

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

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

**СВЕТОДИОДЫ
И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

Учебное пособие

Томск
2020

УДК [621.383.52+628.9](075.8)

ББК 31.294я73

В448

Рецензенты:

Полисадова Е.Ф., д-р физ.-мат. наук,
профессор отделения материаловедения
Национального исследовательского
Томского политехнического университета;

Гермогенов В.П., д-р физ.-мат. наук,
профессор кафедры полупроводниковой электроники
Национального исследовательского
Томского государственного университета

Вилисов, Анатолий Александрович

Солдаткин, Василий Сергеевич

Туев, Василий Иванович

В448 Светодиоды и светотехнические устройства: учеб. пособие / А.А. Вилисов, В.С. Солдаткин, В.И. Туев. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2020. – 112 с.

Содержит информацию о перспективных конструкциях и новых технологических процессах производства светоизлучающих диодов – электронной компонентной базы для высокоэффективных светотехнических устройств и радиоэлектронных средств в области связи, телевидения и других областях техники.

Предназначено для студентов уровней подготовки бакалавриата и магистратуры, изучающих дисциплины «Светодиоды и светотехнические устройства», «Полупроводниковая светотехника» и «Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий», а также студентов, обучающихся по направлению «Конструирование и технология электронных средств».

УДК [621.383.52+628.9](075.8)

ББК 31.294я73

© Вилисов А.А., Солдаткин В.С.,
Туев В.И., 2020

© Томск. гос. ун-т систем управления
и радиоэлектроники, 2020

Оглавление

Введение	4
1 Краткая история развития электрических источников света	
1.1 Лампа накаливания	7
1.2 Газоразрядная лампа	8
1.3 Светодиодная лампа	9
2 Световая отдача светодиода	
2.1 Общие замечания	12
2.2 Излучательная рекомбинация и внутренняя квантовая эффективность	12
2.3 Внешняя квантовая эффективность	14
3 Технология изготовления светодиодов	
3.1 Общие сведения	17
3.2 Технологические операции изготовления полупроводникового материала	17
3.3 Технологические операции изготовления светодиодных кристаллов	21
3.4 Корпусирование светодиодов	35
3.5 Материалы и компоненты для изготовления светодиодов	38
4 Основные параметры и характеристики светодиодов	
4.1 Конструкция светодиодов	47
4.2 Светодиоды белого цвета свечения	51
4.3 Светотехнические, электрические и эксплуатационные параметры светодиодов	56
5 Применение светодиодов	
5.1 Светодиодные лампы и светильники	65
5.2 Светодиодные системы передачи информации	86
5.3 Светодиоды в телевидении	91
5.4 Светодиоды в агротехнологиях	98
Литература	105

Введение

Знаете ли Вы, уважаемый читатель, что являетесь свидетелем технической революции, происходящей на Ваших глазах? Более того, Вы можете стать причастными к этому важному процессу. Настоящее пособие призвано раскрыть физические механизмы, конструктивные и технологические особенности производства твердотельных генераторов оптического излучения, обуславливающие все более широкое использование полупроводниковых электролюминесцентных материалов и созданных на их основе светоизлучающих диодов в перспективных высокоэффективных устройствах освещения, в составе средств связи и высокоскоростной передачи данных, в устройствах телевидения и осветительных установках для теплиц.

Выпущенные Национальным космическим ведомством США NASA¹ глобальные карты ночной Земли [1], сделанные из космоса, показывают, насколько масштабно на Земном шаре используется освещение, а ведь на фотографиях виден отблеск только уличного освещения (рисунок В.1).

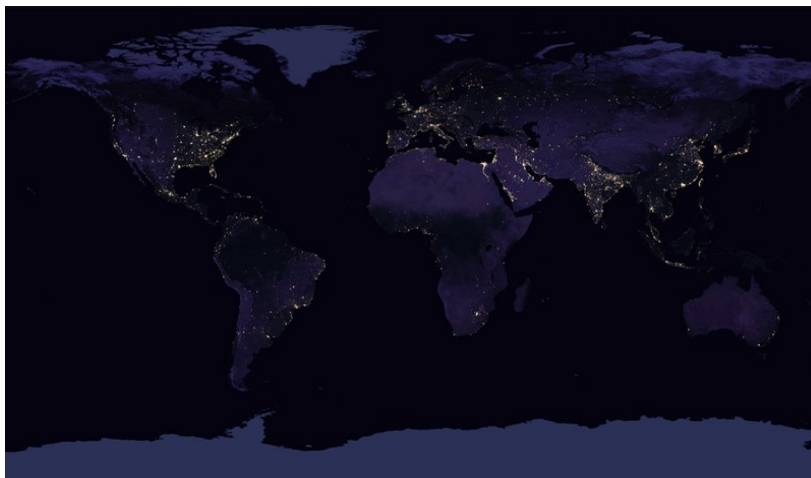


Рисунок В.1 – Фотография поверхности Земли ночью

¹ NASA – National Aeronautics and Space Administration («Национальное Управление по Аэронавтике и Космосу»).

Естественно, что электрическое освещение требует определенных энергозатрат. На цели освещения расходуется до 22 % всей вырабатываемой на Земле электрической энергии [2]. В численном выражении это колоссальное значение, поэтому в России и во многих развитых странах мира приняты программы повышения энергетической эффективности и, в том числе, в области искусственных источников освещения [3].

Энергоэффективность источников света численно характеризуется параметром световой отдачи, определяющим долю светового потока, приходящегося на единицу потребляемой электрической мощности и измеряющимся, соответственно, в лм/Вт.

Посмотрите, как по данным авторов [4] на протяжении двух веков совершенствовалась световая отдача традиционных источников света: пламени, ламп накаливания, флуоресцентных газоразрядных ламп (High-Intensity Discharge lamp – HID лампа) (рисунок В.2).

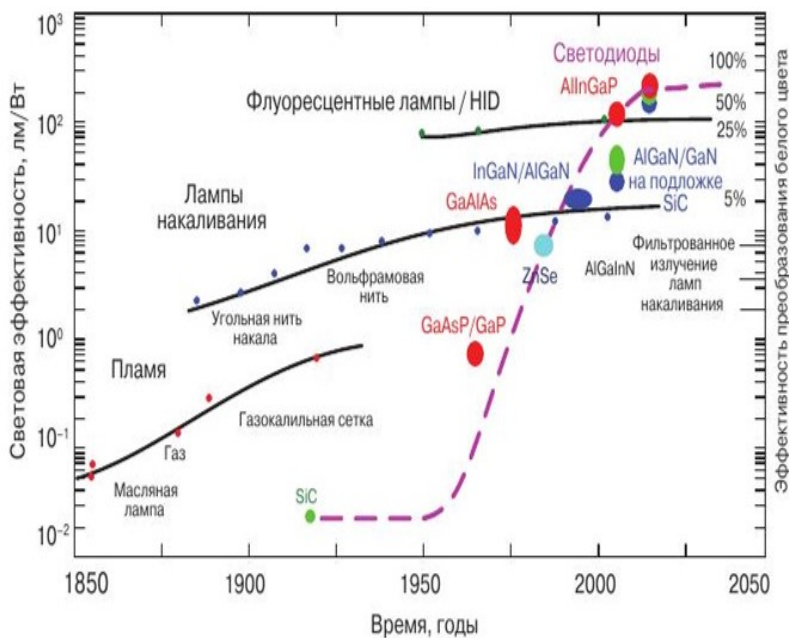


Рисунок В.2 – Динамика изменения световой отдачи различных источников света во времени

Появление в середине прошлого столетия твердотельных источников света (светодиодов), их стремительное развитие и совершенствование в конце прошлого и начале текущего веков и предопределило упомянутую выше техническую революцию, суть которой заключается в том, что в настоящее время по критерию максимума световой отдачи среди всех существующих электрических источников света альтернативы светодиодам нет.

Целью учебного пособия является ознакомление читателей, с перспективными направлениями конструирования, новыми технологическими процессами производства светоизлучающих диодов – электронной компонентной базой не только высокоэффективных светотехнических устройств, но и радиоэлектронных средств в области связи, телевидения, биологии.

При подготовке пособия использованы апробированные на конференциях и опубликованные в рецензируемых изданиях научные результаты, полученные авторами при проведении исследований в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) в течение последних десяти лет [5–8].

Авторы выражают благодарность аспирантам Шкарупо А.П., Юлаевой Ю.В. и Хомякову А.Ю., сотрудникам кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга (РЭТЭМ) и НИИ светодиодных технологий (НИИ СТ) ТУСУРа за помощь в подготовке текста учебного пособия.

1 КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

1.1 Лампа накаливания

Физик В.В. Петров в 1803 году совершил научное открытие, предложив использование электрической энергии для освещения. Свет излучало пламя между древесными углями, подключенными к полюсам батареи и расположенными на расстоянии 2–6 мм друг относительно друга. Это явление получило название электрической дуги. Расстояние между электродами в условиях его естественного увеличения по мере сгорания углей необходимо поддерживать постоянным. При чрезмерном увеличении расстояния между электродами дуга исчезает и свечение прерывается.

Электротехник В.И. Чикалев через 70 лет создал устройство для авторегулирования угольных стержней дуговых ламп. Но и с этим приспособлением дуговые лампы не получили широкого распространения, так как они имели сложную и дорогостоящую регулировку.

Лодыгин Александр Николаевич в 1870 г. разработал новые электрические лампы накаливания с угольным стержнем [9]. Изобретатель наполнил колбу инертным газом, и лампа накаливания проработала несколько часов. В 1873 году на одной из улиц Петербурга было установлено первое электрическое освещение. Российской академией наук А.Н. Лодыгину присуждена Ломоносовская премия. В патентах Лодыгин закрепил за собой первенство в разработке ламп с нитями накаливания из молибдена, платины, иридия, вольфрама, осмия и палладия. Вольфрамовые нити используются в лампах накаливания и сегодня.

Учёный-изобретатель Павел Николаевич Яблочков в 1876 г. на выставке точных физических приборов в Лондоне продемонстрировал усовершенствованную дуговую электрическую лампу и стал первым человеком, который практически применил переменный электрический ток в электротехнике. До появления его работ считалось, что переменный ток не годится для широкого практического применения. Усовершенствование состояло в том, что длинные электроды располагались не концами друг к другу,

а рядом, параллельно. Электроды были разделены слоем каолина – инертного материала, не позволяющего дуге возникнуть по всей длине электродов. Дуга появлялась только на их концах. По мере выгорания видимой части электродов каолин плавился и свет спускался вниз по электродам. Горела такая лампа не более двух-трех часов, но зато невероятно ярко [9].

Эдисон Т.А. организовал массовое производство ламп накаливания. В отличие от А.Н. Лодыгина, который работал один, у Эдисона была собственная лаборатория с необходимым оборудованием, в которой он проводил серии экспериментов. Добившись вакуума порядка 10^{-6} мм рт. ст. он занялся подбором материала для нити. Т.А. Эдисон применил волокно обугленного бамбука и получил отличный результат, что послужило основанием для организации компании по массовому производству. Эдисон занялся другими разработками, но письма недовольных потребителей заставили его вернуться к продолжению доработки лампы накаливания и установить, что угольные ниточки в баллоне слишком нежные – легко рвутся и ломаются. Так американский изобретатель приходит к давней мысли А.Н. Лодыгина о возможности использования вольфрамовой проволоки – проволоке из самого тугоплавкого материала.

В настоящее время световая эффективность ламп накаливания достигает 15 лм/Вт. Серийная лампа, потребляющая 100 Вт электрической энергии, излучает световой поток примерно 1250 лм.

1.2 Газоразрядная лампа

Профессор Боннского университета Ю. Плюккер в 1856 году предложил конструкцию газонаполненной стеклянной трубки, через пространство которой он решил пропустить электрический ток. Плюккер подключил электричество к трубке и стал наблюдать, как с ростом напряжения появляется бледное свечение сначала возле положительного электрода, а затем во всей трубке. Было установлено, что различные газы, заполняющие трубку, давали различные цвета свечения. Пары ртути светились зелено-фиолетовым цветом, а пары натрия – желтым.

В конце XIX в. в Англии появилась первая газоразрядная лампа – трубка длиной около метра. Воздух из нее был тщательно

выкачен, а пространство заполнено парами металла натрия. Эти лампы светились ярким жёлтым светом. Но жёлтый свет газоразрядных ламп не передаёт всех цветов окружающих предметов.

Молодой профессор С.И. Вавилов в 1920 году на лекциях по физике в Высшем техническом училище города Москвы сказал студентам: «Будущие города и заводы должны освещаться светом без тепла – холодным светом». Вскоре была разработана газоразрядная ртутная лампа с трубкой, внутренняя поверхность которой была покрыта люминофором. При воздействии ультрафиолетового излучения, испускаемого парами ртути и аргона низкого давления, комбинация люминофоров излучает тёплый белый цвет с желтоватым оттенком. Излучение люминофора основано на явлении фотолюминесценции.

Такие лампы (лампы дневного света) получили широкое распространение в системах освещения. На сегодня промышленные образцы газоразрядных флуоресцентных ламп имеют световую эффективность до 90 лм/Вт.

1.3 Светодиодная лампа

Создание светодиодной лампы неразрывно связано с созданием и совершенствованием твердотельных полупроводниковых приборов. В этом процессе можно выделить некоторые важные моменты.

Английским инженером Г.Д. Раундом впервые было обнаружено свечение вокруг точечного контакта работающего детектора в 1907 г. [10]. В 20-е годы XX в. Олегом Владимировичем Лосевым обнаружено явление излучательной рекомбинации носителей зарядов в кристаллах карбида кремния и открыта электролюминесценция полупроводников [11]. В 1946 г. Лошкарёвым В.Е. открыта биполярная диффузия неравновесных носителей тока в полупроводниках. В 1947 г. американскими учёными Дж. Бардиным, У. Бреттейном и У. Шокли был создан первый транзистор [12]. Инженер А.В. Красилов и его группа разработали германиевые диоды для радиолокационных станций в НИИ «Исток», а совместно с С.Г. Мадоян впервые обнаружили транзисторный эффект. Лабораторные образцы германиевых транзисторов были разработаны в Физическом институте им. П.Н. Ле-

бедева Российской академии наук (ФИАН) учеными Б.М. Вулом, А.В. Ржановым, В.С. Вавиловым и др.; в Ленинградском физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (ЛФТИ) – В.М. Тучкевичем и Д.Н. Наследовым; в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН) – С.Г. Калашниковым, Н.А. Пениным и др.

В Америке в 1951 году был создан центр по разработке «полупроводниковых лампочек», действующих на основе «эффекта Лосева» (Losev Light), под руководством К. Леховец. В городе Санта-Клара (Калифорния) в 1955 году У. Шокли основал компанию «Shockley Semiconductor Laboratories» по разработке германиевых и кремниевых транзисторов [12, 13].

В Томске в 1954 году В.А. Пресновым была открыта лаборатория полупроводников в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ). Томские исследователи приступили к исследованию арсенида галлия. Совместная работа коллективов Томского государственного университета, СФТИ и НИИ полупроводниковых приборов (АО «НИИ ПП», г. Томск) позволила создать на основе арсенида галлия приборы для СВЧ-электроники и оптики инфракрасного диапазона длин волн. Определяющую роль в разработке этих приборов сыграли профессора С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, В.Г. Воеводин, Н.П. Криворотов, А.А. Вилисов, В.Г. Божков, А.В. Войцеховский [14].

В лабораториях Иллинойского университета (США) в 1962 г. на основе структур GaAsP/GaP Н. Холоньяком созданы первые промышленные светодиоды. Первая светодиодная лампочка была создана в 1968 году; в 60-е годы были созданы светодиоды из GaP с красным и желто-зеленым свечением. Внешний квантовый выход составлял не более 0,1 %, спектр излучения находился в диапазоне длин волн 500-600 нм. Световая отдача светодиодов при этом составляла 1-2 лм/Вт.

В 70-е годы Ж.И. Алферов с сотрудниками разработал многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие увеличить внешний квантовый выход до 15 % за счет ограничения активной области рекомбинации для полупроводниковых материалов GaAs и AlGaAs [15]. Для красной части спектра значение световой отдачи достигло 10 лм/Вт и более 30 % КПД – для инфракрасной.

Группа Дж. Панкова из компании «IBM» в 70-х годах создала фиолетовые и голубые диоды на основе полупроводникового материала GaN. Компанией Hewlett Packard в 1976 г. разработаны светодиоды на основе полупроводниковых материалов фосфидов алюминия-галлия-индия, которые излучали красно-оранжевый, желтый и желто-зеленый свет. В девяностые годы прошлого столетия световой поток светодиодов увеличился до 100 лм. Сюдзи Накамура из японской компании Nichia Chemical в 1991 г. с помощью гетероструктуры на основе нитрида индия-галлия InGaN создал светодиод синего цвета свечения. Корпорацией «Nichia» с 1993 г. организовано серийное производство светодиодов на основе кристалла InGaN, а в 1996 г. разработан и внедрён в массовое производство светодиод белого цвета свечения на основе кристалла InGaN и фотолуминофора YAG [16]. Светодиоды начали широко использоваться в устройствах освещения, обеспечив создание индустрии полупроводниковых энергоэффективных источников света.

2 СВЕТОВАЯ ОТДАЧА СВЕТОДИОДА

2.1 Общие замечания

Световая отдача определяется значением выведенного в пространство вокруг светодиода светового потока, приходящегося на единицу потребляемой электрической мощности и измеряемого, соответственно, в лм/Вт. Электрические свойства светодиодов более подробно рассмотрены в разделе 4. Здесь же рассмотрим физические явления, определяющие световые параметры. К основным физическим факторам, определяющим световой поток во внешнем относительно светодиода пространстве, относят [13]:

1) излучательную рекомбинацию носителей заряда в полупроводниках, определяющую внутреннюю квантовую эффективность;

2) потери при выводе излучения из материала полупроводника, оказывающие влияние на внешнюю квантовую эффективность.

2.2 Излучательная рекомбинация и внутренняя квантовая эффективность

Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучения фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока. Зонная структура является моделью для изучения излучательных 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.

Полупроводниковый материал для светодиодов синего и белого (синий цвет свечения кристалла плюс излучение люминофора) 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 входит добавочное количество электронов, а в n -область – дырок. Такое введение неосновных носителей заряда называется **инжекцией**. Концентрация инжектированных носителей заряда зависит только от равновесной концентрации неосновных носителей и приложенного напряжения. Схематическое изображение зонной диаграммы p - n -перехода приведено на рисунке 2.1.

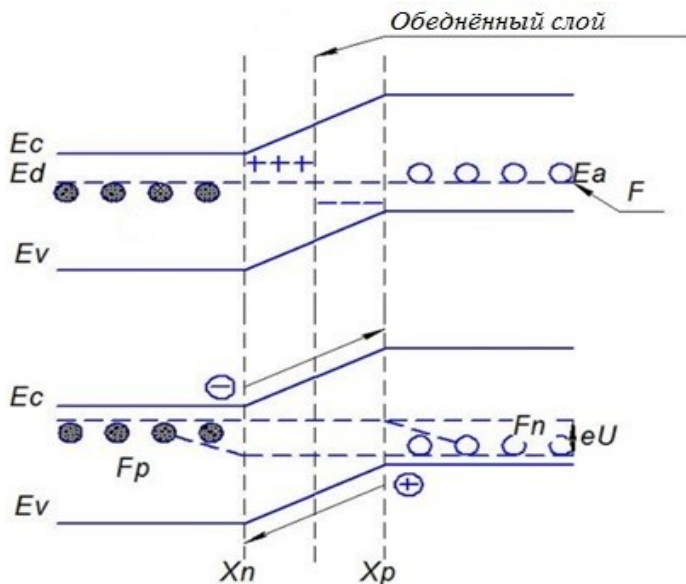


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение зонной диаграммы p - n -перехода: Ea – акцепторный уровень; Ec – энергия дна зоны проводимости; Ed – донорный уровень; Ev – энергия потолка валентной зоны; F – энергия уровня Ферми; Fp – квазиуровень Ферми для дырок; Fn – квазиуровень Ферми для электронов; eU – высота потенциального барьера; Xn , Xp – границы p - n перехода

Излучательная рекомбинация – единственный физический

механизм генерации света в светоизлучающих диодах. Существует несколько видов рекомбинации:

– *межзонная рекомбинация*, при которой электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону непосредственно на место дырки, излучая энергию, несколько большую ширины запрещенной зоны;

– *рекомбинация свободных носителей заряда на примесных центрах (электрон – акцептор или дырка – донор)*, при которой носители захватываются примесными центрами, а затем рекомбинируют со свободным носителем противоположного знака;

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

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

– *экситонная рекомбинация*, при которой электрон и дырка перед актом излучения связываются в свободный экситон, освобождая 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. Достигнутые значения внутренней квантовой эффективности имеют значение 90 % [17].

2.3 Внешняя квантовая эффективность

2.3.1 Коэффициент оптического вывода излучения

Из полупроводникового материала, конструктивно расположенного внутри светодиода, может быть выведена лишь часть сгенерированного излучения. Коэффициент оптического вывода

излучения, вышедшего за пределы светодиода $n_{extract}$, характеризует внешнюю квантовую эффективность и рассчитывается по формуле

$$n_{extract} = P / P_{int}, \quad (2.1)$$

где P – мощность оптического излучения, вышедшего за пределы светодиода;

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

Значение коэффициента оптического вывода излучения всегда меньше единицы и определяется следующими основными потерями излучения:

1) потери на поглощение в материале и конструктивных элементах светодиода;

2) френелевские потери;

3) потери за счёт полного внутреннего отражения от границы раздела сред с различающимися показателями преломления, определяемые так называемым критическим углом.

2.3.2 Потери на поглощение в материале кристалла

Часть сгенерированных фотонов поглощается материалом. В общем случае интенсивность света I_l , прошедшего через слой тела толщиной x относительно начального I_{l0} определяется по формуле [13]:

$$I_l = I_{l0} \exp(-\alpha x), \quad (2.2)$$

где α – коэффициент поглощения.

2.3.3 Френелевские потери

При распространении света из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 часть света отражается обратно от границы раздела. Данные потери света называются френелевскими. Этот вид потерь, приводящих к значительному уменьшению эффективности, обусловлен полным внутренним отражением фотонов, падающих на поверхность раздела сред внутри светодиода под углами, большими критического. Световой луч, проходя из глубины полупроводникового материала к внешней поверхности, отражается в соответствии с законом Снелля:

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \Phi, \quad (2.3)$$

где φ , Φ – угол падения и угол преломления;

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

Расположение сред представлено на рисунке 2.2.

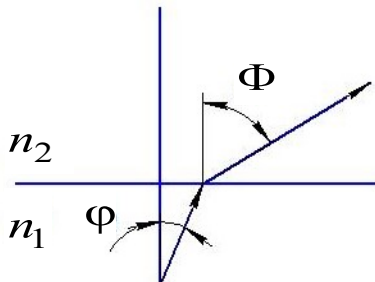


Рисунок 2.2 – Вывод излучения через границу двух сред

Угол падения φ , при котором угол преломления Φ составляет 90° , называется критическим углом $\varphi_{кр}$, значение которого определяется по формуле

$$\varphi_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1). \quad (2.4)$$

Доля оптической мощности, вышедшей из полупроводника P_l относительно начальной P_{l0} определяется соотношениями 2.5–2.6 [13, 18]:

$$P_l / P_{l0} = (1/2) \times (1 - \cos \varphi_{кр}), \quad (2.5)$$

$$P_l / P_{l0} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2). \quad (2.6)$$

Значение критического угла для GaN составляет 23,6 градуса, а доля вышедшего излучения в воздух 4,18 %.

Достигнутые значения внешней квантовой эффективности имеют значение 60–84 % [17, 19].

3 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ

3.1 Общие сведения

Технологический маршрут изготовления светодиодов включает три последовательные группы операций:

- 1) технологические операции изготовления полупроводникового материала;
- 2) изготовление кристалла светодиода;
- 3) корпусирование светодиода или матрицы светодиодов в конкретных изделиях.

Рассмотрим эти группы технологических операций более подробно.

3.2 Технологические операции изготовления полупроводникового материала

Полупроводниковые материалы для изготовления светодиодов и других светоизлучающих устройств получают методами эпитаксиального роста. Проведение эпитаксии возможно из газовой, жидкой или твердой среды. Самой распространенной является газофазная эпитаксия.

Для изготовления светодиодов используется три класса полупроводниковых материалов:

- 1) арсениды;
- 2) фосфиды;
- 3) нитриды.

Арсенид галлия изготавливают с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (или молекулярно-пучковой эпитаксии) основан на наращивании на подложке монокристаллических слоев полупроводниковых веществ с помощью осаждения термически испаренных компонентов на нагреваемую монокристаллическую подложку с одновременным взаимодействием между ними.

В качестве ростовой подложки используется арсенид галлия. Для гетероэпитаксиальных структур GaAs на подложке из

арсенида галлия характерны следующие значения толщины слоёв: подложка GaAs, GaAs *n*-типа – 5 мкм; активная область GaAs – 1–2 мкм; GaAlAs *p*-типа – 5 мкм.

AlGaInP и GaN с соединениями индия и алюминия изготавливают методом газофазной эпитаксии. Данный метод основан на подаче в ростовую зону исходных компонентов эпитаксиальных слоев в виде легколетучих простых веществ или соединений в потоке газа-носителя. В реакторе происходит разложение этих материалов, стимулированное термически или иным путем, и идут химические реакции с их участием, при этом требуемые компоненты осаждаются на подложку, являющуюся основой полупроводникового прибора.

В качестве ростовой подложки используется оксид алюминия (сапфир), кремний и карбид кремния. Для гетероэпитаксиальных структур AlGaInP на подложке из арсенида галлия характерны следующие значения толщины слоёв: подложка GaAs, AlInGaP *n*-типа – 1 мкм; активная область AlInGaP – 0,5–1 мкм; AlInGaP *p*-типа – 0,5–1 мкм; AlGaAs *p*-типа – 2–15 мкм.

Для гетероэпитаксиальных структур на подложке из сапфира с 7–10 квантовыми ямами характерны следующие значения толщины слоёв: сапфир примерно – 105 мкм; *u*-тип GaN – 2 мкм; *n*-тип GaN – 2,5 мкм; активная область InGaN/GaN – 0,2 мкм; *p*-тип AlGaN – 0,03 мкм; *p*-тип GaN – 0,2 мкм.

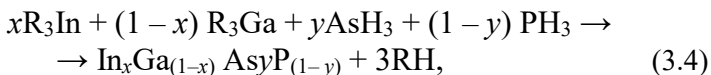
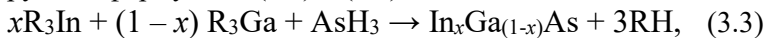
Физико-химические процессы МOCVD эпитаксии можно описать следующим образом [20]. При эпитаксии полупроводников $A^{III}B^V$ ($A^{II}B^{VI}$) источником элементов A^{III} (A^{II}) чаще всего являются их низкомолекулярные алкилы, а источником элемента B^V (B^{VI}) – гидриды. Протекающие при этом в горячей зоне химические реакции в общем виде можно записать в виде формул (3.1–3.2):



где R – обычно метил-(CH₃) или этил-(C₂H₅) радикалы.

Рост полупроводниковой структуры твердых растворов на основе соединений $A^{III}B^V$ ($A^{II}B^{VI}$) осуществляется одновременной подачей в реакционную камеру нескольких металлоорганических соединений и/или гидридов, состав и соотношение которых определяются требуемым составом полупроводниковой структу-

ры. Пиролиз источников при повышенных температурах и взаимодействие продуктов пиролиза приводят к образованию на поверхности подложки полупроводниковой структуры соответствующих твердых растворов. Реакции образования 3- и 4-компонентных твердых растворов на примере $A^{III}B^V$ иллюстрируются формулами (3.3) и (3.4):



На состав осаждаемой полупроводниковой структуры твердых растворов помимо состава исходной газовой фазы может влиять ряд кинетических факторов, зависящих от конкретных условий проведения процесса. Это различие в скоростях пиролиза различных источников, участвующих в процессе эпитаксии. Оно, как и протекание побочных реакций в газовой фазе, в значительной мере определяется температурой процесса.

В настоящее время применяются реакторы вертикального и горизонтального типа [20]. Основные производители эпитаксиальных установок: Aixtron (Германия) – рисунок 3.1, Veeco (США) – рисунок 3.2 и Taiyo Nippon Sanao (Япония) – рисунок 3.3.



Рисунок 3.1 – Установка MOCVD эпитаксии Aixtron AIX G5



Рисунок 3.2 – Установка MOCVD эпитаксии Veeco



Рисунок 3.3 – Установка MOCVD эпитаксии Taiyo Nippon Sanso TNSC UR26K MOCVD

3.3 Технологические операции изготовления светодиодных кристаллов

После эпитаксиального выращивания полупроводниковых слоёв структура полупроводниковой пластины представляет собой последовательный набор тонких слоёв, ориентировочные значения толщины которых представлены на рисунке 3.4.

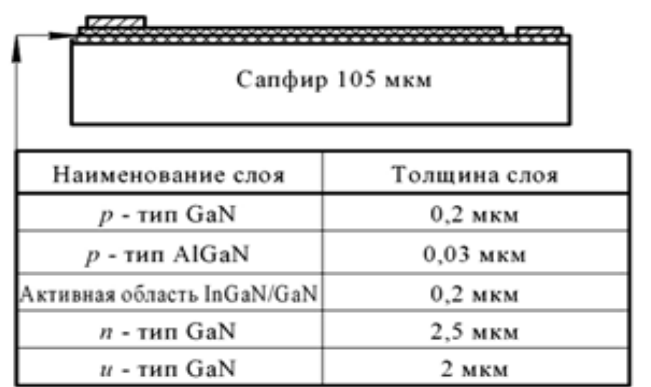


Рисунок 3.4 – Структура нитридной полупроводниковой пластины: слой *n*-типа GaN легирован Si; слой *p*-типа GaN легирован Mg

Технологический процесс изготовления светодиодного кристалла в укрупнённом виде представляет собой последовательность операций, которая показана на рисунке 3.5.

3.3.1 Очистка поверхности полупроводниковой пластины

Существует три основных способа очистки полупроводниковых пластин:

- 1) **механическая очистка** (поток жидкости или газа);
- 2) **растворение загрязнений в воде;**
- 3) **химическая очистка.**

Жидкостные методы бывают физические и химические. Физические методы очистки делятся на обезжиривание в органических растворителях и промывание в воде. Химические методы очистки делятся на обезжиривание в мыльных и перекисных аммиачных растворах и кислородное травление. Сухие методы также

бывают физические и химические. Физические методы очистки делятся на отжиг и ионное травление. Химические методы очистки делятся на газовое травление и плазмохимическое травление.



Рисунок 3.5 – Технологический процесс изготовления светодионного кристалла

3.3.2 Формирование фоторезистивной маски для травления

На поверхность пластины полупроводника наносится слой SiO_2 . На слой SiO_2 наносится фоторезист. Фоторезист, как правило, наносят методом центрифугирования: пластина полупроводника закрепляется вакуумным присосом на центрифуге и после нанесения нескольких капель резиста раскручивается с определенной скоростью.

В состав резистов входят:

- светочувствительный компонент;
- пленкообразующие полимеры;
- специальные добавки для изменения спектральной характеристики светочувствительности резиста;
- растворители для однородного распределения всех компонентов.

После нанесения фоторезиста осуществляется его сушка, в процессе которой происходит испарение растворителя, смыкание полостей, содержащих растворитель.

Далее осуществляется экспонирование – процесс облучения светочувствительного материала актиничным электромагнитным излучением. Экспонирование приводит к изменению свойств фоторезиста (растворимость в слабощелочных растворах, химическая стойкость).

После экспонирования осуществляется процесс проявления и удаления фоторезиста. Существуют негативные и позитивные фоторезисты. В негативных фоторезистах под воздействием света происходит полимеризация мономерных молекул с образованием полимерных, что приводит к уменьшению растворимости на облученных участках, и после проявления фоторезистивная маска остаётся на поверхности подложки. В позитивных фоторезистах происходит обратный процесс. Экспонирование приводит к разрыву связей в молекулах полимеров, и на облученных участках растворимость фоторезиста увеличивается. Далее проводится отмывка полупроводниковой пластины. Для позитивных фоторезистов отмывка производится щелочными растворами. После отмывки проводится термическая обработка фоторезистивной маски (задубление) при температурах 120–180 °С.

3.3.3 Травление до слоя n – типа GaN

Существует два основных типа травления полупроводниковых материалов:

- 1) **жидкостное травление** (травление в жидких реагентах);
- 2) **сухое травление** (травления в газовой среде или плазме).

Для изготовления светодиодных кристаллов, как правило, применяется сухое травление, которое по сравнению с жидкост-

ным обеспечивает более высокую разрешающую способность.

В сухом травлении используется два метода:

1) **физический** (механический) метод удаления материала травлением путем распыления при бомбардировке материала ионами инертного газа;

2) **реактивный газовый** (плазменный, реактивно-ионный) метод травления.

Совместное использование этих двух методов имеет название: реактивное ионно-лучевое травление.

Реактивное ионное травление полупроводниковых пластин по механизму процесса представляет собой комбинированный метод. Удаление обрабатываемого материала происходит в результате его распыления ускоренными ионами и образования легколетучих соединений при взаимодействии с химически активными частицами плазмы. Физическое распыление интенсифицирует химические реакции, а химические реакции, ослабляя межатомные связи на обрабатываемой поверхности, увеличивают скорости распыления.

3.3.4 Формирование омических контактов Ti/Al/Ni/Au методом электронно-лучевого напыления

Существует три основных метода нанесения тонких пленок на полупроводниковую пластину.

1. Вакуумное термическое напыление. Данный метод предназначен для напыления тонких пленок толщиной 0,01...0,1 мкм. Метод основан на нагреве, испарении и осаждении вещества на подложку в замкнутой камере при сниженном давлении газа. В камере с помощью вакуумного насоса создается предельное давление остаточных газов до $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Для нагрева напыляемого вещества используется два типа испарителей:

1) прямонакальные проволочные и ленточные испарители, изготавливаемые из вольфрама или молибдена;

2) электронно-лучевые испарители с нагревом испаряемого вещества электронной бомбардировкой.

2. Ионно-плазменное напыление. Метод заключается в распылении материала наносимого вещества, находящегося под отрицательным потенциалом, в результате бомбардировки ионами инертного газа, возникающими в процессе возбуждения тлею-

щего разряда внутри установки вакуумного напыления.

3. Электрохимическое осаждение. Электрохимическое осаждение металлов основано на разложении солей и окислов в растворах под действием постоянного тока.

После формирования омических контактов производится их отжиг при температуре 700–800 °С не более 30 секунд в среде азота [21].

3.3.5 Формирование фоторезистивной маски для травления

Формирование фоторезистивной маски для травления осуществляется по технологии литографии. **Литография** – это формирование в резисте, нанесенном на поверхность подложки, рельефного рисунка, повторяющего топографию кристалла, с последующим переносом этого рисунка на подложки.

На рисунке 3.6 приведены типовые технологические этапы фотолитографии [22].

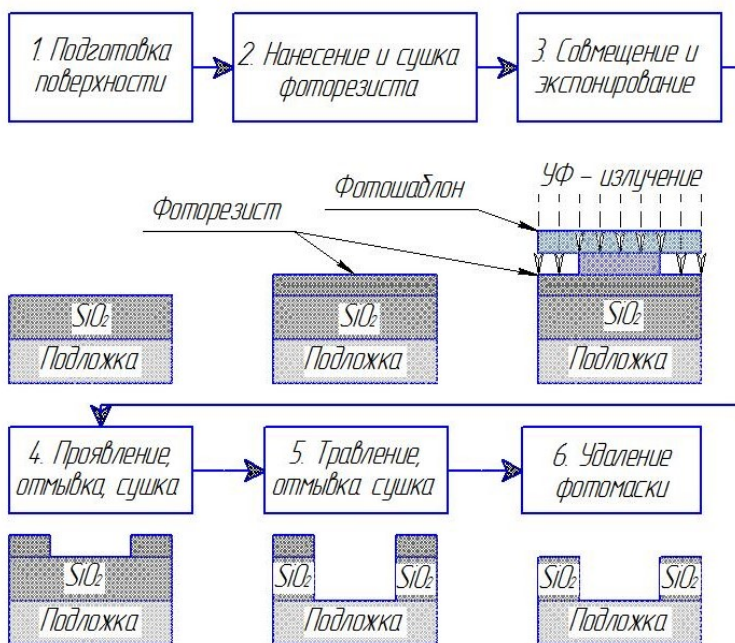


Рисунок 3.6. – Типовые технологические этапы фотолитографии

3.3.6 Разделение на кристаллы с помощью дисковой или лазерной резки

Для разделения на кристаллы полупроводниковой пластины применяется резка алмазным диском. Для пластин с глубиной реза менее 1,5 мм. применяются алмазные диски с внешней режущей кромкой, толщина дисков составляет от 20 до 320 мкм и обеспечивает пропил шириной до 20 мкм, но как правило, в полупроводниковой технике ширина пропила составляет 250 мкм. Качество данной технологической операции зависит от материала лезвия, зернистости алмазных зерен и их концентрации, скорости вращения и подачи лезвия [23].

3.3.7 Основные параметры и характеристики кристаллов

В зависимости от мощности светодиодные кристаллы разделяются на следующие виды:

- 1) кристаллы малой мощности (электрическая мощность до 1 Вт);
- 2) мощные кристаллы (более 1 Вт).

По конструктивному исполнению кристаллы делятся на следующие виды:

- 1) планарные (контакты к *n*- и *p*-слоям находятся на плоскости, через которую выводится излучение);
- 2) вертикальные (один из контактов на нижней поверхности, на которую осуществляется монтаж в корпус, второй контакт – на верхней поверхности, через которую выводится свет).

Кристаллы типа flip-chip относятся к планарным кристаллам, в которых свет выводится через поверхность, противоположную поверхности с контактами.

Кристаллы малой мощности

В таблице 3.1 приведены характеристики маломощных кристаллов вертикального типа, в таблице 3.2 приведены характеристики маломощных кристаллов планарного типа [7].

Кристаллы производства фирмы «Cree» изготавливают на подложке из карбида кремния, *n*-слой полупроводниковой структуры контактирует с подложкой, карбид кремния проводит ток.

Кристаллы производства фирмы SemiLeds изготавливаются на сапфировой подложке. После выращивания полупроводникового слоя, на *p*-слой наносится медь толщиной 100 мкм. Таким

образом, контакт к *n*-слою расположен на поверхности, через которую выводится свет, а контакт к *p*-слою контактирует с медной подложкой, через которую осуществляется монтаж в корпус светодиода.

Таблица 3.1 – Характеристики маломощных кристаллов вертикального типа


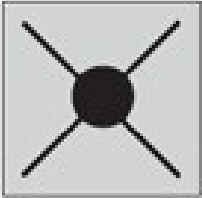




Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид кристалла
Cree C460EZ290		
Габаритные размеры, мкм ³	280×280×100	
Прямой ток, мА	20	
Прямое напряжение, В	2,7–,7	
Мощность излучения, мВт	24	
Длина волны, нм	455–465	
Предельная температура <i>p-n</i> - перехода, °С	125	
Максимальное значение прямого тока, мА	50	
Cree C460EZ400		
Габаритные размеры, мкм ³	380×380×100	
Прямой ток, мА	150	
Прямое напряжение, В	3,1–4,1	
Мощность излучения, мВт	105–120	
Длина волны, нм	445–465	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	145	
Максимальное значение прямого тока, мА	200	
SemiLeds SL-V-B15AA		
Габаритные размеры, мкм ³	400×400×80	
Прямой ток, мА	20	
Прямое напряжение, В	3,2–3,5	
Мощность излучения, мВт	24–35	
Длина волны, нм	450–475	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	125	
Максимальное значение прямого тока, мА	50	

Таблица 3.2 – Характеристики маломощных кристаллов планарного типа

Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид кристалла
Epistar EDI-EE0926		
Габаритные размеры, мкмЗ	650×225×110	
Прямой ток, мА	60	
Прямое напряжение, В	2,7–3,5	
Мощность излучения, мВт	47,5–57,5	
Длина волны, нм	445–465	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	115	
КПД при прямом токе 10 мА, %	38,0	
Epistar EK-EEBLKE11		
Габаритные размеры, мкмЗ	700×270×110	
Прямой ток, мА	20	
Прямое напряжение, В	2,8–3,0	
Мощность излучения, мВт	32–34	
Длина волны, нм	455–465	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	115	
КПД при прямом токе 10 мА, %	61,0	
Epistar ES-EADBS09		
Габаритные размеры, мкмЗ	1143×225×125	
Прямой ток, мА	20	
Прямое напряжение, В	3,2–3,5	
Мощность излучения, мВт	42–46	
Длина волны, нм	445–455	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	115	
КПД при прямом токе 10 мА, %	78,0	

Мощные кристаллы

В таблице 3.3 приведены характеристики мощных кристаллов вертикального типа, в таблице 3.4 – характеристики мощных кристаллов планарного типа.

Таблица 3.3 – Характеристики мощных кристаллов вертикального типа

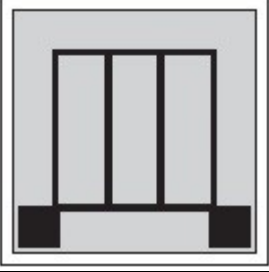
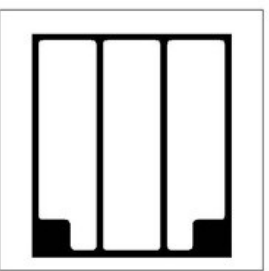
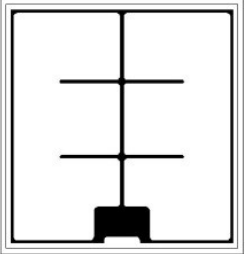
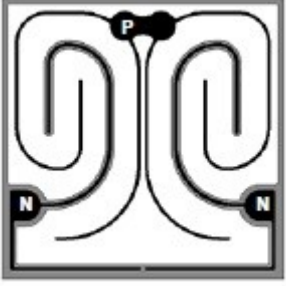
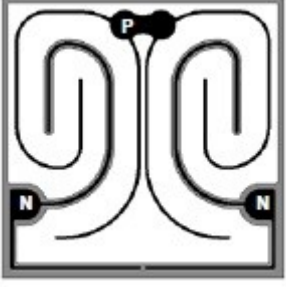


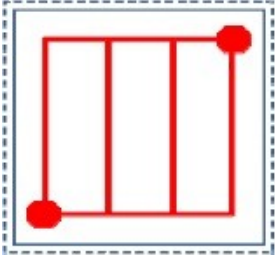
Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид кристалла
Cree C460EZ1000		
Габаритные размеры, мкм3	980×980×130	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	2,9–3,8	
Мощность излучения, мВт	300	
Длина волны, нм	445–475	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	145	
Максимальное значение прямого тока, мА	1000	
SemiLeds SL-V-B40AC		
Габаритные размеры, мкм3	1070×1070×145	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,2–3,6	
Мощность излучения, мВт	450–550	
Длина волны, нм	450–475	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	125	
Максимальное значение прямого тока, мА	500	
SemiLeds SL-V-B40AK		
Габаритные размеры, мкм3	1070×1070×145	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,2–3,6	
Мощность излучения, мВт	450–550	
Длина волны, нм	450–475	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	125	
Максимальное значение прямого тока, мА	500	

Таблица 3.4 – Характеристики мощных кристаллов
планарного типа

Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид кристалла
Epistar ES-CABHV38		
Габаритные размеры, мкм3	965×965×150	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,5–3,8	
Мощность излучения, мВт	220–225	
Длина волны, нм	465–475	
Предельная температура p-n перехода, °С	115	
Максимальное значение прямого тока, мА	450	
Epistar ES-CABHV45C		
Габаритные размеры, мкм3	1143×1143×150	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,4–3,6	
Мощность излучения, мВт	295–340	
Длина волны, нм	465–475	
Предельная температура p-n перехода, °С	115	
Максимальное значение прямого тока, мА	700	
Epigap-berlin ELC-460-31-2_01		
Габаритные размеры, мкм3	1143×1143×100	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	2,7–3,1	
Мощность излучения, мВт	250	
Длина волны, нм	445–465	

Продолжение таблицы 3.4

Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид кристалла
Bridgelux NLX-5 BXCA 45*45		
Габаритные размеры, мкмЗ	1143×1143×150	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,0–3,6	
Мощность излучения, мВт	255–340	
Длина волны, нм	445–465	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	150	
Максимальное значение прямого тока, мА	700	
Verticleinc 5CV1000		
Габаритные размеры, мкмЗ	1240×1240×110	
Прямой ток, мА	350	
Прямое напряжение, В	3,3–3,5	
Мощность излучения, мВт	255–340	
Длина волны, нм	442,5 – 467,5	
Предельная температура <i>p-n</i> перехода, °С	145	
Максимальное значение прямого тока, мА	1000	

3.3.8 Спектр излучения кристалла

Температурная зависимость ширины запрещённой зоны полупроводникового материала описывается формулой [13]:

$$E = E|_{T=0 \text{ К}} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (3.5)$$

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.

Графически зависимость максимума длины волны синего света от температуры имеет линейный характер и приведена на рисунке 3.7 [24].

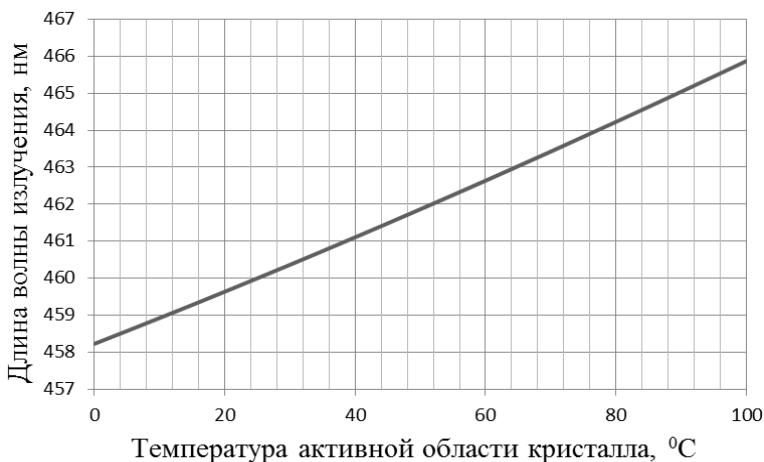


Рисунок 3.7 – Зависимость длины волны излучения кристалла от температуры

Изменение максимума интенсивности излучения кристалла в оптическом диапазоне длин волн в зависимости от температуры активной области кристалла в диапазоне от 0 °C до 100 °C может достигать 10 нм. Изменение длины волны излучения кристалла ведёт к изменению цветовых координат белого свечения светодиода (СД).

3.3.9 Электрическое моделирование светодиодного кристалла

Значение электрической мощности, рассеиваемой светодиодным кристаллом, определяется режимом работы по постоянному току. Математическое моделирование зависимости тока кристалла от приложенного напряжения может осуществляться применением аппроксимирующих функций.

В основу выражения (3.6) положено известное разложение функции гиперболического тангенса в виде отношения суммы и разности экспонент [25]. Модификация исходного выражения состоит в использовании числителя, умноженного на приложенное напряжение. Полученный при этом функционал, пригодный для описания зависимости тока светодиода I от приложенного напряжения U , имеет вид

$$I(U) = U \left(A_1 e^{B_1 U} + A_2 e^{-B_2 U} \right), \quad (3.6)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – числовые коэффициенты.

Экспоненциальные составляющие $e^{B_1 U}$ и $e^{-B_2 U}$ в (3.6) определяют вольт-амперную характеристику (ВАХ) светоизлучающих диодов при прямом и инверсном включении соответственно.

Коэффициенты B_1 и B_2 определяют угол наклона характеристик при положительном и отрицательном смещении соответственно.

Численные значения коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 определяются по экспериментально измеренным вольт-амперным характеристикам и уточняются по критерию минимума среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных данных.

Численные значения коэффициентов аппроксимации для четырех типов кристаллов с различными значениями рассеиваемой мощности P приведены в таблице 3.5.

Значения погрешности аппроксимации S не превышают приведенных в таблице значений в области рабочих токов, указанных в столбце «Условие», где $I_{\text{ном}}$ – справочное значение номинального тока СД.

Таблица 3.5 – Численные значения коэффициентов аппроксимации ВАХ кристаллов некоторых типов СД

Тип светодиода	P , Вт	A_1 , А	A_2 , А	B_1	B_2	УСЛОВИЕ	S , %
FYL3004URC	0,06	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$	7,86	1	$0,075 \cdot I_{\text{ном}} < I_{\text{Сид}} < I_{\text{ном}}$	11,5
KUWH 760s	0,1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1,9	0,2	$0,14 \cdot I_{\text{ном}} < I_{\text{Сид}} < I_{\text{ном}}$	14,5
KPWH 080-1	1	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	1,9	2	$0,285 \cdot I_{\text{ном}} < I_{\text{Сид}} < 2 \cdot I_{\text{ном}}$	14,7
KP2WH 080-2	2	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	1,1	2	$0,1 \cdot I_{\text{ном}} < I_{\text{Сид}} < 2 \cdot I_{\text{ном}}$	13,9

На рисунке 3.8 приведены вольт-амперные характеристики кристалла типа КРВН-080-1: экспериментальная (точки) и рассчитанная в соответствии с формулой (3.6) и данными таблицы 3.5 (сплошная линия).

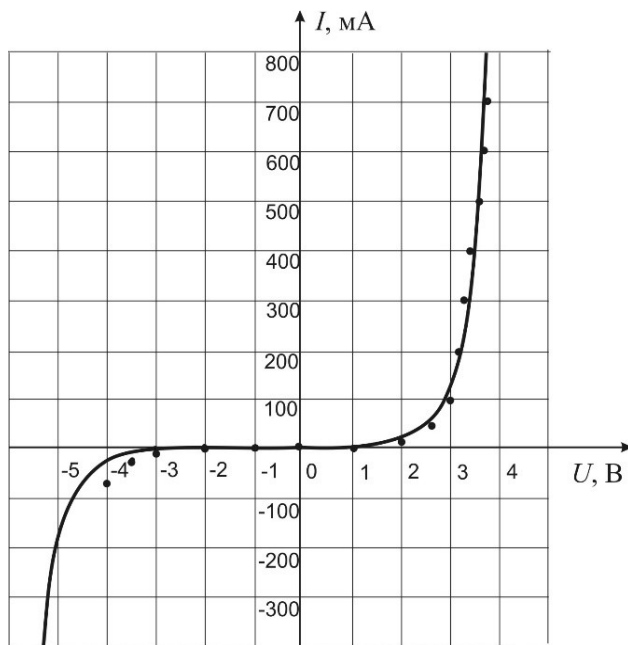


Рисунок 3.8 – Вольт-амперная характеристика кристалла светодиода типа КРВН-080-1

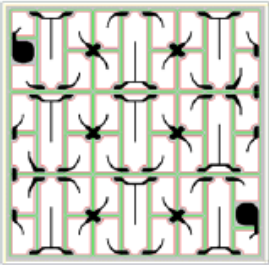
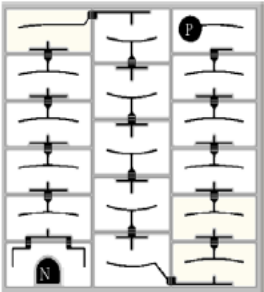
Аналитическое выражение (3.6) с использованием модифицированной функции гиперболического тангенса позволяет аппроксимировать вольт-амперные характеристики кристаллов светоизлучающих диодов и светодиодных излучающих элементов во всей области допустимых прямых и обратных напряжений. Погрешность аппроксимации не превышает 15 % в диапазоне рабочих токов.

3.3.10 Монолитные светодиодные матрицы

В таблице 3.6 приведены характеристики монолитных све-

тодиодных матриц.

Таблица 3.6 – Характеристики монолитных светодиодных матриц

Наименование параметра	Значение параметра	Внешний вид матрицы
Epistar ES-CABLAC55B		
Габаритные размеры, мкм ³	1400×1400×150	
Переменный ток, мА	10	
Переменное напряжение, В	82–98	
Мощность излучения, мВт	155–185	
Длина волны, нм	455–465	
Предельная температура р-п перехода, °С	115	
КПД при прямом токе 10 мА, %	15	
Epistar ES-AABLHV45B		
Габаритные размеры, мкм ³	1143×1143×150	
Прямой ток, мА	20	
Прямое напряжение, В	48–56	
Мощность излучения, мВт	340–420	
Длина волны, нм	455–465	
Предельная температура р-п перехода, °С	115	
КПД при прямом токе 10 мА, %	30	

3.4 Корпусирование светодиодов

Технологический процесс изготовления светодиодов включает технологические операции (ТО):

- 1) основные;
- 2) вспомогательные.

Последовательность основных технологических операций представлена на рисунке 3.9.

Краткое описание основных и вспомогательных технологических операций приведено ниже.

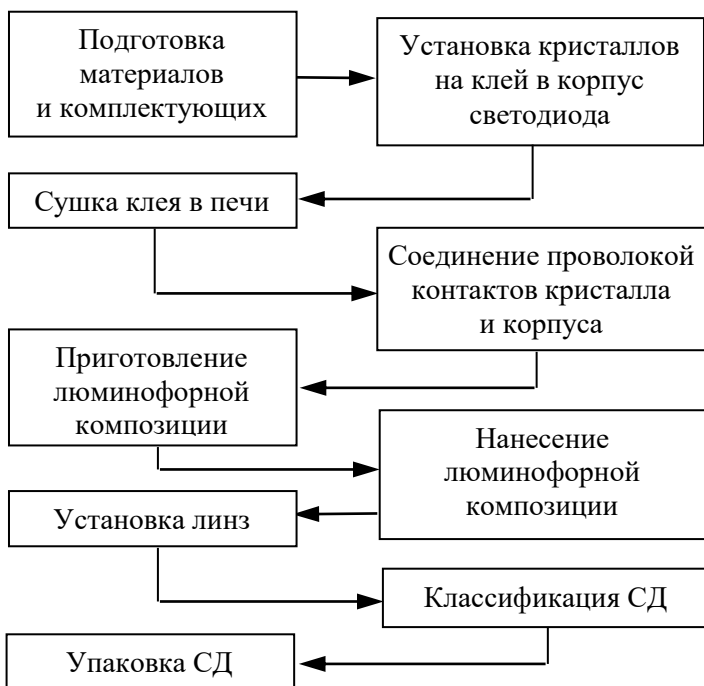


Рисунок 3.9 – Технологический процесс изготовления светодиода

Описание основных и вспомогательных операций технологического процесса изготовления светодиодов

1. Подготовка материалов и комплектующих

При необходимости проводится очистка рамок с корпусами СД, которая заключается в плазменной очистке.

2. Растяжка липкого носителя с кристаллами на пяльцах (вспомогательная технологическая операция (ТО)).

Кристаллы поступают на сборку светодиодов на липком носителе и липкий носитель необходимо растянуть, чтобы технологическое оборудование могло брать кристаллы по отдельности.

3. Подготовка клея (вспомогательная ТО)

Клей для монтажа кристаллов, как правило, двухкомпонентный, перед применением в технологическом оборудовании

необходимо смешать его компоненты.

4. Установка кристаллов на клей в корпус светодиода

Суть этой ТО (основной) заключается в нанесении клея в корпус светодиода и последующая установка кристалла на клей.

5. Сушка клея в печи (вспомогательная ТО)

Как правило, используются конвейерные печи с разными зонами температур, клей сушится в соответствии с температурным профилем, который рекомендует производитель.

6. Соединение проволокой контактов кристалла и корпуса

Известны два метода соединения проволокой контактов кристалла: термокомпрессионный и ультразвуковой. При изготовлении светодиодов обычно применяется ультразвуковой метод сварки, так как он меньше повреждает кристалл [26].

В системах ультразвуковой сварки высокочастотная электрическая энергия преобразуется в механические колебания в преобразователе. Частота генерируемого ультразвука составляет от 20 кГц до единиц мегагерц. Ультразвуковая металлическая сварка – это диффузионный процесс в твердом состоянии при одновременном воздействии на свариваемые поверхности ультразвуковых колебаний, прижимного давления и теплового воздействия. Колебания, приложенные под нагрузкой, разрушают поверхностные пленки и оксиды, образуя чистое контролируемое диффузионное сварное соединение. Происходит сухое и чистое трение, в результате которого образуются узлы схватывания. Атомы свариваемых деталей образуют между собой связи, что и создает такое соединение.

7. Контроль качества сварки проволокой

Контроль качества сварки (вспомогательная ТО) осуществляется визуально по диаметру точки сварного соединения, который должен составлять три толщины проволоки. В случае выявления некачественного сварного соединения ТО прекращается и качество сварки определяется механическим методом.

8. Приготовление люминофорной композиции

(вспомогательная ТО)

Компаунд имеет два компонента – основу и отвердитель. В композиции используется три люминофора: зелёный, основной жёлтый и красный. Смешивание компонентов люминофорной композиции осуществляется методом центрифугирования с

последующей дегазацией.

9. *Нанесение люминофорной композиции* (основная ТО)

Нанесение люминофорной композиции на светодиодный кристалл осуществляется экструзионным методом.

10. *Установка линз* (основная ТО).

11. *Классификация СД* (основная ТО)

СД классифицируются по электрическим, светотехническим и колориметрическим параметрам. При заданном значении прямого тока осуществляется контроль значений прямого напряжения, светового потока и коррелированной цветовой температуры.

12. *Упаковка СД.*

3.5 Материалы и компоненты для изготовления светодиодов

Основными материалами и компонентами для изготовления светодиодов являются:

- 1) клеи и пасты с высокой теплопроводностью для монтажа светодиодного кристалла;
- 2) люминофоры для светодиодов;
- 3) оптически прозрачные полимерные материалы для герметизации светодиодного кристалла.

3.5.1 Клеи и пасты с высокой теплопроводностью для монтажа светодиодного кристалла

Клей предназначен для монтажа кристаллов планарного и вертикального типа в корпус светодиода или на несущую конструкцию светодиодной матрицы. Клеи для монтажа светодиодных кристаллов можно разделить на следующие группы:

- 1) диэлектрические;
- 2) электропроводящие.

Проводящий клей представляет собой полимерную композицию, состоящую из полимерной матрицы, наполненной микрочастицами металла, как правило, серебра. Клей состоит из двух компонентов: основного и отвердителя. При смешивании этих компонентов получается вязкое вещество серого цвета.

Рассмотрим основные показатели качества клея, влияющие на технические характеристики светодиодов и светотехнических

устройств.

Плотность – отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму – определяется по формуле

$$\rho = m/V, \quad (3.7)$$

где ρ – плотность, кг/м³; m – масса, кг; V – объём, м³.

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

Вязкость – свойство текучих веществ оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Переход в стеклообразное состояние происходит при значениях вязкости 10¹¹–10¹² Па·с (1 паскаль в секунду = 1000 сантипуаз).

Динамическая вязкость определяется формулой Бачинского

$$n = c/(V_M - b), \quad (3.8)$$

где n – динамическая вязкость, Па·с; c и b – константы; V_M – молярный объём вещества.

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

Температура стеклования – температура, при которой не кристаллизующееся или не успевающее закристаллизоваться вещество становится твёрдым, переходя в стеклообразное состояние. Для клеев в микроэлектронике значение температуры стеклования составляет от 40 до 175 °С.

Прочность на сдвиг – разрушающая сила при растяжении склеенного внахлест образца усилиями, стремящимися сдвинуть одну половину образца относительно другой. Для клеев в микроэлектронике значение прочности на сдвиг составляет от 7 до 620 Н/см².

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

Модуль упругости определяется по закону Гука

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3.9)$$

где E – модуль упругости (1 МПа = 10 кгс/см²);

σ – механическое напряжение, вызываемое в образце действующей силой, Па;

ε – упругая деформация образца, вызванная напряжением.

Значения модуля упругости для некоторых материалов, используемых в электронике, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Примерные значения модуля упругости для материалов, используемых в электронике

Материал	E , МПа
Резина	5
Сталь	200000
Стекло	70000

Для клеев в микроэлектронике значение модуля упругости находится в интервале от 880 до 8800 ° МПа.

Теплопроводность – это способность материала передавать тепло от более нагретых частей к менее нагретым. Влияние теплопроводности материала на передачу тепла определяется формулой

$$P_{ab} = \lambda_{ab} (T_a - T_b), \quad (3.10)$$

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

λ_{ab} – теплопроводность, измеряется в единицах мощности, делённой на произведение единиц расстояния и температуры.

Значения теплопроводности для материалов, используемых в электронике, приведены в таблице 3.8.

В микроэлектронике для оценки способности конструкции отводить тепло от активной области кристалла используют следующие формулы для определения теплового сопротивления:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (3.11)$$

где P_e – мощность, рассеиваемая в данном компоненте; T_1 , T_2 – значения температуры двух тел или тела и среды (T_1 более высокая температура, чем T_2); R_t – тепловое сопротивление.

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

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (3.12)$$

где δ – толщина слоя, м; S – площадь слоя, м²; λ – теплопроводность вещества, Вт/м·К.

Для клеев в микроэлектронике теплопроводность составля-

ет от 2 до 50 Вт/м·К.

Таблица 3.8 – Значения теплопроводности для материалов, используемых в электронике

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

3.5.2 Люминофоры для светодиодов

Люминофор представляет собой порошок с частицами размера 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 Се. Материал Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, а Ga – в коротковолновую. Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450–465 нм электроны возбуждаются, переходя на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Основными механизмами работы люминофоров являются [27]:

1) *поглощение излучения люминесцентными центрами* (активаторами и примесями) – переход электронов на более высокие энергетические уровни либо отрыв электрона от активато-

ра, что приводит к образованию дырки;

2) **поглощение излучения основной люминофора**, вызывающее образование электронов и дырок. 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.

На рисунке 3.10 приведена примерная структура люминофоров типа YAG [28].

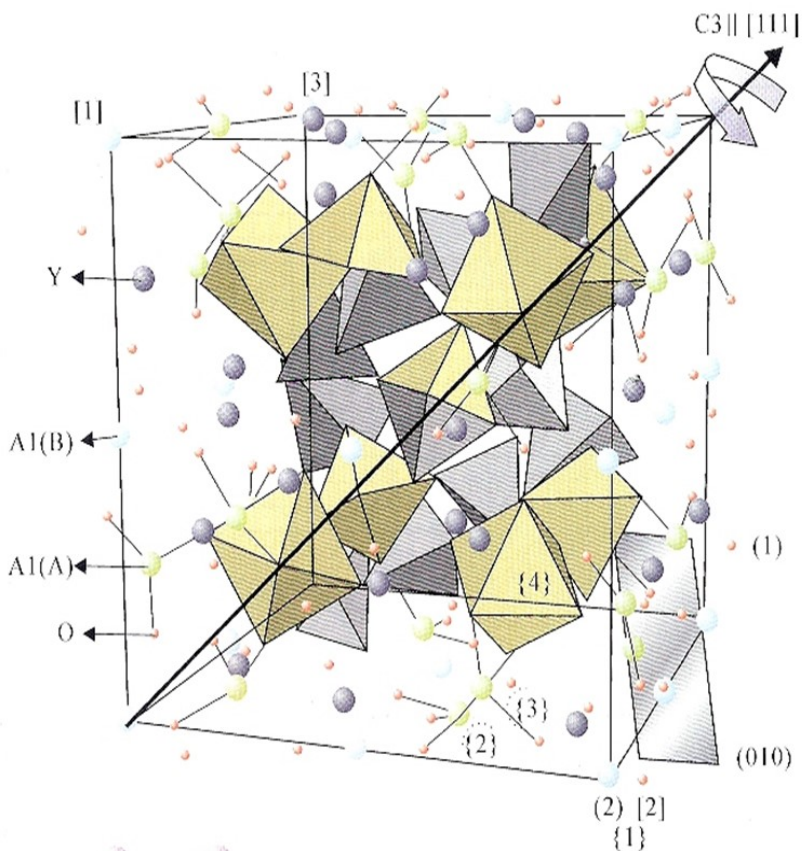


Рисунок 3.10 – Структура люминофора YAG

Для примера можно рассмотреть характеристики люмино-

форов производства [28], представленные в таблице 3.9).

Таблица 3.9 – Характеристики люминофоров

Материал	Характеристики люминофоров					
	Марка	Цвет	Координаты цветности		Спектральные характеристики	
			x	y	Спектр возбуждения, нм	Пиковая длина волны излучения, нм
Алюминаты	LMY-60-C	Светло-жёлтый	0,4250	0,5468	450–460	531
	LMY-65-C	Жёлтый	0,4458	0,5162	457,5–465	541
	LMY-70-C	Тёмно-жёлтый	0,4713	0,4931	465–470	550
Силикаты	LMS-520-B	Зелёный	0,2705	0,6229	380–450	520
	LMS-540-B	Светло-жёлтый	0,4137	0,5554	450–465	540
	LMS-550-B	Светло-жёлтый	0,4429	0,534	450–465	550
	LMS-560-B	Тёмно-жёлтый	0,4941	0,4927	450–467,5	560
	LMS-570-B	Оранжево-красный	0,5324	0,4569	450–520	570
	LMS-575-B	Оранжево-красный	0,5422	0,446	450–520	575
Нитридные	LAM-R-11600	Оранжево-жёлтый	0,612	0,3864	350–550	600
	LAM-R-11610	Светло-красный	0,6129	0,3853	350–550	610
	LAM-R-11618	Красный	0,6200	0,3789	350–550	618

Из данных таблицы 3.9 следует, что люминофоры, предлагаемые производителем для применения в светодиодах, разделяются по типам:

- нитридные (сдвиг максимума спектра в красную область);
- силикатные (сдвиг максимума спектра в оранжевую область);
- алюминаты (максимум спектра в жёлто-зелёной области);
- силикатно-алюминатные (сдвиг максимума спектра в зе-

лѐную и синюю области).

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

3.5.3 Оптически прозрачные полимерные материалы для герметизации светодиодного кристалла

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

Прозрачность – свойство вещества пропускать свет – характеризуется отношением величины потока излучения, прошедшего без изменения направления через слой среды единичной толщины, к величине потока излучения, вошедшего в эту среду в виде параллельного пучка (т. е. при исключении влияния поверхностей раздела). Прозрачность оценивается безразмерным коэффициентом пропускания.

Из кристалла светодиода может быть выведена лишь часть сгенерированного излучения. Коэффициент оптического вывода излучения, вышедшего за пределы кристалла светодиода, является характеристикой кристалла и просветляющего покрытия и определяется по формуле (2.1).

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:

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (3.13)$$

$$\rho = (n - 1)^2 / (n + 1)^2, \quad (3.14)$$

где n – показатель преломления.

$$I = I_0 \exp(-\alpha x), \quad (3.15)$$

где I_0 – интенсивность падающего света;

I – интенсивность света, прошедшего через материал с тол-

щиной x .

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

Единицей измерения электрической проводимости является Сименс (русское обозначение – См; международное – S), определяемый как $1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$, то есть, как электрическая проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом .

$$G = \sigma (S/L), \quad (3.16)$$

где G – удельная электрическая проводимость, См/м;

σ – удельная проводимость,

S – площадь поперечного сечения проводника,

L – длина проводника.

Значения удельной электрической проводимости при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ для материалов, используемых в электронике, приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Значения удельной электрической проводимости при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ для материалов, используемых в электронике

Материал	Удельная проводимость, См/м
Серебро	62 500 000
Медь	59 500 000
Золото	45 500 000
Алюминий	38 000 000
Магний	22 700 000
Иридий	21 100 000
Никель	11 500 000
Железо чистое	10 000 000
Платина	9 350 000
Олово	8 330 000

Электрическое сопротивление – способность тела препятствовать прохождению электрического тока. Единица измерения удельного сопротивления Ом·м. Удельное электрическое сопротивление определяется по формуле

$$\rho = (R S) / l, \quad (3.17)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление;

R – электрическое сопротивление;

S – площадь поперечного сечения проводника;

l – длина проводника.

Значения удельного электрического сопротивления при температуре +20 °С для материалов, используемых в электронике, приведены, в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Значения удельного электрического сопротивления при температуре +20 °С для материалов, используемых в электронике

Металл	Удельное электрическое сопротивление, ρ , Ом·мм ² /м
Серебро	0,015 ... 0,0162
Медь	0,01724 ... 0,018
Золото	0,023
Алюминий	0,0262 ... 0,0295
Иридий	0,0474
Никель	0,087
Железо	0,098
Платина	0,107
Олово	0,12

Для клеев в микроэлектронике значения удельного электрического сопротивления составляют $4,8 \cdot 10^{13}$ Ом·см для диэлектрических клеев и 16 мкОм·см для электропроводящих клеев.

4 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ

4.1 Конструкция светодиодов

Одними из первых получили распространение светодиоды с прозрачным корпусом и электрическими выводами (рисунок 4.1) [29].



Рисунок 4.1 – Светодиод в корпусе с выводами

Такие светодиоды изготавливаются на выводных рамках. На рамку монтируется светодиодный кристалл, затем рамка помещается в заливочную форму с эпоксидным компаундом и сушится. После сушки осуществляется разделение рамки на светодиоды и осуществляется контроль параметров каждого светодиода. По сути, линза из компаунда является корпусом светодиода.

Переход от светодиодов с выводными корпусами (тепловое сопротивление $250\text{--}75$ Вт/м·К) к светодиодам с корпусами для поверхностного монтажа (тепловое сопротивление $50\text{--}15$ Вт/м·К) намечился с 1999 года. Это позволило увеличить плотность монтажа светодиодов на печатную плату и применить автоматизированные средства технологического процесса производства светодиодных источников света. На рисунке 4.2 приведена фотография светодиода SMD 3528 [30].



Рисунок 4.2 – Светодиод
для поверхностного монтажа SMD 3528

В настоящее время для офисных светильников типа «Арм-стронг» в большей части используются светодиоды для поверхностного монтажа в металлопластмассовом корпусе SMD 5050 (рисунок 4.3) с тремя кристаллами (Refond, Seoul, Nichia) [31].



Рисунок 4.3 – Светодиод
для поверхностного монтажа SMD 5050

При изготовлении светотехнических устройств для уличного освещения и освещения больших территорий и площадей на основе полупроводниковых излучателей используются мощные одноваттные светодиоды белого цвета свечения [32]. Выбор светодиодов данного типа обусловлен их высокой световой отдачей (порядка 170 лм/Вт). На рынке широко представлены светодиоды для поверхностного монтажа, изготовленные на основе по-

лупроводниковых кристаллов из материала GaN/InGaN, залитые смесью люминофора с оптически прозрачным компаундом. Для изготовления мощных светодиодов применяются корпуса на кремниевой и керамической основах (металлокерамические) и металлопластмассовые.

Особо выделяются светодиоды в керамическом корпусе с габаритными размерами 5×5 мм Cree [33] (рисунок 4.4, *а*), Philips, Lumileds (рисунок 4.4, *б*) и светодиоды в металлопластмассовом корпусе (Lumileds, Semileds (рисунок 4.4, *в*) [34].

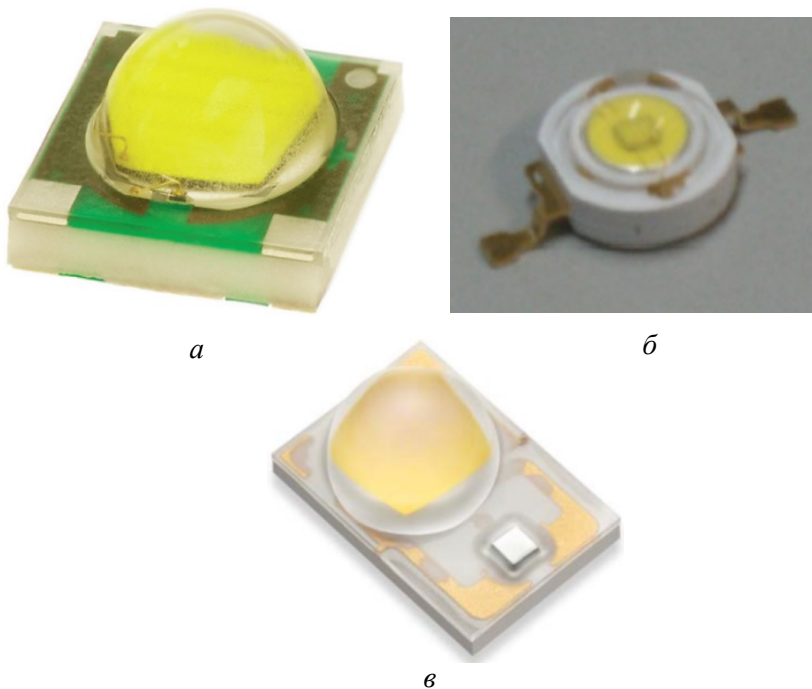


Рисунок 4.4 – Мощные светодиоды для поверхностного монтажа белого цвета свечения: *а, б* – в керамическом корпусе; *в* – в металлопластмассовом корпусе

Использование керамики для материала корпуса позволило снизить тепловое сопротивление светодиода до 5 К/Вт. На основе мощных светодиодов появилась возможность изготавливать светодиодные кластеры для компактных источников света (рисунок 4.5).

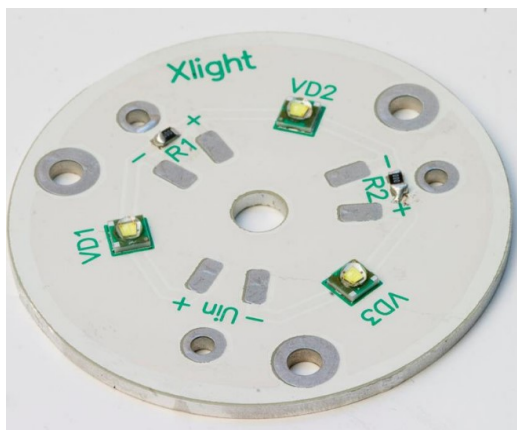
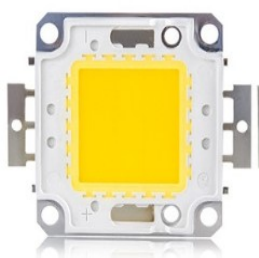


Рисунок 4.5 – Светодиодный кластер

Следующим шагом в развитии светодиодной светотехники стало появление светодиодных матриц (рисунок 4.6). Светодиодные матрицы можно разделить на две группы:

- 1) светодиодные матрицы, в которых на кристаллы нанесена сплошная люминофорная композиция (рисунок 4.6, *а, б*);
- 2) это светодиодные матрицы, в которых на каждый кристалл нанесена люминофорная композиция и имеется общая герметизация компаундом или линзой (рисунок 4.6, *в*).



а



б



в

Рисунок 4.6 – Светодиодные матрицы:
а, б – с общей люминофорной композицией;
в – люминофорная композиция нанесена на каждый кристалл
и сверху осуществлена герметизация конструкции светодиода линзой

Большим достижением в конструировании светодиодов стало появление в 2017 году светодиодов белого цвета свечения с рекордным значением светового потока с единицы площади – 284 лм/мм² – светодиод Cree XLamp XD16 (рисунок 4.7, *а*) [33]. Светодиоды изготовлены по технологии без корпуса. Появление светодиодов данного типа открыло возможность применения светодиодов в автомобильных фарах. Ряд ведущих производителей светодиодов анонсировали аналогичные светодиоды: Seoul Semiconductor [35] светодиоды WICOP (рисунок 4.7, *б*), Samsung светодиоды LM101B [36] (рисунок 4.7, *в*), Lumileds светодиоды LUXEON FlipChip White, Epistar [37], Nichia [38], Genesis Photonics [39].

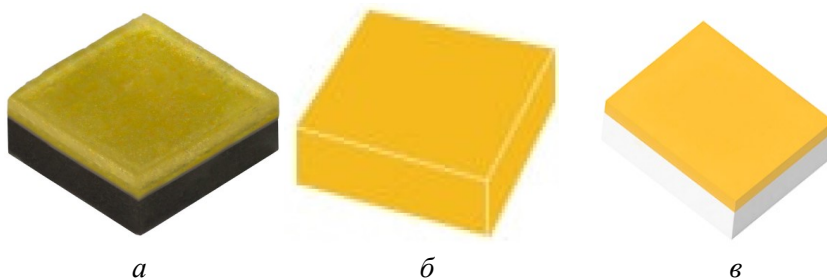


Рисунок 4.7 – Бескорпусные светодиоды:
а – Cree XLamp XD16; *б* – Seoul Semiconductor WICOP;
в – Samsung LM101B

4.2 Светодиоды белого цвета свечения

Известно, что для того чтобы человек воспринимал электромагнитное излучение оптического спектра как белый цвет, необходимо задействовать два рецептора человеческого глаза, т. е., достаточно смешать излучения синего и жёлтого цвета. На практике важен не только факт получения белого цвета, но и качество этого цвета. Количественными характеристиками качества источников белого цвета являются:

- индекс цветопередачи;
- цветовая температура;
- координаты цветности.

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

В современных СД в большинстве случаев используют кристалл синего цвета свечения и люминофор жёлтого свечения с полушириной спектра порядка 150 нм (рисунок 4.8). Это наиболее эффективный и дешёвый метод, так как КПД люминофора на основе *YAG* и *YGG* достигает 90 %. Для повышения индекса цветопередачи используют смесь люминофоров. В качестве базового используют указанную смесь люминофоров и добавляют в композицию красные и зелёные люминофоры (нитридные и силикатные).

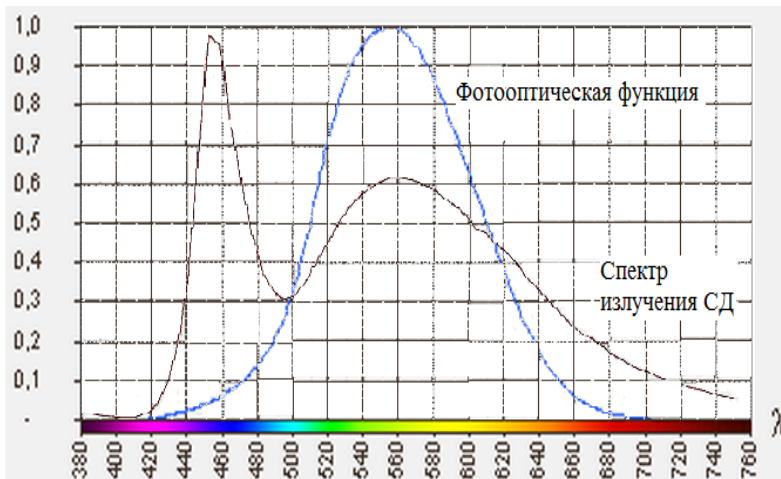


Рисунок 4.8 – Относительная чувствительность глаза и спектр излучения типового белого светодиода

Световая отдача светодиода является основной характеристикой эффективности светодиода и определяется как отношение излучаемого светового потока Φ_v к затраченной электрической мощности, определяемой произведением протекающего тока I и напряжения на светодиоде U :

$$n = \Phi_v / (I \times U). \tag{4.1}$$

Значение светового потока определяется с учетом фотооптической функции человеческого глаза, изображенной на рисунке 4.8, по формуле

$$\Phi_v = 683 \int_{\lambda} P(\lambda) K(\lambda), \quad (4.2)$$

где $P(\lambda)$ – спектральная плотность мощности излучения;

$k(\lambda)$ – коэффициент чувствительности человеческого глаза к оптическому излучению с длиной волны λ ;

683 – коэффициент нормировки [лм/Вт].

Связь световой отдачи СД и люминофора выражается по формуле

$$[(x_w - x_b)^2 + (y_w - y_b)^2]^{1/2} n_b = [(x_w - x_e)^2 + (y_w - y_e)^2]^{1/2} n_e, \quad (4.3)$$

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 (4.3) следует, что на графике цветов международной комиссии по освещению (МКО) (рисунок 4.9) можно провести линию, 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 (4.3) 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 [20].



Рисунок 4.9 – Диаграмма цветности в системе x, y (МКО-31)

Герметизация СД может осуществляться по четырём основным технологиям (рисунок 4.10):

1) отражатель с кристаллом до краёв заполняют смесью люминофора и компаунда (рисунок 4.10, а);

2) люминофор наносят непосредственно на поверхность кристалла (рисунок 4.10, б);

3) отражатель с кристаллом заполняют прозрачным компаундом и на его поверхности или в верхней части отражателя наносят слой смеси люминофора и компаунда (рисунок 4.10, в);

4) на пути вывода излучения синего свечения размещают пластину с люминофором, при этом между кристаллом и пластиной существует воздушный зазор (рисунок 4.10, г).

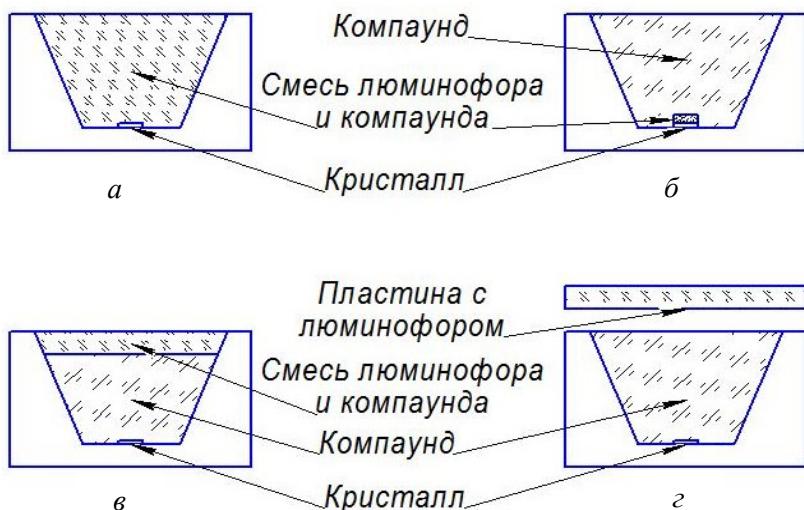


Рисунок 4.10 – Способы герметизации СД

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. Если люминофор удалить от кристалла на расстояние, превышающее поперечное сечение кристалла, то можно повысить световую отдачу СД на 20–30 % [13].

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. Использование такой технологии, как правило, для каждой конструкции уникально, так как глубина отражателя, размер кристалла или количество кристаллов могут отличаться. Поэтому для каждого типа СД требуется проведение исследований для определения оптимальных соотношений компаунда и люминофорной композиции по толщине.

4.3 Светотехнические, электрические и эксплуатационные параметры светодиодов

К основным параметрам и характеристикам светодиодов относятся:

- 1) значение светового потока Φ (лм) при заданном значении прямого тока;
- 2) пространственное распределение силы света;
- 3) световая отдача;
- 4) коррелированная цветовая температура;
- 5) координаты цвета;
- 6) тепловое сопротивление;
- 7) средняя наработка до отказа.

4.3.1 Световой поток

Световой поток источников света измеряется в фотометрическом шаре. **Фотометрический шар** – полый шар, внутренняя поверхность которого представляет собой неселективный диффузный отражатель. Метод основан на сравнении освещенности, создаваемой измеряемым источником света, с освещенностью, создаваемой контрольной (светоизмерительной) лампой по ГОСТ 10771 [40] с известным световым потоком. Источник света, светоизмерительная или контрольная лампы должны иметь близкие цветовые или коррелированные цветовые температуры, световые потоки и распределения силы света.

Зависимость значений светового потока СД от прямого тока прямо пропорциональна и иллюстрируется рисунком 4.11.

4.3.2 Пространственное распределение силы света

Пространственное распределение силы света характеризуется значениями силы света данного источника в зависимости от направления в пространстве, представленных в графической или табличной формах. Также используется термин «кривая силы света – КСС». Пространственное распределение силы света измеряется с помощью **гониофотометра** – установки для измерения углового распределения силы света.

Функциональная схема гониофотометра приведена на рисунке 4.12.

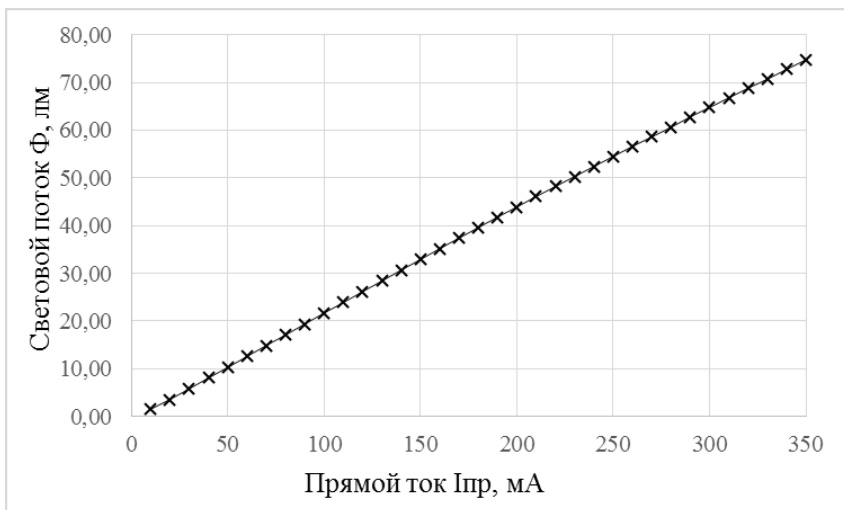


Рисунок 4.11 – Зависимость светового потока от прямого тока

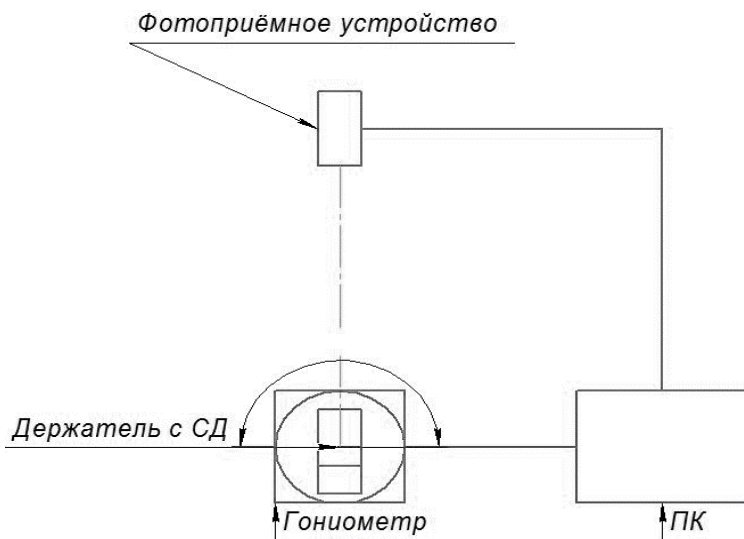


Рисунок 4.12 – Функциональная схема гониофотометра

4.3.3 Световая отдача

Световая отдача – отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света. Световая отдача определяется по формуле

$$n = \Phi / P, \quad (4.3)$$

где n – световая отдача, лм/Вт;

Φ – световой поток, лм;

P – потребляемая электрическая мощность, Вт.

Типовая зависимость световой отдачи от прямого тока приведена на рисунке 4.13.

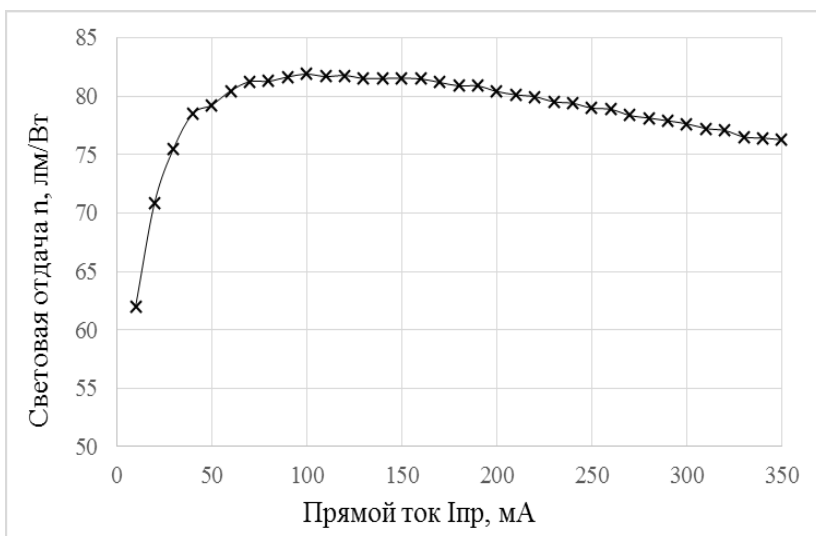


Рисунок 4.13 – Типовая зависимость световой отдачи от прямого тока СД

Максимальное значение световой отдачи достигается при малых значениях тока, что объясняется минимальным значением электрической мощности и, соответственно, минимальными значениями температуры кристалла и люминофора.

Максимально возможное значение световой отдачи белого светодиода составляет 250–300 лм/Вт [41]. Промышленность предлагает светодиоды со световой отдачей до 170 лм/Вт [33-39].

4.3.4 Коррелированная цветовая температура и координаты цвета

Коррелированная цветовая температура $T_{КЦ}$ (К) – температура черного тела, при которой координаты цветности его излучения близки в пределах заданного допуски к координатам цветности рассматриваемого излучения на цветовом графике МКО.

Зависимость коррелированной цветовой температуры кристалла от температуры окружающей среды приведена на рисунке 4.14 [42].

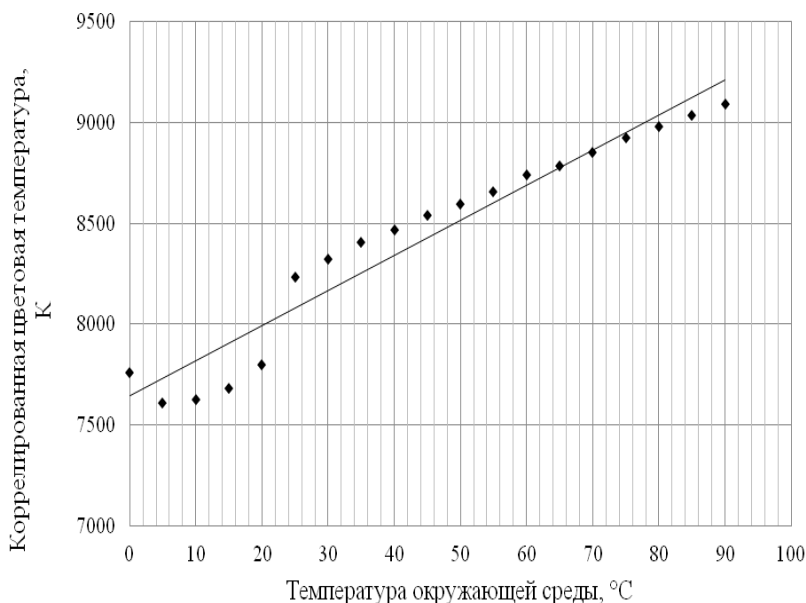


Рисунок 4.14 – Зависимость коррелированной цветовой температуры кристалла от температуры окружающей среды

Координаты цвета – количество трех основных цветовых стимулов в трехцветной колориметрической системе, необходимое для уравнивания по цвету с измеряемым цветом.

Зависимость координат цветности СД от температуры окружающей среды приведена на рисунке 4.15.

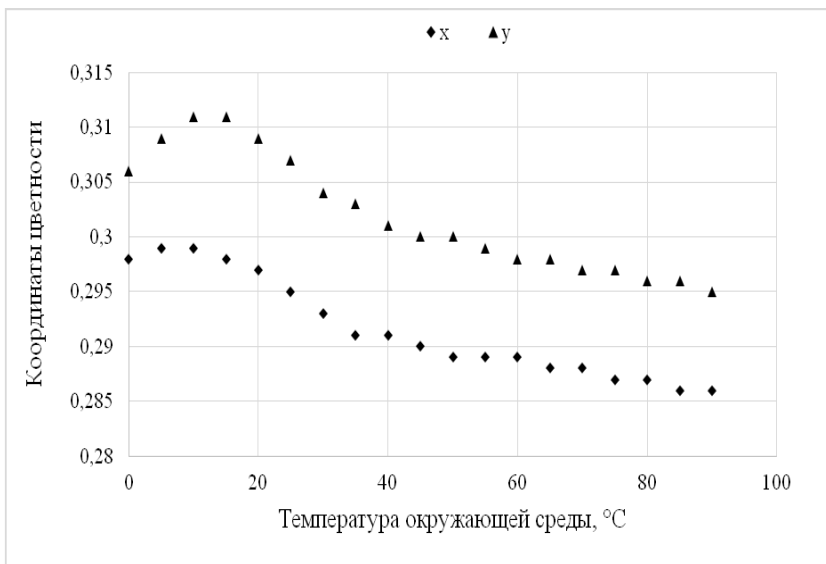


Рисунок 4.15 – Зависимость координат цветности от температуры окружающей среды

4.3.5 Тепловое сопротивление

Основным параметром, который характеризует 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. Компаунд имеет очень низкую теплопроводность по сравнению с другими элементами (не более 0,1 Вт/м×К), поэтому считается, что всё тепло отводится через подложку кристалла, клей и корпус СД. Для каждого слоя тепловое сопротивление определяется по формуле (3.12).

Оценку значения теплового сопротивления осуществляют, используя соотношение (3.11).

На рисунке 4.16 показано совершенствование конструкций

светодиодов по значениям их теплового сопротивления [13]. Чем выше мощность светодиода, тем меньшим тепловым сопротивлением должна обладать его конструкция. Для индикаторных светодиодов тепловое сопротивление не играет большой роли, а для мощных светодиодов тепловое сопротивление влияет как на надёжность, так и на эффективность в условиях эксплуатации.

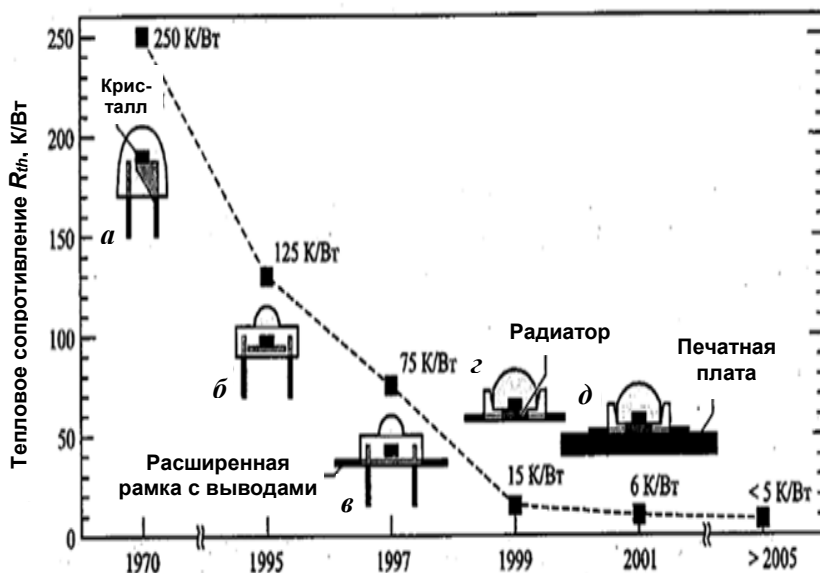


Рисунок 4.16 – Тепловое сопротивление корпусов светодиодов:
a – «рамка 5 мм»; *б* – «рамка с низким профилем»;
в – с низким профилем и расширенной рамкой; *з* – с радиатором;
д – с радиатором, смонтированным на печатной плате

Тепловое сопротивление современных промышленных образцов СД составляет 10-3 К/Вт [33-39].

4.3.6 Средняя наработка до отказа

Одним из важных параметров, характеризующих срок службы светодиодов является численное значение средней наработки до отказа. Важной отличительной особенностью светодиодов от других источников света является то, что срок службы самой гете-

роструктуры, излучающей свет, измеряется десятками и сотнями тысяч часов. Очевидно, что провести испытания светодиода просто, включив определенное количество изделий и зафиксировав время до наступления отказа, не представляется возможным, так как, например, сто тысяч часов – это 11,5 лет непрерывной работы. В этом случае применяют метод ускоренных испытаний.

Например, зная, что срок службы лакокрасочного покрытия для наружных работ определяется воздействием ультрафиолетового излучения в спектре солнечного света, можно провести ускоренные испытания, поместив образец под ультрафиолетовую лампу. Определив, что при ускоренных испытаниях срок службы составил t_y часов, можно определить расчетное значение срока службы $t_{ном}$ по формуле

$$t_{ном} = t_y \times K_y, \quad (4.4)$$

где K_y – коэффициент форсирования ускоренных испытаний.

Таким образом, для проведения ускоренных испытаний необходимо знать физический фактор, определяющий ускоренное старение, численное значение коэффициента форсирования и критерий отказа.

Если для ламп накаливания отказом, как правило, является разрушение спирали и прекращение свечения, то для полупроводниковых приборов более характерным является плавное ухудшение значений параметров. В связи с этим при испытаниях светодиодов отказом считают снижение светового потока на 50 % от начального значения [43].

Для электронных устройств универсальным физическим фактором, ускоряющим деградационные механизмы, является повышенная температура окружающей среды [42].

С учетом вышесказанного **проведение испытаний** осуществляется в определенной последовательности.

1. **Определение коэффициента ускорения** K_y ускоренных испытаний. Для этого определяют температуру p - n -перехода и значение энергии активации по результатам ступенчатых температурных испытаний, строят зависимость светового потока от температуры p - n -перехода, по данной зависимости определяют температуру p - n -перехода, при которой световой поток соответствует 50 % от начального значения, вычисляют коэффициент

ускорения.

2. **Проведение ступенчатых испытаний**, которые включают следующие операции:

а) измеряется световой поток объекта испытаний;

б) объекты испытаний помещаются в климатическую камеру, в которой устанавливают первую повышенную температуру T_1 , выдерживают в течение 4 ч, вынимают из климатической камеры, остужают до комнатной температуры и измеряют значение светового потока;

в) повторяется операция, приведенная в п. (б), при этом фиксируют время нахождения в тепловой камере, после которого значение светового потока уменьшится на 20 % (t_{20}) относительно исходного. Заканчивают испытания, когда значение светового потока уменьшится на 50 % (t_{50}) относительно исходного;

г) повторяются п.п. (б) и (в), при этом установив в климатической камере вторую повышенную температуру T_2 , большего значения чем первая;

3. **Вычисление коэффициента ускорения испытаний** K_y для наблюдаемого процесса старения по формуле

$$K_y = \frac{t_{150}}{t_{250}} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]\right), \quad (4.5)$$

где t_{150} , t_{250} – среднее время наработки на отказ при температуре T_1 , T_2 соответственно;

T_1 , T_2 – значения температуры соответственно;

E_a – энергия активации отказов;

k – постоянная Больцмана, равная $8,617 \times 10^{-5}$ эВ/К.

Энергия активации отказов E_a определяется методом ступенчатых испытаний в соответствии с ОСТ11-336.938-83 [43]. Значение энергии активации рассчитывается по формуле

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times ((\ln t_a - \ln t_b) / ((10^3 / T_A) - (10^3 / T_b))), \quad (4.6)$$

где $\ln t_a$ и $\ln t_b$ – логарифм времени наработки до отказа в точке (а) и в точке (б);

T_A и T_b – температура p - n перехода в момент отказа СД.

Для некоторых соединений численные значения E_a приведены в таблице 4.1 [8].

Таблица 4.1 – Энергия активации светоизлучающих структур

Тип структуры	GaAlAs	GaInN	GaP
Энергия активации, эВ	0,56–0,65	0,85–0,95	0,65–0,70

4. *Определение значения наработки до отказа*, определяемого по методу ускоренных испытаний $t_{\text{уи}}$ из решения уравнения

$$\frac{t_{\text{уи}}}{t_{250}} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_2} \right]\right), \quad (4.7)$$

где T_0 – температура p - n -перехода при значении температуры окружающей среды 20 °С.

5 ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОДИОДОВ

5.1 Светодиодные лампы и светильники

Рынок источников света можно разделить на два сегмента:

- 1) сегмент бытового освещения;
- 2) сегмент коммерческого освещения.

В коммерческом сегменте доминирующие позиции занимают светильники, в сегменте бытового освещения основным источником света традиционно являются лампы: накаливания, компактные люминесцентные, галогенные, светодиодные.

5.1.1 Светодиодные лампы

Лампы на единичных светоизлучающих диодах

Светодиодные лампы – это современные твердотельные источники света. Светодиодные лампы представляют собой технические устройства, состоящие из следующих основных конструктивных элементов:

- светодиоды;
- источник питания;
- цоколь;
- корпус;
- радиатор,
- оптическая система из отражателя и рассеивателя.

К отличительным особенностям такого светодиодного источника света относятся: форма рассеивателя, отражателя и радиатора, а также устройство светодиодного модуля.

Светодиодные модули для светодиодных ламп выполняются либо на дискретных светодиодах, либо на светодиодах, выполненных по технологии «чип на плате».

Таким образом, **светодиодная лампа** представляет собой конструкцию, которая в одном корпусе соединяет (рисунок 5.1):

- 1) полупроводниковый источник излучения света;
- 2) оптическую систему;
- 3) радиатор для отвода излишков тепла;
- 4) блок питания.



Рисунок 5.1 – Составные части светодиодной лампы

Светодиодные лампы классифицируются по различным видам:

- 1) по способу получения белого света;
- 2) по используемым компонентам;
- 3) по виду рассеивателя;
- 4) по виду цоколей;
- 5) по используемым светодиодам.

1. **По способу получения белого света** светодиодные лампы подразделяются на лампы, которые используют:

– светодиоды белого света системы «синий чип – жёлтый люминофор». При этом люминофор может быть нанесён непосредственно на чип или удалён от него на некоторое расстояние, например, путём введения люминофора в пластик;

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

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

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

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

2. По используемым компонентам светодиодные лампы выделяют:

– светодиодные лампы на единичных светодиодах;

– светодиодные лампы на интегрированной системе «чип на плате».

3. По виду рассеивателя светодиодные лампы выделяют:

– светодиодные лампы с полупрозрачным рассеивателем, использующие белые светодиоды, свет которых отражается от внутренних стенок рассеивателя и перемешивается, что особенно важно при использовании в одном светодиодном модуле светодиодов белого и красного цвета излучения; в этом случае рассеиватель служит смешивающей камерой;

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

4. По виду цоколей различают светодиодные лампы, в которых используются:

винтовые цоколи;

двухштырьковые цоколи.

Винтовые цоколи предназначены для винтового соединения с патроном. Различия заключается в диаметре, который определяет название основных видов цоколей (цифра означает диаметр в миллиметрах): E27 (самый распространенный цоколь), E14, E40, E10, E12 и др. (рисунок 5.2). E40 – самый редкий тип винтовых цоколей светодиодных ламп, применяемый в основном для освещения улиц и производственных помещений; E10/E12 – цоколи, используемые для ночников и бытовых приборов.



Рисунок 5.2 – Сравнительные размеры винтовых цоколей ламп

Двухштырьковые цоколи. Цоколи светодиодных ламп, имеющие подобный разъем, легко отличить по характерным особенностям наконечников (рисунок 5.3).

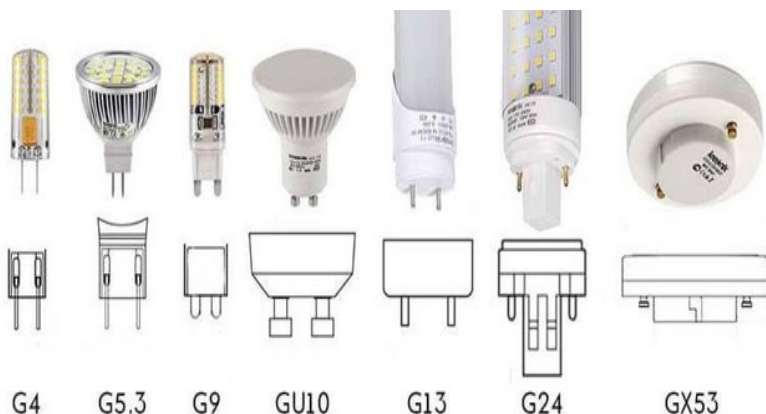


Рисунок 5.3 – Разновидности двухштырьковых цоколей светодиодных ламп

Цоколь GU10 отличается от других наличием на концах штырьков своеобразных утолщений. Подобные разновидности устанавливаются в поворотные светильники

Цоколь GU5.3 – один из самых распространенных цоколей светодиодных ламп, которые пришли на смену галогенным лампам с таким же цоколем. Светильники с этим цоколем наиболее часто используются в подвесных и многоуровневых потолках. Самыми миниатюрными из двухштырьковой серии являются лам-

пы со стеклянным цоколем G4. Цоколь G5 имеет место в трубчатых люминесцентных лампах, у которых диаметр колбы равен 12,5 или 16 мм. В быту используется редко.

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

5. По используемым светодиодам различают следующие виды ламп:

- 1) «кукуруза»;
- 2) лампы со светодиодным излучателем «чип на плате»;
- 3) лампа со светодиодным излучателем МСОВ.

В светодиодных лампах используются различные типы светодиодов. В первых светодиодных лампах использовались обычные **светодиоды в пластиковом корпусе**. Такие лампы получили название «кукуруза» за визуальное сходство с кукурузным початком (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Светодиодная лампа серии «кукуруза»

В настоящее время светодиоды в корпусах используются в лампах редко, и как правило, это мощные светодиоды. В большинстве современных ламп применяют бескорпусные светодиоды и светодиодные сборки. В последнее время всё чаще используются **светодиодные излучатели «чип на плате»** (рисунок 5.5), в которых множество светодиодов покрыты единым люминофором.

Разновидность конструкции «чип на плате» – светодиодные линейные излучающие элементы, нити (led filament), в которых множество светодиодных кристаллов размещено на металлической, стеклянной или сапфировой подложке. Вся конструкция окуплена люминофорной композицией.



Рисунок 5.5 – Светодиодные лампы со светодиодным излучателем «чип на плате»

Ещё одна технология – *Crystal Ceramic MCOB*. На пластине из прозрачной керамики располагается множество светодиодов (рисунок 5.6). Пластина с обеих сторон покрывается люминофором, поэтому такой излучатель практически равномерно светит во все стороны.



Рисунок 5.6 – Светодиодная лампа со светодиодным излучателем MCOB

Представленные на рынке светодиодные лампы по своей форме и размерам максимально приближены к лампам накаливания. Во многом это связано с устоявшимся мнением потребителей, за более чем 150-летнюю историю ламп накаливания, что это оптимальная форма для источника света. Вторая не менее важная причина связана с наличием у потребителей светильников, сконструированных специально для установки в них ламп накаливания. Именно второй фактор до последнего времени являлся одним из сдерживающих факторов в продвижении светодиодных ламп, так как конструкция, состоящая из цоколя, массивного радиатора и рассеивателя, внутри которой находилась плата со светодиодами, давала возможность излучать свет в пределах 120–200 градусов вдоль продольной оси лампы. Установка таких

ламп в обычный светильник, несмотря на все плюсы, связанные с энергосбережением, могла вызывать негативное восприятие у потребителей из-за отсутствия привычного для их восприятия «света вокруг», который излучает лампа накаливания. К тому же значительный вес радиатора мог вызвать перекокс частей люстр, рассчитанных на использование легких ламп накаливания.

Лампы со светодиодными излучающими элементами

Настоящим прорывом на рынке светодиодных ламп стало появление конструкции с использованием линейных излучающих элементов. Эти лампы визуально максимально приближены по форме и весу к лампам накаливания. На рисунке 5.7 представлены фотографии ламп с использованием линейных излучающих элементов.



Рисунок 5.7 – Светодиодные лампы на линейных излучающих элементах

Конструктивные особенности лампы с линейными излучающими элементами иллюстрируются рисунком 5.8 [8].

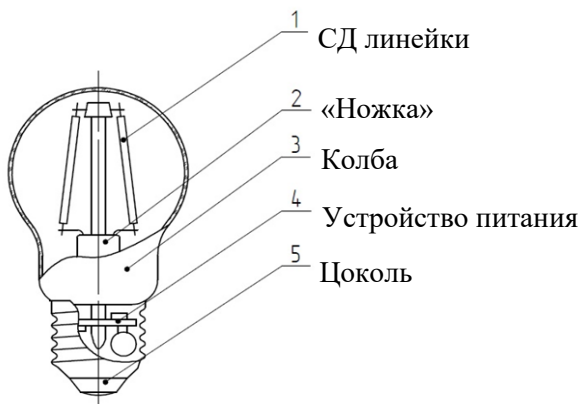


Рисунок 5.8 – Схематичное изображение лампы светодиодной

5.1.2 Требования к светодиодным лампам

Требования к светодиодным лампам установлены в ГОСТ 54815 [44]:

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

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

– коррелированная цветовая температура (КЦТ) должна иметь значение из следующего ряда:

– 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, $x = 0,463$, $y = 0,420$).

Приводятся данные на момент наработки 25 % от номинального срока службы с максимумом 6000 ч:

– индекс цветопередачи не должен измениться более чем на 5 единиц при наработке 25 % от номинального срока службы с максимумом 6000 ч;

– срок службы лампы определяется коэффициентом сохраняемости светового потока.

Снижение значения светового потока к 6000 ч от номинального значения при 0 ч составляет:

– не более 10 % – коэффициент сохраняемости светового потока 90 %, категория А;

– не более 20 % – коэффициент сохраняемости светового потока 80 %, категория В;

– не более 30 % – коэффициент сохраняемости светового потока 70 %, категория С;

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

– не более 50 % – коэффициент сохраняемости светового потока 50 %, категория Е.

Рекомендуется измерять коэффициент сохраняемости светового потока каждые 1000 часов.

Испытание на долговечность встроенного устройства питания проводится двумя методами:

1) испытание на циклическое изменение температуры (1 ч при -10° , 1 ч при $+40^{\circ}$; пять циклов);

2) 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.

5.1.3 Светоизлучающий элемент

Светоизлучающий элемент состоит из металлической несущей конструкции (НК), на которую приклеены 28–30 кристаллов из нитрида галлия.

Кристаллы последовательно соединены проволокой методом ультразвуковой сварки, на кристаллы нанесена люминофорная композиция (ЛК) из оптически прозрачного компаунда и порошка люминофора жёлто-зелёного и красного цвета свечения (рисунок 5.9)

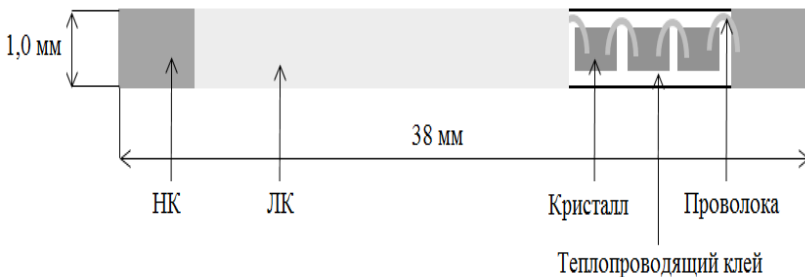


Рисунок 5.9 – Схематическое изображение светодиодного излучающего элемента

На рисунке 5.10 приведены экспериментально измеренные вольт-амперные характеристики светодиодного излучающего элемента в зависимости от температуры [42].

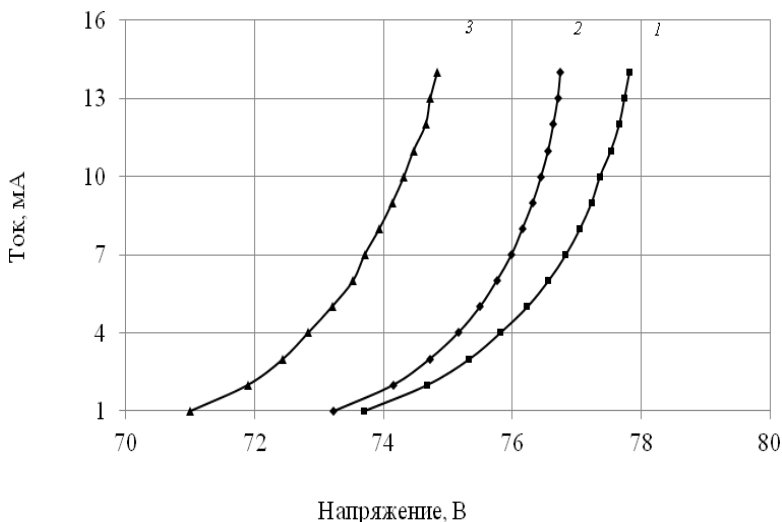


Рисунок 5.10 – Зависимость тока от напряжения при разных значениях температуры: 1 – 0°C; 2 – 25 °С, 3 – 85 °С

На рисунке 5.11 приведено сравнение экспериментально измеренной (точки) вольт-амперной характеристики светодиодного излучающего элемента при температуре 25 °С [42] и рассчитанной по формуле (3.6) (сплошная кривая) в среде математического моделирования Mathcad функцией при значениях параметров:

$$A_1 = 10^{-30} \text{A}; A_2 = 10^{-16} \text{A}; B_1 = 0,789; B_2 = 0,09.$$

Погрешность аппроксимации не превышает 10 % в рабочей области токов 2–15 мА.

Таким образом, представленная в разделе 3 электрическая модель кристалла пригодна для моделирования и электрических параметров светодиодного излучающего элемента.

Светодиодный излучающий элемент (см. рисунок 5.9) представляет собой линейную матрицу кристаллов. Для выравнивания температурного режима кристаллов в линейке необходимо расположить их на подложке в определенном порядке. Подложка характеризуется размерами $l \times k \times t$ (рисунок 5.12) [45].

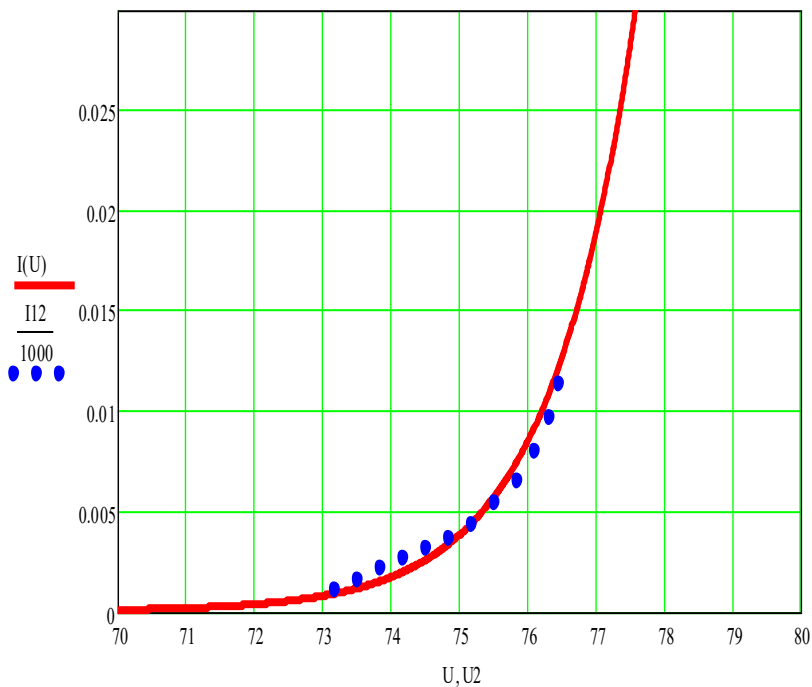


Рисунок 5.11 – Экспериментально измеренная (точки) и рассчитанная по формуле (3.6) (сплошная кривая) вольт-амперная характеристика светодиодного излучающего элемента

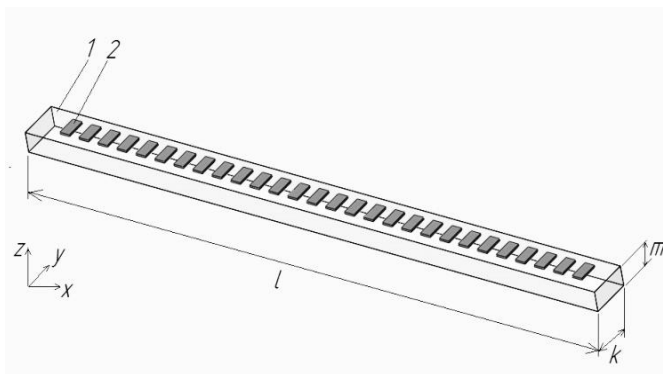


Рисунок 5.12 – Подложка с кристаллами

Структура подложки – изотропная. Источниками тепла являются N светодиодных кристаллов, расположенных на верхней стороне подложки в областях:

$$x_{i1} \leq x_i \leq x_{i2}; \quad y_{i1} \leq y_i \leq y_{i2}; \quad m \leq z_i \leq (m + h_{\text{КР}}),$$

где x_{i1}, x_{i2} – габаритные координаты по оси абсцисс;

y_{i1}, y_{i2} – габаритные координаты по оси ординат;

$h_{\text{КР}}$ – высота кристалла.

Условия теплопередачи – конвективный теплообмен. Процесс теплопередачи можно записать в виде уравнения теплопроводности в частных производных:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\sum_{i=1}^N q_i(x_i, y_i)}{m}, \quad (5.1)$$

где c – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности;

q_i – тепловой поток i -го кристалла.

Распределение плотности теплового потока в сборочной единице неравномерно и подчиняется закону:

$$q_i(x_i, y_i) = \begin{cases} \frac{P_i}{(x_{i2} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1})}, \\ 0, \text{ вне кристалла,} \end{cases} \quad (5.2)$$

где P_i – мощность тепловыделения i -ого кристалла.

На поверхностях подложки действуют граничные условия третьего рода:

$$\left[\mp \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0,l} = \alpha (T_{\text{СР}} - T); \quad \left[\mp \frac{\partial T}{\partial y} \right]_{y=0,k} = \alpha (T_{\text{СР}} - T);$$

$$\left[\mp \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z=0,m} = \alpha (T_{\text{СР}} - T), \quad (5.3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

$T_{\text{СР}}$ – температура окружающей среды.

Начальное условие процесса теплопередачи:

$$T \Big|_{\tau=0} = T_0(x, y, z). \quad (5.4)$$

Обозначим температуру, соответствующую геометрическому центру посадочного места кристалла на подложке как υ_i , причем

$$\upsilon_1 \neq \upsilon_2 \neq \dots \neq \upsilon_i \neq \dots \neq \upsilon_N.$$

Предположим, что размещение светодиодных кристаллов происходит на одном уровне по координате y : $y_1 = y_2 = \dots = y_i = \dots = y_N$.

Тогда неизвестная функция (1) будет зависеть только от координаты x : $Loc(x_i, y_i) = Loc(x_i, y \Big|_{const}) = Loc(x_i)$.

Как было отмечено выше, наличие температурного профиля по длине подложки обусловлено конечным значением коэффициента теплопроводности λ и условиями конвективного теплообмена. Количественно температурный профиль по длине подложки может быть оценен с помощью формулы кривизны для плоской линии применительно к характерной точке профиля x :

$$K = \frac{\left| \frac{d^2 \upsilon}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\upsilon}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}}. \quad (5.5)$$

Для отыскания неизвестной функции локализации $Loc(x_i)$ применен метод дихотомии [45]. Первый шаг дихотомии – деление длины подложки на две равные части, поскольку температурный профиль для изотропного тела с эквидистантно расположенными источниками тепла имеет симметричный вид.

Центральная точка имеет координату:

$$x_c = \frac{x_0 + x_l}{2}, \quad (5.6)$$

где x_0 – начало координат по оси абсцисс; x_l – длина подложки.

Дальнейшие рассуждения будем вести для правой половины подложки. Новое начало совпадает с точкой x_c : $x'_0 = x_c$. На отрезке

$[x'_0; x_l]$ будет располагаться $N' = \frac{N}{2}$ кристаллов. Пусть для дальней-

ших шагов коэффициент дихотомии $Coeff$ будет значением из диапазона [1.1 ... 2.0], т. е. от 10 % до 100 %. Цикличность метода дихотомии предполагает, что можно составить рекуррентную

формулу процесса локализации кристаллов. Приращение шага для локализации очередного кристалла i есть величина

$$h'_i = \text{Coeff} \cdot \frac{x_i - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (5.7)$$

Локализация очередного кристалла i будет в координате:

$$x_i = x_{i-1} + \text{Coeff} \cdot \frac{x_i - x_{i-1}}{(N' - i) + 1}. \quad (5.8)$$

Полученный результат можно охарактеризовать как функцию локализации, зависящую от аргумента i и от параметра Coeff :

$$x_i = \text{Loc}(i, \text{Coeff}),$$

где i – номер кристалла; $i \in [2; N']$; $\text{Coeff} \in [1, 1 \dots 2, 0]$ – коэффициент дихотомии.

Проведем анализ функции (5.2). Обозначим константы, входящие в (5.5), как $C_1 = x_{i-1}$; $C_2 = x_i$; $C_3 = N' + 1$. Тогда функция локализации будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Loc}(i, \text{Coeff}) = C_1 + \text{Coeff} \cdot \frac{C_2 - C_1}{C_3 - i}. \quad (5.9)$$

Полученный вид функции свидетельствует о ее принадлежности к классу гипербол вида (рисунок 5.13): $y = a + \frac{b}{c - x}$.

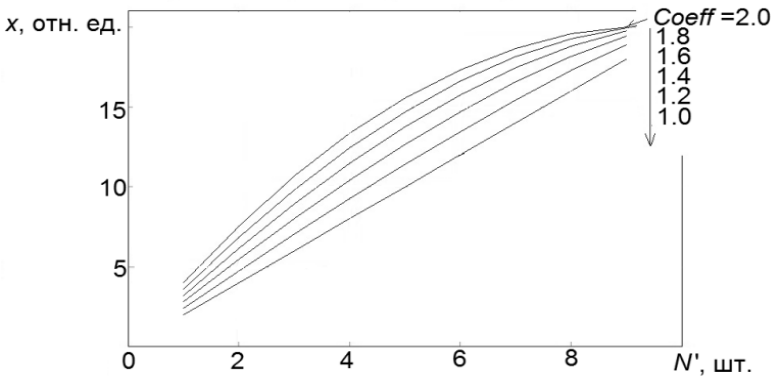


Рисунок 5.13 – Семейство функций локализации

Подставим в количественный критерий (5.5) последовательно полученные функциональные зависимости. По-прежнему рассматриваем только правую половину подложки с количеством кристаллов $N' = \frac{N}{2}$.

После подстановки имеем выражение (5.10):

$$K = \frac{\left| \frac{d^2 \upsilon}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\upsilon}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}} = \frac{\left| \frac{d^2 \upsilon(x)}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\upsilon(x)}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}} = \frac{\left| \frac{d^2 \upsilon(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\upsilon(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{3/2}}$$

Анализ (5.5) позволяет утверждать: существует некое значение параметра *Coeff*, при котором для характерной точки x температурного профиля кривизна $K \rightarrow 0$.

Отыскание этого значения параметра *Coeff* представим в общем виде

$$\frac{\partial K}{\partial \text{Coeff}} = 0. \quad (5.11)$$

Решение уравнения (5.5) в аналитическом виде затруднительно по причине того, что значения температур υ_i есть частный случай численного решения уравнения теплопроводности. Таким образом, решение (5.5) целесообразно также свести к численному дифференцированию функции:

$$\frac{\partial \frac{\left| \frac{d^2 \upsilon(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{d\upsilon(\text{Loc}[i, \text{Coeff}])}{di} \right)^2 \right)^{3/2}}}{\partial \text{Coeff}} \approx \frac{K(\text{Coeff} + \Delta \text{Coeff}) - K(\text{Coeff})}{\Delta \text{Coeff}}. \quad (5.12)$$

С учетом полученных результатов предложена конструкция светодиодного излучающего элемента, показанная на рисунке 5.14 [42].

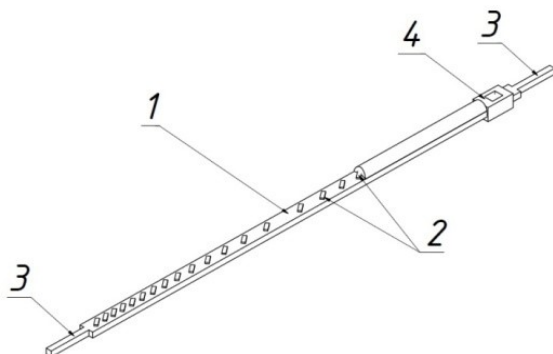


Рисунок 5.14 – Схематический вид конструкции светодиодного излучающего элемента: 1 – подложка из теплопроводящего материала; 2 – излучающие кристаллы, покрытые люминофорной композицией; 3 – контактные выводы для присоединения к токовводам лампы; 4 – диэлектрическая прослойка

На рисунке 5.15 изображены графики распределения температуры T , °C вдоль продольной оси x светодиодного излучающего элемента для варианта эквидистантного расположения кристаллов (1) и предложенного решения (2).

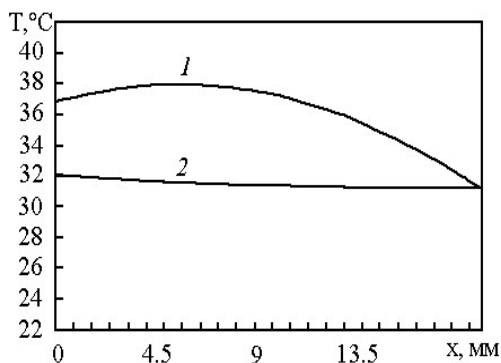


Рисунок 5.15 – Графики распределения температуры (T , °C) вдоль продольной оси (x) СИЭ для варианта эквидистантного расположения кристаллов (1) и предложенного решения (2)

5.1.4 Светодиодные светильники

При огромной номенклатуре выпускаемых светодиодных светильников различного применения и конструктивного исполнения, все они должны удовлетворять определенным требованиям.

По классам светораспределения светильники должны удовлетворять следующим видам [46]:

- 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 %.

В соответствии с рисунком 5.16 **кривая силы света** светильника должна удовлетворять следующим видам:

- концентрированная К – зона направлений максимальной силы света 0–15 °;

- глубокая Г – зона направлений максимальной силы света 0–30 °, 180–150 °;

- косинусная Д – зона направлений максимальной силы света 0–35 °, 180–145 °;

- полуширокая Л – зона направлений максимальной силы света 35–55 °, 145–25 °;

- широкая Ш – зона направлений максимальной силы света 55–85 °, 125–95 °;

- равномерная М – зона направлений максимальной силы света 0–80 °;

- синусная С – зона направлений максимальной силы света 70–90 °, 110–90 °.

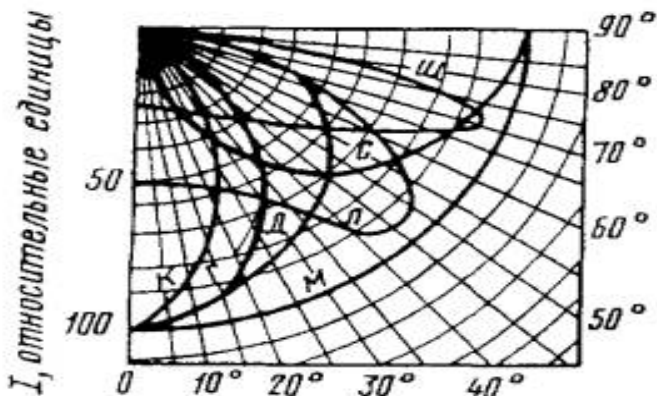


Рисунок 5.16 – Типы кривых силы света

По степени защиты от воздействия окружающей среды по ГОСТ 14254 [47] светильники делятся на группы, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Элементы кода IP и их обозначения

Обозначение элемента кода	Характеристика элемента кода		
Первая цифра кода	Защита оборудования от проникновения внешних твердых предметов	Защита людей 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
6	Пыленепроницаемое	Проволокой	
Вторая цифра кода	Защита оборудования от вредного воздействия в результате проникновения воды	—	
	0	Нет защиты	—
	1	Вертикальное каплепадение	—
	2	Каплепадение (номинальный угол 15°)	—
3	Дождевание	—	

Продолжение таблицы 5.1

Обозначение элемента кода	Характеристика элемента кода	
Вторая цифра кода	Защита оборудования от вредного воздействия в результате проникновения воды	—
4	Сплошное обрызгивание	—
5	Действие струи	—
6	Сильное действие струй	—
7	Непродолжительное погружение	—
8	Длительное погружение	—

Распространенные примеры кода IP:

– IP21 – защита от прикосновения рукой (пальцем) со способностью выдерживать вертикальные брызги воды (технически это распределительный шкаф, например навесного исполнения);

– IP44 – защита от прикосновения инструментом/проводкой более 1 мм со способностью выдерживать брызги воды со всех направлений (например, 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 [48] светильники делятся на пять классов электротехнических изделий:

– 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;

– класс 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 согласно ГОСТ 15150 [49] светильники делятся на следующие группы:

1) *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);

2) *светильники для всех макроклиматических районов на суше, кроме климатического района с антарктическим холодным климатом* (общее климатическое исполнение) (О), (5).

В зависимости от места размещения выделяют светильники, которые предназначены:

– 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 искусственно 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 регулируемы́ми 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 – рабочие значения; +45, –50 – предельные значения;

– ХЛ 1, 1.1, 2, 2.1, 3: +40, –60 – рабочие значения; +45, –70 – предельные значения;

– УХЛ 1, 1.1, 2, 2.1, 3: +40, –60 – рабочие значения; +45, –70 – предельные значения;

– УХЛ 4: +35, +1 – рабочие значения, +40, +1 – предельные значения;

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

По способу крепления или установки выделяют:

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

– светильники нестационарные (настольные, напольные, ручные, головные).

По пожаробезопасности выделяют:

1) светильники, пригодные для непосредственной установки на опорную поверхность из сгораемого материала:

– светильники без встроенных пускорегулирующих аппаратов или трансформаторов;

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

2) светильники, предназначенные для непосредственной установки на опорную поверхность только из негорючего материала: такие светильники должны иметь в эксплуатационном документе соответствующую запись.

5.2 Светодиодные системы передачи информации

5.2.1 Введение

Исследования по передаче звука при помощи видимого света осуществлялись еще в конце XVIII века [50]. К воплощению этой идеи вернулись в начале двадцать первого столетия при появлении быстродействующих полупроводниковых источников света, так как лампы накаливания и люминесцентные источники света имеют высокую инерционность и не годятся для высокоскоростной передачи данных.

Термин Li-Fi (Light Fidelity) по аналогии с Wi-Fi (Wireless Fidelity) появился в 2011 году. Его родоначальником считается немецкий физик Харальд Хаас, который в 2011 году в качестве роутера использовал светодиодную лампу. В лабораторных условиях он достиг скорости передачи в 224 Гбит/с. Идея стала возможной благодаря технологии VLC (Visible Light Communication), которая позволяет источнику света не только выполнять функцию освещения, но и передавать информацию. Отличие ее от имеющей широкое распространение технологии использования инфракрасного (ИК) излучения заключается в использовании видимого света. Если в ИК-связи используются волны длиной 800–2000 нм, то в Li-Fi – 400–800 нм, видимые глазом человека.

Транзит данных реализуется светодиодами, наносекундное мерцание которых незаметно для человека. С одной стороны, это позволяет использовать для передачи информации обычные светодиодные лампы, а с другой – добиться сверхвысокой скорости передачи данных за счёт широкой доступной полосы частот в оптическом диапазоне. Кроме того, оптические каналы связи, безопасны для здоровья. С их помощью можно предоставить абонентам гарантированный канал передачи данных [51].

Технология Li-Fi служит хорошим дополнением к Wi-Fi, так как позволяет обеспечивать доступ в интернет в помещениях с большим количеством людей – торговых центрах, конференц-залах и конгресс-холлах. В этом случае каждый светодиодный светильник превращается в точку интернет-доступа и может быть

реализована концепция микросот с предоставлением пользователям гарантированного высокоскоростного Интернета. Кроме того, данную технологию можно использовать в местах, где радиочастотный сигнал является нежелательным (например, в самолётах, шахтах или операционных). Ещё одно преимущество Li-Fi состоит в том, что в настоящий момент светодиодное освещение широко распространено в городской инфраструктуре, а значит, его можно сравнительно дешево перестроить для беспроводной передачи данных [52].

5.2.2 Принцип работы системы Li-Fi

На практике в роли передатчика (аналог роутера) выступает светодиодная лампа, модулирующая свет путем мерцаний, и приемника (рисунок 5.17 [52]).

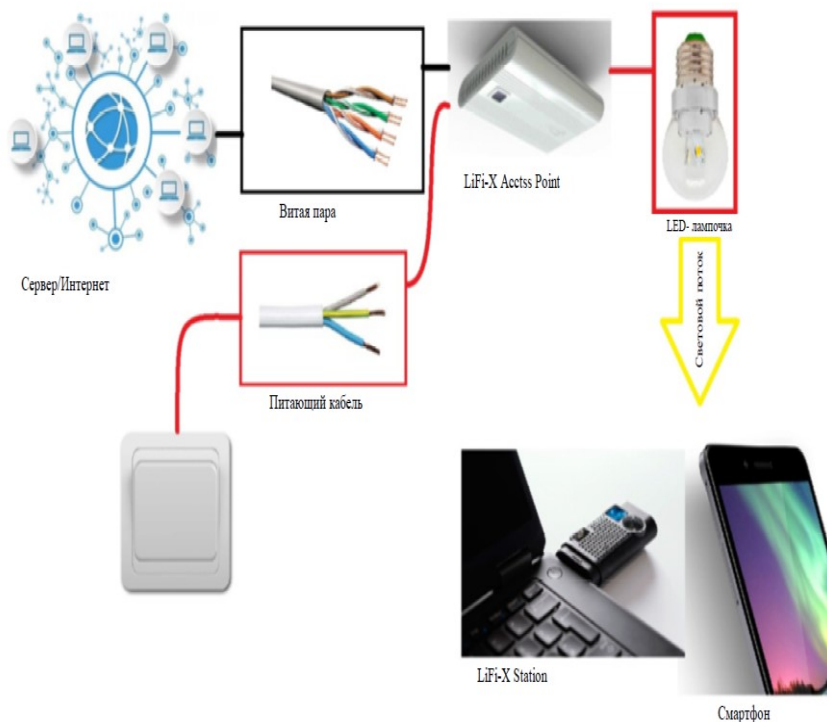


Рисунок 5.17 – Структурная схема передачи данных

В качестве первого используется источник видимого белого света, второго – чувствительный фотосенсор, улавливающий незначительные изменения в освещении. Ноутбук, смартфон оснащается специальным датчиком освещения, способным эти мерцания распознать. Сенсор улавливает их и преобразует в поток двоичной системы счисления. Скорость этих мерцаний столь высока, что человек их не замечает. Полученные мерцания преобразуются обратно в двоичную систему счисления.

Для организации двусторонней связи каждое устройство оснащается и приемником, и передатчиком. Обратная связь организуется похожим образом: лампа оснащается фотосенсором, а смартфон или ноутбук передает данные посредством столь же скоростных мерцаний подсветки экрана или специального диода. В устройствах без дисплея (роутер, медицентр, принтер и т. д.) для этих целей может использоваться специальный светодиод на корпусе.

Светодиодная матрица имеет свой световой поток, сравнимый со 100-ваттной лампочкой, она светит и одновременно позволяет строить каналы передачи данных с высокими скоростями.

Система передачи данных устроена таким образом, что каждый светильник представляет собой свою точку доступа, и это гарантированный канал. Локализованность канала передачи данных в отличие от радиоволн, которые распространяются везде, иногда рассматривают как недостаток. Световой канал идёт по прямой линии от источника по направлению света. У каждого светильника есть пятно засветки, вот в этом пятне и распространяется канал передачи данных. В помещении специфика Li-Fi корректируется тем, что освещение в офисе проектируется так, чтобы между светильниками не было тёмных пятен.

Внутри зданий, соответственно никаких проблем не возникает. Канал может быть открытым, что позволяет при переходе от одного светильника к другому не терять информационный поток. Также можно сделать и закрытый канал, это зависит от технических требований. Важно, что эти каналы не радиочастотные, никуда за стены помещения информация, передаваемая по ним, не уйдёт. Вся передаваемая информация остаётся в пределах данного помещения.

Практика применения этой технологии пока не столь широка, имеющиеся варианты использования касаются сбора и передачи

информации в условиях промышленного производства. В производственных цехах предприятий, в которых имеется много машин и механизмов из металла, беспроводные каналы в силу наличия большого количества помех работают с трудом. В этом случае использование модулей Li-Fi для сбора и передачи данных между оборудованием, между вагонами, подвижным составом очень востребовано.

Зависимость пропускной способности от расстояния между передатчиком и приемником в сети Li-Fi, имеющей ширину полосы пропускания 5,29 ТГц, в помещении с освещённостью 100 лк от естественных источников света и 400 лк от искусственных источников, а также с коэффициентом отражения внутренних поверхностей помещения 1 при наличии светодиодной лампы, которая и излучает сигнал, и силой света 30, 60, 100, 250, 500 и 1000 кд отражена рисунке 5.18 [52].

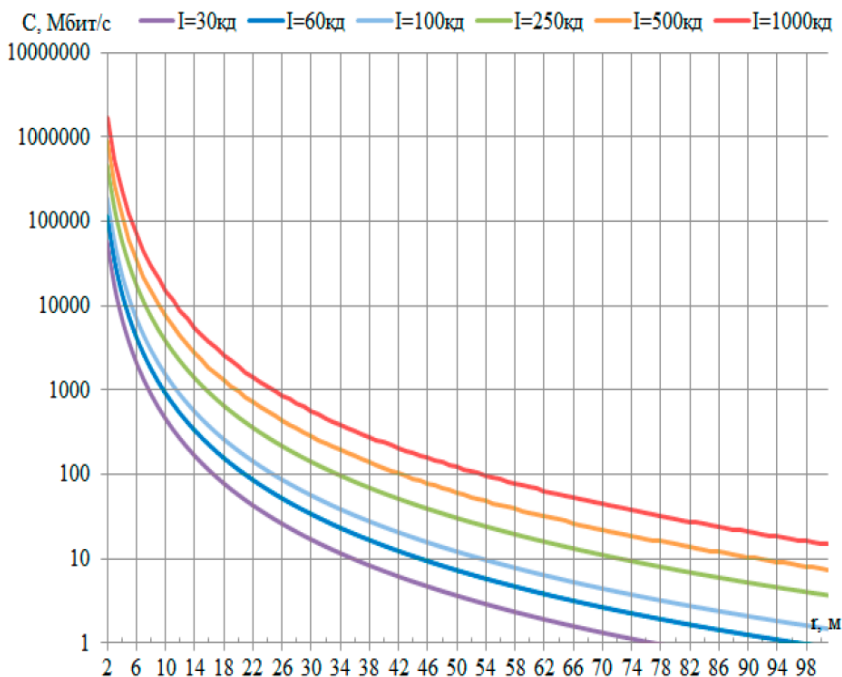


Рисунок 5.18 – Зависимость пропускной способности сети Li-Fi от расстояния при различных значениях силы света передающей сигнал светодиодной лампы

На расстояниях до 10 метров в реальной помеховой обстановке, учитывающей естественную засветку и переотражения сигнала от внутренних поверхностей, достижимы значения скорости передачи данных от 500 до 20000 Мбит/с.

5.2.3 Необходимое оборудование

Для обеспечения работы Li-Fi необходимо следующее аппаратное обеспечение:

- светодиодная система освещения;
- маршрутизатор, установленный вместе с системой освещения;
- приемник, который оснащен декодером с целью расширения светового сигнала.

Технология Li-Fi устроена так, что в качестве беспроводных маршрутизаторов могут использоваться электрические светодиодные лампочки.

Основными компонентами системы Li-Fi являются:

- яркий светодиод, который является источником передаваемых данных;
- кремниевый фотодиод (фотодетектор), который может реагировать на видимый свет, он является приемником передаваемых данных.

Среди последних разработок можно назвать смартфон от компании Oledcomm, который работает под управлением Android. У смартфона есть одна важная модификация: вместо фронтальной камеры у него имеется Li-Fi-сенсор. Указанный сенсор получает команды от светодиодных ламп, которые располагаются поблизости от смартфона, что позволяет просматривать видеоролики или изображения на устройстве.

5.2.4 Сложности реализации технологии Li-Fi

Перспективы Li-Fi выглядят привлекательно, но на практике все не так просто. Некоторые ограничения способны перечеркнуть достоинства оптического соединения посредством этой технологии.

Одной из сложностей реализации Li-Fi является потребность в разделении световых потоков. Устройства должны различать сигнал от передатчика и свое собственное излучение, отраженное

от стен и иных объектов. Эта проблема решаема (она ведь свойственна и радиосигналу), но она мешает добиться максимальных теоретических скоростей (нескольких Тбит/с).

Более серьезной является проблема стороннего света. Светодиодные лампы в помещении обычно дают освещенность от 50 до 500 лк, тогда как пасмурным днем на улице освещенность составляет 1000 лк, а в солнечный полдень – до 100000 лк. Проникая через окна, солнечный свет способен заглушить сигнал Li-Fi в помещении. Борьба с этим можно, используя жалюзи на окнах и постоянное искусственное освещение, но днем на улице на сегодняшний день пока трудно организовать связь Li-Fi.

Наконец, сложности реализации Li-Fi связаны с мобильностью современной электроники. Для поддержания соединения устройства должны находиться в постоянной видимости, а смартфон в руках не всегда «смотрит» экраном на светильник на потолке. Следовательно, для реализации связи нужно переосмыслить концепцию искусственного освещения, переходя от нескольких люстр и светильников – на точечные LED-лампы, встраиваемые в потолки и стены.

Положительные свойства Li-Fi позволяют сделать вывод, что технология будет развиваться и уже через несколько лет устройства с ее поддержкой поступят на рынок

5.3 Светодиоды в телевидении

5.3.1 Общие сведения

Наиболее распространенной технологией формирования изображений в современных телевизионных приемниках являются технология матричного представления изображения. Мельчайший элемент матрицы – пиксель – состоит из нескольких субпикселей. Минимальное количество субпикселей – три по числу базовых цветов разложения (красный, зеленый и синий). Управление яркостью субпикселя осуществляется с использованием эффекта поляризации светового потока и основано на использовании жидких кристаллов (ЖК). К жидким кристаллам относят вещества, поляризация света в которых зависит от электростатического поля. Изменяя напряжение на жидком кристал-

ле можно регулировать коэффициент пропускания света субпикселем, т. е. сам жидкокристаллический элемент свет не генерирует, а лишь воздействует на проходящий световой поток.

Об устройствах создания исходного светового потока и пойдет далее речь.

На рисунке 5.19 показана структура жидкокристаллического экрана [53].

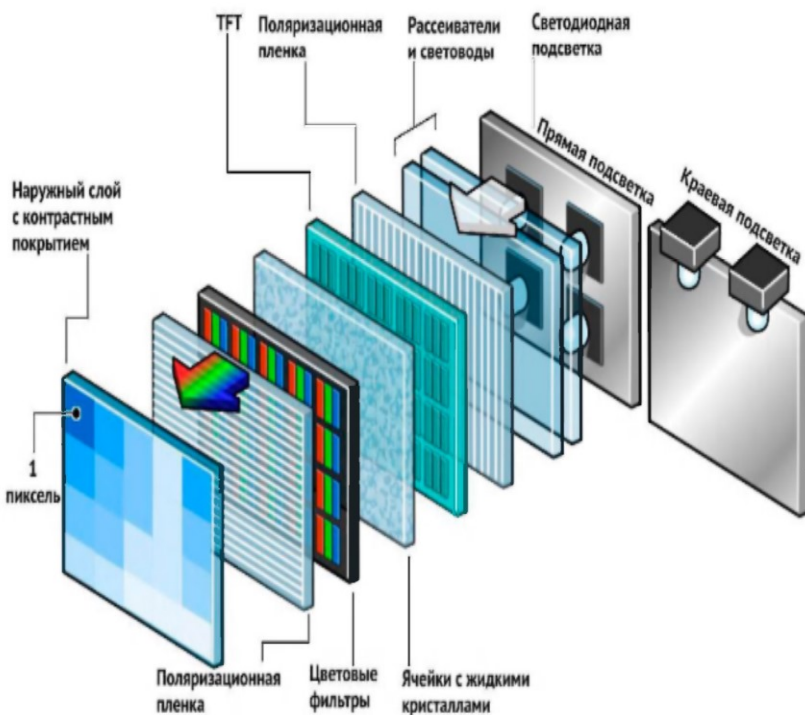


Рисунок 5.19 – Структура жидкокристаллического экрана

В структуру экрана входят наружный слой с антибликовым покрытием, две поляризационных пленки, цветовые фильтры, ячейки субпикселей с жидкими кристаллами, матрица тонкопленочных транзисторов (TFT) управления субпикселями, рассеиватели со световодами и источник подсветки – основной элемент, определяющий яркость свечения экрана телевизионно-

го приемника или монитора.

5.3.2 Подсветка люминесцентными лампами

В телевизионных приемниках конца XX – начала XXI столетия источником света были люминесцентные лампы [54], расположенные на дальней стороне экрана (на рисунке 5.19 не показаны).

Люминесцентные лампы для экранов функционируют на тех же принципах, что и люминесцентные лампы для освещения, только они имеют уменьшенный размер. На внутреннюю поверхность колбы лампы нанесен слой люминофора, лампа заполнена смесью инертного газа с парами ртути. При протекании тока пары ртути обеспечивают ультрафиолетовое излучение, преобразуемое люминофором в световой поток видимого диапазона длин волн.

Подсветка матрицы ЖК-экрана люминесцентными лампами может быть организована следующими способами расположения ламп:

- сверху и снизу монитора;
- со всех четырех сторон монитора;
- параллельно всей поверхности монитора, как показано на рисунке 5.20.



Рисунок 5.20 – Пример расположения люминесцентных ламп подсветки

параллельно всей поверхности ЖК-экрана

Для равномерного распределения света всеми перечисленными способами применяется специальная, адаптированная к каждому из них система рассеивателей и световодов.

Недостатки люминесцентных ламп – срок службы 5000 часов, ярко выраженный линейчатый спектр излучения лампы – переизлучения люминофора, требование специальной утилизации после окончания срока использования – сделали их не конкурентоспособными появившимся в начале текущего столетия технологиям светодиодной подсветки.

5.3.3 Краевая светодиодная подсветка

Конструктивно устройство светодиодной подсветки выполняется по следующим наиболее распространенным вариантам (см. рисунок 5.19) [55]:

- 1) краевая;
- 2) фронтальная (прямая).

У каждого варианта имеются свои достоинства и недостатки.

Достоинствами краевой подсветки являются:

- меньшее количество используемых светодиодов;
- большая эффективность в плане использования светового потока и малая толщина всего ЖК-телевизора, обеспечиваемая за счет малого профиля световода;
- простой и эффективный теплоотвод от светодиодов.

Модуль подсветки включает несколько мощных белых светодиодов, размещенных с одного из торцов ЖК-панели (рисунок 5.21), и плоского пластикового светораспределителя (рисунок 5.22).

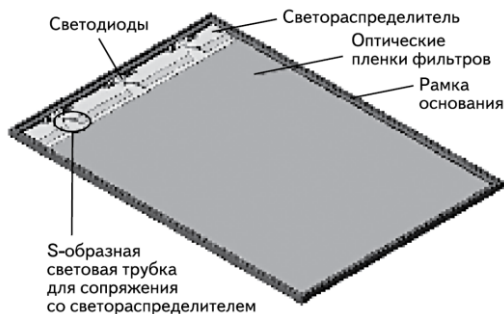


Рисунок 5.21 – Конструкция модуля подсветки

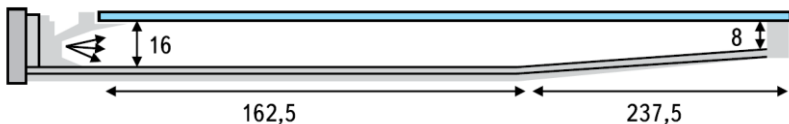


Рисунок 5.22 – Конструкция светораспределителя

Клиновидный светораспределитель обеспечивает равномерное распределение светового потока, формируемого светодиодами, по поверхности ЖК-матрицы, что обеспечивает равномерность яркости телевизионного приемника по экрану телевизора. На задней отражающей поверхности светораспределителя размещается массив светоотражающих микронеровностей. Концентрация этих неровностей изменяется от начала до конца световода, создавая различную характеристику отражения света и обеспечивая равномерность освещенности по всей поверхности зоны подсветки. Для боковой подсветки можно использовать регулировку яркости, но только для всей поверхности подсветки. Динамическая регулировка яркости в архитектуре с боковой подсветкой позволяет получить экономию энергии и увеличить динамический контраст.

Недостатком боковой подсветки является невозможность локальной регулировки яркости для части экрана.

5.3.4 Фронтальная светодиодная подсветка

Другим вариантом светодиодной подсветки является применение фронтальной, или полностью матричной светодиодной подсветки, в которой используется массив светодиодов, распределенных равномерно по всей активной площади ЖК-экрана (рисунок 5.19). При сравнительно простой конструкции модуля подсветки усложняется задача получения равномерной подсветки по всей площади экрана.

Достижение равномерности подсветки обеспечивается рассеивателем для распределения световых потоков от точечных светодиодных источников. Для этой цели необходим диффузный фильтр со специальной двумерной характеристикой поглощения, соответствующий топологии светодиодов. Этот фильтр вносит потери и ухудшает эффективность использования энергии светового потока.

Вторая задача – обеспечение теплоотвода от массива светодиодов. Для размещения платы со светодиодами, устройства управления яркостью светодиодов и диффузного фильтра необходимо определенное пространство. Поэтому модуль прямой подсветки имеет бóльшую толщину, чем краевой. Этот тип подсветки обладает только ему присущим достоинство, благодаря которому и находит применение. Этим преимуществом является локальная динамическая регулировка яркости (рисунок 5.23).

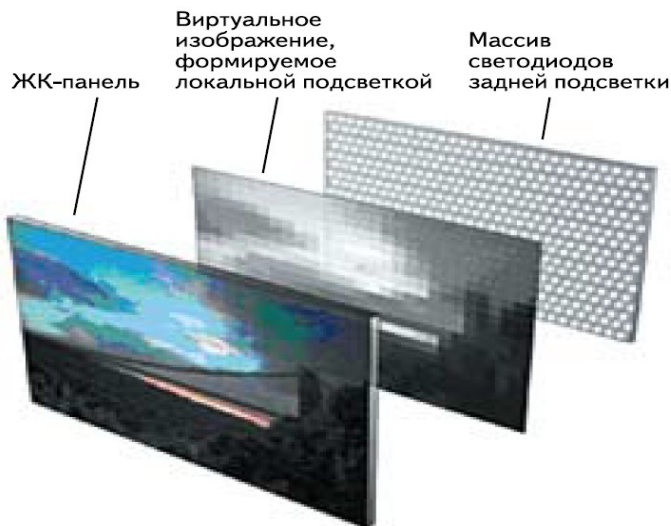


Рисунок 5.23 – Иллюстрация локальной динамической регулировки яркости фронтальной светодиодной подсветкой

5.3.5 Фронтальная светодиодная подсветка с локальной динамической регулировкой яркости

Фронтальная светодиодная подсветка с локальной динамической регулировкой яркости позволяет изменять яркость в определенных областях зон подсветки в зависимости от яркости сцен изображения (рисунок 5.24), что обеспечивает увеличение значения контрастности для ЖК-телевизора.

Сравнительные характеристики темных частей экрана при использовании локальной динамической регулировки яркости подсветки иллюстрируются рисунком 5.24.

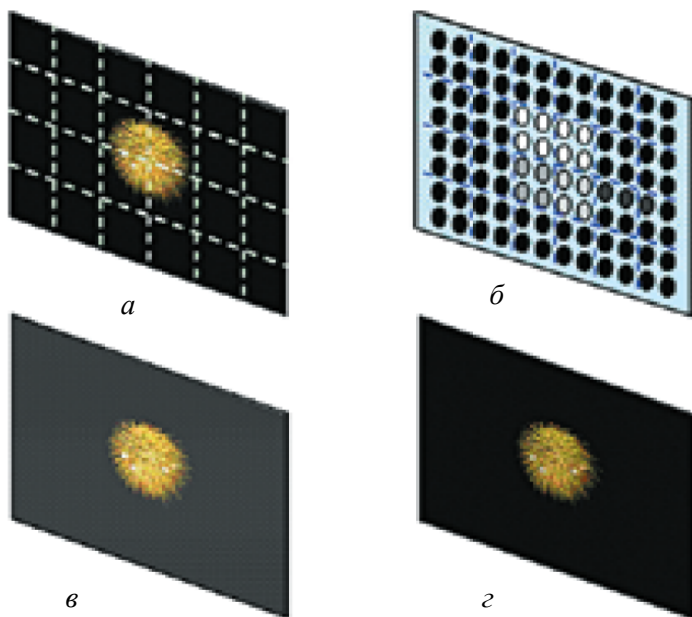


Рисунок 5.24 – Система локальной светодиодной подсветки в ЖК-телевизорах: а) исходное изображение; б) светодиодная матрица локальной подсветки ЖК-панели; в) стандартная ЖК-панель; г) результирующее изображение на экране с локальной подсветкой

Применение подсветки с локальной динамической регулировкой яркости позволяет получить следующие преимущества:

1) уменьшение уровня черного и получение более высокого контраста;

2) уменьшение потребления электрической энергии за счет использования локальной динамической светодиодной подсветки, т. е. части светодиодов из общего их количества.

Исследователи продолжают усиленно работать в направлении совершенствования светодиодных устройств подсветки, для того чтобы реализовать преимущество фронтальной подсветки – использование красных, синих и зеленых светодиодов для расширения цветовой палитры экрана телевизора.

5.4 Светодиоды в агротехнологиях

Известно, что применение светодиодов для выращивания растений способствует повышению урожайности [56]. Основными целями применения садоводческого освещения могут являться:

- поддержание состояния растения в условиях недостаточной освещённости;

- повышение продуктивности растений, включающее повышение биомассы растений, увеличение количества всходов, повышение количества плодов и др.

- повышение витаминного содержания в растениях, что особенно актуально, например, для выращивания растений в условиях космической орбитальной станции.

В соответствии с ГОСТР 57671 [57] облучательные приборы со светодиодными источниками света для теплиц классифицируют следующим образом:

- по светораспределению и кривой силы света (п. 5.1.1 ГОСТ Р 54350) [58];

- по климатическому исполнению и категории размещения (ГОСТ 15150) [49];

- по механической прочности (ГОСТ 17516.1) [59];

- степени защиты от воздействия окружающей среды (код IP в соответствии с ГОСТ 14254) [47].

Разрабатываются различные приборы со светодиодными источниками в зависимости от основных способов освещения:

- освещение растений сверху;

- дополнительное освещение растений в объеме ценоза (междурядное освещение);

- освещение растений в многоярусных установках стеллажного типа.

В зависимости от поставленной цели возможны различные варианты конструкции светильников. В настоящее время существует три подхода к светодиодному освещению:

- 1) освещение теплиц, в которых светодиодные светильники используются в качестве дополнительного освещения к естественному или искусственному освещению лампами ДНАТ. На разных стадиях роста растений требуются определённые спектры освещения. Такое освещение используется, например, для

утолщения стебля, увеличения размера листьев, цветения, плодоношения и размеров плодов;

2) освещение теплиц, в которых светодиодное освещение используется в качестве досветки, когда не хватает естественного освещения. Такой тип светильников применяется в зимний период, в условиях Крайнего Севера, условиях короткого светового дня. Обеспечивает для растения необходимый спектр излучения и освещённость;

3) освещение теплиц, в которых светодиодное освещение используется как основное, а естественное освещение отсутствует.

На основании указанных подходов к организации освещения в теплице светодиодные светильники можно разделить на две группы:

1) светильники для дополнительного освещения в комбинации с естественным или искусственным освещением от ламп ДНАТ для дополнительного воздействия на тепличные растения излучением в синей и красной области оптического спектра видимого диапазона;

2) светильники высокой мощности с широким оптическим спектром видимого диапазона, которые используются в качестве основного освещения при отсутствии естественного освещения или досветки в условиях короткого светового дня.

Спектральные кривые синтеза хлорофилла, фотосинтеза и поглощения лучистой энергии листом приведены на рисунке 5.25 [60].

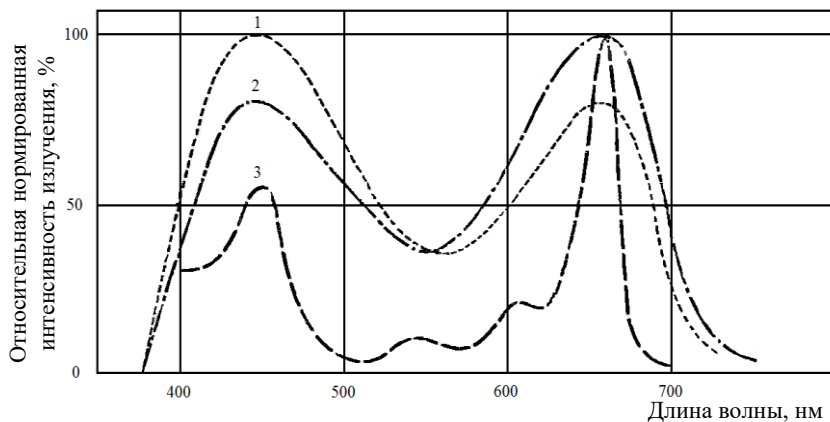


Рисунок 5.25 – Спектральные кривые: 1 – поглощение лучистой энергии листом; 2 – фотосинтез; 3 – синтез хлорофилла

Эффективный спектр излучения для роста растений приведен на рисунке 5.26 [61, 62].

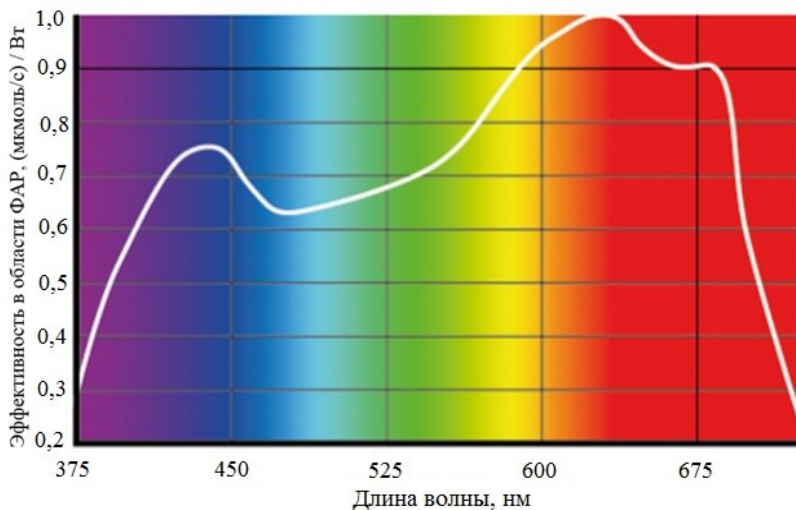


Рисунок 5.26 – Эффективный спектр излучения для роста растений

Известно, что качество освещения напрямую влияет на качество и объём урожая в теплице. Свет влияет на фотосинтез растения. В общем смысле фотосинтез можно представить в виде формулы



Процесс фотосинтеза делится на два этапа:

1) поглощение фотонов зелёным пигментом молекулы хлорофилла приводит его в возбужденное состояние. Электроны переходят на более высокие уровни и участвуют в процессе синтеза. При расщеплении воды под воздействием электронов протоны превращаются в атомы водорода и участвуют в синтезе углеводов. В завершение происходит синтез аденозинтрифосфата (в биологических системах выполняет роль аккумулятора энергии);

2) синтез глюкозы и выделение кислорода происходит в тёмное время суток. Хлорофилл А – необходимый компонент для окисленного фотосинтеза – передаёт резонансную энергию в

реакционный центр, где расположены специальные хлорофиллы, и является частью антенного комплекса. Поглощение света происходит в фиолетово-голубой и оранжево-красной области оптического спектра.

Хлорофилл В – вспомогательный пигмент фотосинтеза, он имеет жёлто-зеленый цвет. При низкой освещённости расширяется диапазон длин волн оптического спектра, которые поглощают хлоропласты, адаптированные к низкой освещенности.

Каротиноиды переносят на хлорофилл, желтый, оранжевый, красный или коричневый пигменты, активно поглощающие излучение в сине-фиолетовой области оптического спектра. Предназначены для защиты хлорофиллов от избыточного излучения и от окисления кислородом, выделяемым при фотосинтезе [63].

Для оценки воздействия излучения на растение используется понятие «фотосинтетически активная радиация» (ФАР) [57] – оптическое излучение в диапазоне от 400 до 700 нм, используемое растениями для фотосинтеза, роста и развития. Рассчитывают фотосинтетический поток фотонов по формуле

$$E_{\text{ФАР}} = \int_{400\text{ нм}}^{700\text{ нм}} E_{\lambda} \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_a} = K \int_{400\text{ нм}}^{700\text{ нм}} E_{\lambda} \cdot \lambda d\lambda, \quad (5.13)$$

где E_{λ} – спектральная плотность энергетической облучённости, Вт/(м²·с);

λ – длина волны, нм;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света;

$N_a = 6,022 \cdot 10^{17}$ мкмоль⁻¹ – число Авогадро;

$K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль⁻¹·Дж⁻¹ – коэффициент.

Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем приведено в таблице 5.2.

Объективный показатель величины урожая (высокий, средний, низкий) – коэффициент использования ФАР. Хорошие урожаи соответствуют 2–3 % использования ФАР.

При использовании сортов интенсивного типа и оптимизации всех процессов формирования урожая возможна аккумуляция в урожае 3,5–5 % ФАР и более.

Таблица 5.2 – Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем

Световая величина	Единицы измерения	Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем	Единицы измерения
Световой поток	лм	Фотосинтетический фотонный поток	мкмоль/с
Освещенность	лм/м ²	Фотосинтетическая фотонная облученность	мкмоль/(м ² ·с)
Световая отдача	лм/Вт	Фотосинтетическая фотонная отдача	мкмоль/(с·Вт)

Доказано, что для образования продуктов фотосинтеза при всех благоприятных условиях (орошение, высокая концентрация CO₂) солнечная энергия используется только на 2 %. В среднем КПД фотосинтеза сельскохозяйственных растений в реальных условиях составляет около 0,5–1 % (т. е. около 16 кДж/м² в ч), теоретически же возможно повышение уровня этого показателя до 4–6 %. Одной из самых насущных задач, стоящих перед практическим сельскохозяйственным производством, и является повышение эффективности фотосинтеза.

Согласно результатам исследований различных организаций имеем следующие результаты [64]:

- 15–30 Вт/м² – низкая интенсивность ФАР (минимально допустимая): рост вегетативных органов происходит, но не образуются полноценные генеративные органы;

- 40 Вт/м² – согласно разработкам Института гипрорисельпрома такой показатель ФАР с фотопериодом 14 часов (0,56 кВт×ч/м²×день) является оптимальной нормой облученности в теплице для выращивания рассады;

- 65–90 Вт/м² – достигается высокая урожайность на высокоэффективных фитокомплексах круглогодичного интенсивного производства растительной продукции разработки Агрофизического института [65].

Коэффициент равномерности облученности 0,55÷0,75. Длительность облучения не указана. Зависит от выращиваемой культуры (12÷16 часов);

– 100 Вт/м² – согласно разработкам Института гипрони-сельпрома такой показатель ФАР с фотопериодом 16 часов (1,6 кВт×ч/м²×день) является оптимальной нормой облученности в теплице для выращивания на продукцию;

– 150– 20 Вт/м² – согласно многим источникам считается оптимальной интенсивностью ФАР, при которой наблюдается максимальное накопление биомассы в единицу времени. Фотосинтез и рост хорошо сбалансированы при фотопериоде 16 часов (2,4÷3,52 кВт×ч/м²×день);

– 280–300 Вт/м² – верхний разумный предел применения досветки. В зависимости от метода управления искусственным освещением реализуется соответствующий алгоритм отключения досветки;

– 400 Вт/м² (фотопериод 16 ч. – 6,4 кВт×ч/м²×день) и более – насыщенная интенсивность ФАР, при которой достигается выход фотосинтеза на плато светового насыщения, т. е. максимальный фотосинтез. Растения приобретают низкорослую форму [66, 67].

Современное состояние садоводческого освещения

Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства OSRAM GmbH PHYTOFY RL 150 Вт приведён на рисунке 5.27 [68].

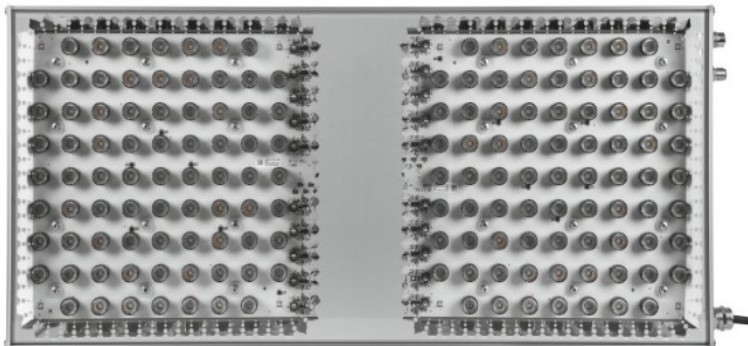


Рисунок 5.27 – Светодиодный светильник
«OSRAM GmbH PHYTOFY RL»
для садоводческого освещения производства

Светильник OSRAM GmbH «PHYTOFY RL» имеет мощность 150 Вт, спектр излучения: 385 нм, 450 нм, 521 нм, 660 нм, 730 нм, обеспечивает фотосинтетическую фотонную облученность: УФ 50, синий 250, зелёный 100, красный 250, ИК 100 мкмоль/м²·с.

Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства Diode System Copyright DS-FITO A 150 приведён на рисунке 5.28 [69].



Рисунок 5.28 – Светодиодный светильник «Diode System Copyright DS-FITO A 150» для садоводческого освещения производства

Светильник Diode System Copyright «DS-FITO A 150» имеет мощность 150 Вт, составляющие спектра излучения 440–460 нм – 17 %, 640 нм – 79 %, 730 нм – 4 %.

Внешний вид светодиодного светильника УСС 120 БИО для садоводческого освещения производства компании Фокус приведён на рисунке 5.29 [70].



Рисунок 5.29 – Светодиодный светильник «Фокус УСС 120 БИО» для садоводческого освещения производства

Литература

1. Мировая карта ночной Земли: вид из космоса [Электронный ресурс]: сайт «Популярная механика». – Режим доступа: <https://www.popmech.ru/technologies/news-354592-mirovaya-kartanochnoy-zemli-vid-iz-kosmosa/> (дата обращения: 04.04.2020).

2. U.S. Lighting Market Characterization. – V. I: National Lighting Inventory and Energy Consumption Estimate // Final Report, 2002. – 104 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/corporate/lmc_voll.pdf (дата обращения: 04.04.2020).

3. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Белоус А.И. Полупроводниковая силовая электроника / А.И. Белоус, С. А. Ефименко, А.С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2013. – 216 с.

5. Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства: отчет по ОКР (промежуточ.) / Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, рук. Туев В.И. – Томск:, 2013. – 254 с. – № ГР 01201161479. – Инв. № 24.02/05-2013.

6. Исследование управляющих параметров, обеспечивающих заданные значения эффективных деформационно-прочностных и теплофизических характеристик композитного материала: отчет о НИР «Полимер» (промежуточ.) / Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники; рук. Туев В.И. – Томск, 2015. – 303 с. – № ГР 114022010008. – Инв. № 24.02/03-2015.

7. Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания: отчет по этапу 3 «Разработка конструкторской документации (КД) макетных образцов» / Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники; рук. Туев В.И. – Томск, 2015. – В 2-х т. – Т. 1

«Научно-технический отчет», 49 с.; Т. 2 «Приложения», 220 с. – № ГР 114100640084. – Инв. № 24.01/03-2015.

8. Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств: отчет по этапу 3 «Экспериментальные исследования, обобщение и оценка результатов исследований поставленных перед ПНИЭР задач» / Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники; рук. Туев В.И. – Томск, 2019. – 726 с. – № ГР АААА-А17-117102750011-4. – Инв. 24.05/03-2019.

9. Люди мира. Русское научное зарубежье / Ред.-сост. Д. Баюк. – М.: Альпина нон-фикшн, 2018. – 516 с.

10. Генри Раунд [Электронный ресурс]: сайт «Популярная электроника». – Режим доступа: <http://scsiexplorer.com.ua/index.php/izvesnie-ludi/zarubezhnye-umy/1498-genri-raund.html> (дата обращения: 04.04.2020).

11. Транзисторная история. Изобретение транзисторов и развитие полупроводниковой электроники. [Электронный ресурс]: сайт «Изобретение транзистора». – Режим доступа: <https://www.sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/oleg-vladimirovic-losev> (дата обращения: 04.04.2020).

12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – В 2-х книгах. Кн. 1; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

13. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. / Ф. Шуберт; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

14. Шарапова Н. История полупроводников: томский период / Н. Шарапова // Alma Mater: газета Томск. гос. ун-та. – 2005. – № 2380.

15. РИА Новости. [Электронный ресурс]: МИА «Россия сегодня». – Режим доступа: <https://ria.ru/20190302/1551497290.html> (дата обращения: 04.04.2020).

16. Nakamura S. The Blue Laser Diod / S. Nakamura, G. Fasol. – Berlin: Springer, 1997. – 335 p.

17. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Narukawa Y. [et al] // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – N 43 (35):354002. – 6 p.

18. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие / Г.С. Ландсберг. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.

19. Закгейм Д.А. AlGaInN светодиоды с внешней квантовой эффективностью 60 % / Д.А. Закгейм, Д.А. Бауман // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы: материалы IX-й Всерос. конф., 13–15 июня, Москва. – М.: МГУ им. Ломоносова, 2013. – С. 22–23.

20. Акчурин Р.Х. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники / Р.Х. Акчурин, А.А. Мармалюк. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 488 с.

21. Троян П.Е. Нанoeлектроника: учеб. пособие / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2010. – 88 с.

22. Россоленко А.Н. Литографии в микроэлектронике: метод. пособие для студентов ФОПФ МФТИ и описания лабораторных работ в ИФТТ РАН / А.Н. Россоленко, Т.Е. Голикова, В.Н. Зверев. – 54 с. [Электронный ресурс]: сайт «STUDYLIB». – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2658083/litografii-v-mikroelektronike> (дата обращения: 02.10.2020).

23. Иванов В.И.. Современные методы и оборудование для резки приборных пластин на кристаллы (обзор) / В.И. Иванов, В.С. Кондратенко // Успехи прикладной физики. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 174–183.

24. Исследование светотехнических характеристик светодиодной лампы на основе светодиодных излучающих элементов / Ю.В. Юлаева [и др.] // Актуальные проблемы радиофизики: сб. трудов VIII Междунар. науч.-практ. конф. г. Томск, 1–4 октября 2019 г. – Томск: Издательский дом ТГУ, 2019. – С. 268–271.

25. Применение модифицированной функции гиперболического тангенса для аппроксимации вольт-амперных характеристик светоизлучающих диодов / И.В. Антонишен [и др.] // Доклады Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24). – Ч. . – С. 154–156.

26. Особенности применения ультразвуковой сварки в технологии изготовления светодиодов и светодиодных ламп / К.Н. Афонин [и др.] // Физика и технология наноматериалов и структур: сб. науч. статей II-й Междунар. науч.-практ. конф. г. Курск , 24–26 ноября 2015 г.. – В 2 т. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. – Т. 2. – С. 131–135.

27. Социн Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения / Н.П. Социн // Круглый стол «Производство светодиодов в России – дорожная карта»: материалы докл., Москва, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studylib.ru/doc/4915970/novye-fotolyuminyofory-dly-a-e-ffektivnyh-priborov-tverdotel._n... (дата обращения: 08.04.2013).
28. Фотолюминесцентные продукты [Электронный ресурс]: официальный сайт фирмы «Dalian Luminglight». – Режим доступа: <http://www.luminglight.com>. (дата обращения: 25.04.2020).
29. Индикаторы полупроводниковые единичные [Электронный ресурс]: официальный сайт АО «НИИПП». – Режим доступа: <https://www.niipp.ru/catalog/> (дата обращения: 01.09.2020).
30. Kingbright Electronic [Электронный ресурс]: официальный сайт «Kingbright Electronic Co, Ltd». – Режим доступа: <https://www.kingbright.com> (дата обращения: 01.09.2020).
31. CHIP LED lighting [Электронный ресурс]: официальный сайт «SHENZHEN REFOND OPTOELECTRONICS Co., Ltd». – Режим доступа: <https://www.refond.com> (дата обращения: 01.09.2020).
32. LED lighting [Электронный ресурс]: официальный сайт «LEDs magazine». – Режим доступа: www.LEDsmagazine.com (дата обращения: 01.09.2020).
33. LED Components [Электронный ресурс]: официальный сайт «Cree». – Режим доступа: <http://www.cree.com> (дата обращения: 01.09.2020).
34. Single Die LED [Электронный ресурс]: официальный сайт «Lumileds». – Режим доступа: <https://www.lumileds.com> (дата обращения: 01.09.2020).
35. Lighting [Электронный ресурс]: официальный сайт «Seoul Semiconductor». – Режим доступа: <http://www.seoulsemicon.com/en> (дата обращения: 01.09.2020).
36. Mid Power LEDs [Электронный ресурс]: официальный сайт «Samsung». – Режим доступа: <https://www.samsung.com/led/> (дата обращения: 01.09.2020).
37. LED Products [Электронный ресурс]: официальный сайт «Epistar». – Режим доступа: <https://www.epistar.com/EpistarTw/index> (дата обращения: 01.09.2020).
38. Светоизлучающие диоды [Электронный ресурс]: официальный сайт «Nichia». – Режим доступа: <https://www.nichia.co>.

jp/ru/about_nichia/index.html (дата обращения: 01.09.2020).

39. Mini - Flip Chip [Электронный ресурс]: официальный сайт «Genesis Photonics». – Режим доступа: <https://www.gpiled.com> (дата обращения: 01.09.2020).

40. ГОСТ 10771-82 (СТ СЭВ 2786-80). Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия (с изменениями № 1, 2). – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 24 с.

41. Thomas W. Maximum spectral luminous efficacy of white light / W. Thomas, Jr. Murphy // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – N 111, 104909. – 6 p.

42. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения / В.С. [и др.] // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 148–151.

43. ГОСТ Р 57394-2017. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность. – М.: Стандартиформ, 2017. – 32 с.

44. ГОСТ ИЕС 62612-2019. Лампы светодиодные со встроенным устройством управления для общего освещения на напряжения свыше 50 В. Эксплуатационные требования. – М.: Стандартиформ, 2019. – 26 с.

45. Озеркин Д.В. Топологическая термокомпенсация светодиодных линейных модулей филаментных ламп / Д.В. Озеркин, Д.Г. Старосек, В.И. Туев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 6 (726). – С. 156–163.

46. ГОСТ ИЕС 60598-1-2017. Светильники. Ч. 1. Общие требования и методы испытаний (с поправкой). – М.: Стандартиформ, 2017. – 22 с.

47. ГОСТ 14254-2015 (ИЕС 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP) (издание с поправкой). – М.: Стандартиформ, 2019. – 68 с.

48. ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (с изменениями N 1, 2, 3, 4). – М.: Стандартиформ, 2008. – 19 с.

49. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспорти-

рования в части воздействия климатических факторов внешней среды (с изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). – М.: Стандартинформ, 2010. – 83 с.

50. Bell A.G. On the Production and Reproduction of Sound by Light / A.G. Bell // American Journal of Sciences. – New Haven, 1880. – V. XX. – I. 118. – P. 305–324.

51. Романенко Н.Г. Применение технологии Li-Fi на буровой установке / Н.Г. Романенко, С.В. Головкин, А.С. Соколов // Вестник АГТУ. – 2017. – № 2 (64). – С. 37–40.

52. Неволин Д.Г. Помехоустойчивость беспроводных оптических локальных сетей передачи данных на базе светодиодов видимого излучения: монография / Д.Г. Неволин, И.П. Петрусь. – Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – 144 с.

53. Фаретдинов И.С. QLED или дисплеи на квантовых точках – почему за ними будущее? / И.С. Фаретдинов, И.Р. Сафин, В.С. Николаев // Междунар. молодежный симпозиум по управлению, экономике и финансам: сб. науч. статей. – Казань: Изд-во «ИП Сагиева А.Р.», 2017. – С. 100–102.

54. Осипов А. Виды подсветки матрицы монитора или телевизора /А. Осипов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agepc.ru/zhelezo/monitory/podsvetka-monitora> (дата обращения: 28.04.2020).

55. Самарин А. Тенденция развития сектора ЖК-телевизоров со светодиодной подсветкой / А. Самарин // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4. – С. 98–102.

56. Бахарев И. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы / И. Бахарев [и др.] // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 2. – С. 76–82.

57. ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.

58. ГОСТ Р 54350-2015. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 78 с.

59. ГОСТ 17516.1-90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам (с изменениями № 1, 2). – М.: Стандартинформ, 2007. – 11 с.

60. Фитокомплексы в России: основы создания и перспективы использования для круглогодичного получения качественной растительной продукции в местах проживания и работы населения / И.Н. Панова [и др.] // Общество, среда, развитие. – 2015. – № 4. – С. 196–203.

61. Inada K. Action spectra for photosynthesis in higher plants / K. Inada // Plant Cell Physiol. – 1976. – N 18. – P. 355–367.

62. McCree K.J. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants / K.J. McCree // Agr. Meteorol. – 1972. – P. 191–216.

63. Разработка и макетирование вариантов узлов автоматики экологической теплицы: отчёт о выполнении НИОКР (заключ.) по договору № 1465ГС1/22775 от 25.07.2016 г. / ООО «Высокотехнологичные экологические теплицы»; рук. Солдаткин В.С. – Томск, 2017. – 213 с. – № ГР АААА-А16-116100700013-0. – Инв. № 002.

64. Дука М. Физиология растений: практикум для студентов биолого-почвенного факультета / М. Дука, Т. Хоменко, Е. Савка. – Кишинэу: Изд-во Молдавского гос. ун-та, 2003. – 134 с.

65. Петров К.П. Методы биохимии растительных продуктов / К.П. Петров. – Киев: Вища школа, 1978. – 224 с.

66. Флуориметрия [Электронный ресурс]: официальный сайт «Агротехнологии». – Режим доступа: <http://agrotechnology.com/tochnoe-zemledelie/teoriya/fluorimetriya-razdel-iz-nenapisannogo-uchebnika-agronoma> (дата обращения: 01.09.2020).

67. Досветка в теплицах [Электронный ресурс]: официальный сайт Ассоциация «Теплицы России». – Режим доступа: <http://rusteplica.ru/dosvetka-v-teplicah/> (дата обращения: 01.09.2020).

68. Продукты [Электронный ресурс]: официальный сайт «Osram Opto Semiconductor». – Режим доступа: <https://www.osram.com/os/> (дата обращения: 01.09.2020).

69. Светодиодные светильники [Электронный ресурс]: официальный сайт «Diode System Copyright». – Режим доступа: <http://diode-system.com/> (дата обращения: 01.09.2020).

70. Светодиодная продукция [Электронный ресурс]: официальный сайт «ТМ Фокус». – Режим доступа: <https://www.focus-light.ru> (дата обращения: 01.09.2020).

Учебное издание

**Вилисов Анатолий Александрович
Солдаткин Василий Сергеевич
Туев Василий Иванович**

**СВЕТОДИОДЫ
И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

Учебное пособие