильника более 80%;

преимущественно прямого света (Н) – доля светового потока, направляемого в нижнюю полусферу, от всего светового потока светильника 60 – 80%;

рассеянного света – доля светового потока, направляемого в нижнюю полусферу, от всего светового потока светильника (Р) 40 – 60%;

преимущественно отраженного света (В) – доля светового потока, направляемого в нижнюю полусферу, от всего светового потока светильника 20 – 40%;

отраженного света (О) – доля светового потока, направляемого в нижнюю полусферу, от всего светового потока светильника менее 20%.

По кривой силы света:

концентрированная (К) – зона направлений максимальной силы света 0 º – 15 º;

глубокая (Г) – зона направлений максимальной силы света 0 º – 30 º, 180 º – 150 º;

косинусная (Д) – зона направлений максимальной силы света 0 º – 35 º, 180 º – 145 º;

полуширокая (Л) – зона направлений максимальной силы света 35 º – 55 º, 145 º – 125 º;

широкая (Ш) – зона направлений максимальной силы света 55 º – 85 º, 125 º – 95 º;

равномерная (М) – зона направлений максимальной силы света 0 º – 180 º;

синусная (С) – зона направлений максимальной силы света 70 º – 90 º,

110 º – 90 º;

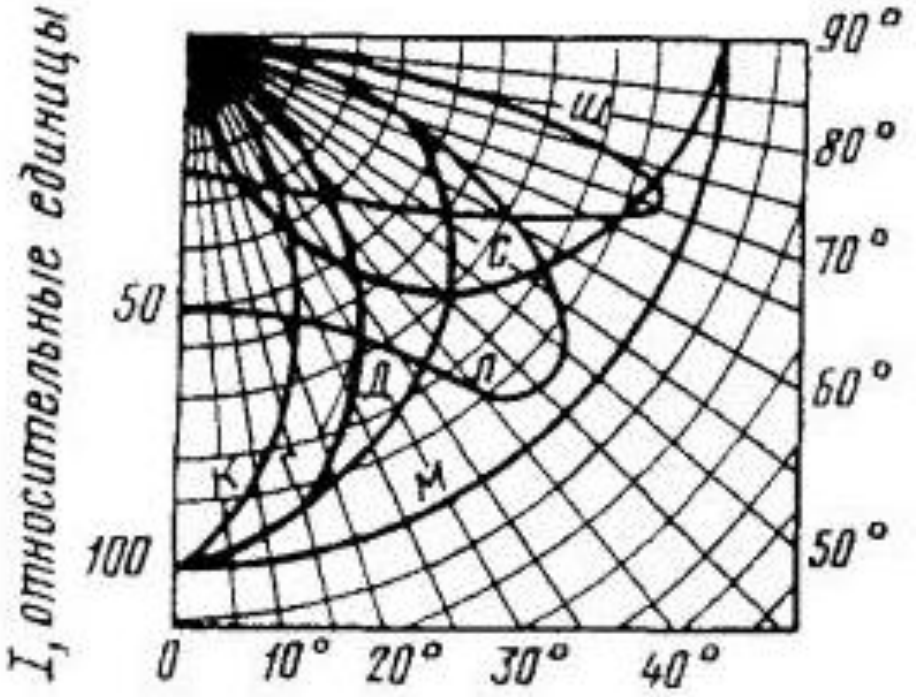


Рисунок 16. Типы кривых силы света

✓ По степени защиты от воздействия окружающей среды ГОСТ 14254

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 >=12,5 мм	пальцем
	3	диаметром >=2,5 мм	инструментом
	4	диаметром >=1 мм	проволокой
	5	пылезащищенное	проволокой
	6	пыленепроницаемое	проволокой
Вторая характеристическая цифра		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/проволокой 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 классу защиты от поражения электрическим током по ГОСТ 12.2.007.0:

Пять классов электротехнических изделий по способу защиты человека от поражения электрическим током: 0; 0I; I; II; III:

класс 0 – светильники, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и не имеющие элементов для заземления, если эти изделия не отнесены к классу II или III;

класс 0I – светильники, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания;

класс I – светильники, имеющие по крайней мере рабочую изоляцию и элемент для заземления. В случае, если светильники класса I имеет провод для присоединения к источнику питания, этот провод должен иметь

заземляющую жилу и вилку с заземляющим контактом;

класс II – светильники, имеющие двойную или усиленную изоляцию и не имеющие элементов для заземления;

классу III – светильники, предназначенные для работы при безопасном сверхнизком напряжении, не имеющие ни внешних, ни внутренних электрических цепей, работающих при другом напряжении.

✓ 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 регулируемыми 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).

- ✓ По способу крепления или установки:

светильники стационарные – потолочные, настенные, встраиваемые, подвесные, пристраиваемые, венчающие, консольные, торцевые;

светильники нестационарные - настольные, напольные, ручные, головные.

- ✓ по пожаробезопасности:

Светильники, пригодные для непосредственной установки на опорную поверхность из сгораемого материала

К таким светильникам относятся:

- светильники без встроенных пускорегулирущих аппаратов или трансформаторов;

- светильники со встроенными пускорегулирующим и аппаратами или трансформаторами (маркируются символом).

Светильники, предназначенные для непосредственной установки на опорную поверхность только из несгораемого материала

Такие светильники должны иметь в эксплуатационном документе соответствующую запись.

12. Требования к светодиодным лампам

Требования к светодиодным лампам установлены в ГОСТ 54815-2011:

✓ потребляемая мощность не должна превышать номинальную более чем на 15%;

✓ начальный световой поток не должен быть менее 90% номинального значения;

✓ коррелированная цветовая температура (КЦТ) должна иметь следующие из шести значений:

F6500 (КЦТ 6400, x=0,313, y=0,337),

F5000 (КЦТ 5000, x=0,346, y=0,359),

F4500 (КЦТ 4500, x=0,361, y=0,366),

F4000 (КЦТ 4040, x=0,380, y=0,380),

F3500 (КЦТ 3450, x=0,409, y=0,394),

F3000 (КЦТ 2940, x=0,440, y=0,403),

F2700 (КЦТ 2720, x=0,463, y=0,420).

Приводят данные на момент наработки 25% от номинального срока службы с максимумом 6000 ч. Допуска заданных в стандарте значений КЦТ определяются типами эллипса МакАдама.

✓ индекс цветопередачи не должен изменится более чем на 5 единиц при наработке 25% от номинального срока службы с максимумом 6000 ч.

- ✓ срок службы лампы

Срок службы лампы определяется коэффициентом сохраняемости светового потока.

Снижение значения светового потока к 6000 ч. от наминального значения при 0 ч.:

не более 10% - коэффициент сохраняемости светового потока 90%, категория A;

не более 20% - коэффициент сохраняемости светового потока 80%, категория B;

не более 30% - коэффициент сохраняемости светового потока 70%, категория C;

не более 40% - коэффициент сохраняемости светового потока 60%, категория D;

не более 50% - коэффициент сохраняемости светового потока 50%, категория E.

Рекомендуется измерять коэффициентом сохраняемости светового потока каждые 1000 ч.

Испытание на долговечность встроенного устройства питания проводится двумя методами:

испытание на циклическое изменение температуры (1 ч. При -10 °, 1 ч. при +40 ° пять циклов);

испытание на переключение питания (30 с включена, 30 с выключена число циклов должно соответствовать половине срока службы лампы)

После испытаний лампа должна оставаться светящейся в течение 15 минут. Затем лампа должна работать при испытательном напряжении при температуре 45 ° до 25% нормируемого срока службы с максимумом 6000 ч.

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. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
7. 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.
8. Мешков В.В. Основы светотехники, ч.I – М.: Энергия,1979.
9. Мешков В.В., Матвеев А.Б, Основы светотехники, Ч-2. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Bakin N.N., Yauk E.F., Tuyev V.I. LED LIGHTING // В сборнике: 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2011 - Proceedings – 2011. – С.346-348.
11. Сощин 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).

12. Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках // Вестник Томского государственного университета. – 2005. - №285. – С. 95-102.

13. Градобоев А.В., Асанов И.А., Скакова И.М. Стойкость светодиодов на основе InGaN/GaN при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2011. – С.100-102.

14. Вилисов А.А., Ремнёв Г.Е., Линник С.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Светодиод с CVD алмазным теплоотводом // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 8/3. – С. 169-171.

15. Вилисов А.А, Линник С.А., Ремнёв Г.Е., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Применение поликристаллического CVD алмаза для эффективного отвода тепла в мощных светодиодах // 9-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2013. – С.180-181.

16. Вилисов А. А., Васильева М. А., Дохтуров В. В., Солдаткин В.С., Тепляков К. В. Зависимость световых параметров светодиодов белого свечения от люминофоров // XLIX Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» в Новосибирском научном центре Сибирского отделения РАН на базе Новосибирского Государственного Университета, г. Новосибирск. – 2011. – 1с.

17. Вилисов А.А., Гарипов И.Ф., Дохтуров В.В., Короченко Д.И., Курило Ю.М., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Токарев А.В. Светодиоды для поверхностного монтажа // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2011. – С.15.

18. Вилисов А.А., Дохтуров В.В., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. - 2011. - Т. 5. - № 13. - С. 50-51.

19. Вилисов А., Калугин К., Солдаткин В., Перминова Е. Белые светодиоды // Полупроводниковая светотехника. - 2012. Т. - 4. - № 18. - С. 14-17.

20. Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Устюгов С.Н. Разработка мощных светодиодов белого цвета свечения для поверхностного монтажа // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2012». – 2012 – Т. 2. – 2с.

21. Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». – 2013 – Т. 2. – С. 63-65.

22. Гончарова Ю.С., Гарипов И.Ф., Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУРа. – 2013. – №2. – С. 51-53.

23. Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Градобоев А.В., Асанов И.А., Тепляков К.В. Стойкость GaN-светодиодов к облучению нейтронами // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2012. - Т. 55. - № 9-2. - С. 290-291.

24. Asanov I.A., Vilisov A.A., Gradoboev A.V., Soldatkin V.S., Tepljakov K.V. Firmness of light-emitting diodes for the superficial installation of white colour of the luminescence to action of factors of radiative action // 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High-Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. - 2012 – С. 111-112.