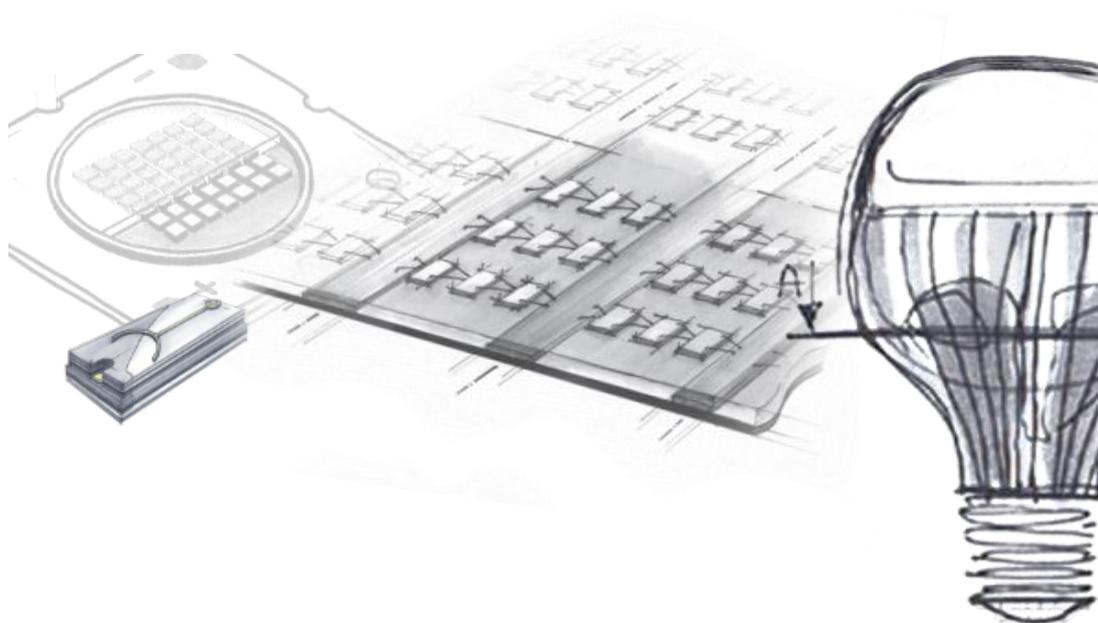


В.Е. Бугров, К.А. Виноградова

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА СВЕТОДИОДОВ

Учебное пособие



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

В.Е. Бугров, К.А. Виноградова

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА СВЕТОДИОДОВ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2013

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

Учебное пособие формирует у студентов представление о светодиодных технологиях, видах светодиодных изделий, их основных характеристиках, а также демонстрирует динамику развития отрасли. В курсе детально рассматриваются конструкции светодиодов, светодиодных светильников и их основных элементов. Рассказывается о стандартизации и программах государственной поддержки.

Пособие адресовано студентам, обучающимся по магистерской программе 200400.68 «Светодиодные технологии» направления подготовки 200400 «Оптотехника».

Учебное пособие к курсу лекций подготовлено на кафедре «Светодиодных технологий».

Рекомендовано к печати Учёным Советом факультета оптико-информационных систем и технологий 11.06.2013, протокол №6.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013

© В.Е. Бугров, К.А. Виноградова, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
РАЗДЕЛ 1. Светодиоды: виды, конструкции, характеристики. Основные характеристики полупроводниковых излучателей. Организация теплового режима в светодиодном изделии	10
1.1. Светодиод. Назначение и свойства основных элементов светодиодов	10
1.1.1. Светодиодный чип	11
1.1.2. Корпус светодиода	25
1.1.3. Оптическая система светодиода	26
1.1.3.1. Полимерный компаунд	26
1.1.3.2. Линза	26
1.1.3.3. Люминофор. Удалённый люминофор	27
1.2. Основные характеристики светодиодных чипов и светодиодов	32
1.3. Обеспечение теплового режима работы светодиода	39
1.4. Основные виды и конструктивные исполнения мощных светодиодов. Светодиодная сборка «чип на плате»	41
1.4.1. Основные конструктивные исполнения мощных светодиодов ...	41
1.4.2. Светодиодная сборка «чип на плате»	44
1.5. Органические светодиоды	48
1.5.1. Технология органических светодиодов	48
1.5.2. Характеристики органических светодиодов	50
1.5.3. Спектр излучения органических светодиодов	50
1.5.4. Применение органических светодиодов	51
РАЗДЕЛ 2. Активно развивающиеся полупроводниковые устройства	55
2.1. Ключевые технологии и области исследований, задействованные в производстве светодиодов	55
2.2. Светодиодные устройства на основе нитрида галлия	56
2.3. Светодиодные устройства на основе карбида кремния и кремния	58
2.4. Традиционный процесс производства светодиодов. Светодиоды белого света	59
2.4.1. Традиционный процесс производства светодиодов	59
2.4.2. Способы получения белого света с помощью светодиодов	60
РАЗДЕЛ 3. Светодиодные светильники: основные элементы, характеристики, стандартизация	62
3.1. Виды светодиодных светильников. Светодиодные лампы	62
3.1.1. Виды светодиодных светильников	62
3.1.2. Виды светодиодных ламп	68
3.2. Основные элементы светодиодного светильника	75
3.2.1. Оптическая система светодиодного светильника	78
3.2.1.1. Отражатель (рефлектор) светильника	79
3.2.1.2. Рассеиватель светильника	82
3.2.2. Спектры излучения светодиодных светильников	86

3.3. Совершенствование конструкции светильников	90
3.4. Обеспечение теплового режима светодиодного светильника	92
3.4.1. Виды радиаторов	93
3.4.2. Материалы радиаторов	97
3.4.3. Моделирование процессов теплопереноса	102
3.5. Стандарты для производителей светодиодных светильников и их компонентов	104
3.5.1. Технические характеристики светильников	104
3.5.2. Стандарты, действующие на территории Российской Федерации	106
3.5.3. Организации, занятые разработкой стандартов на твердотельные источники освещения	107
РАЗДЕЛ 4. Управляющая электроника. Интеллектуальное освещение ...	109
4.1. Управляющая электроника. Требования, предъявляемые к источникам питания	109
4.1.1. Источник питания к светодиодному источнику света	109
4.1.2. Виды источников питания	113
4.1.3. Требования, предъявляемые к источникам питания	115
4.1.4. Основные элементы источника питания	117
4.1.5. Понижающие и повышающие преобразователи	117
4.1.6. Особенности создания источников питания	119
4.1.7. Сферы применения драйверов	120
4.1.8. Отличительные черты интегральных микросхем источников питания	121
4.1.9. Характеристики источника питания	122
4.2. Электроника светодиода	124
4.3. Интеллектуальное освещение. Аналоговое и цифровое управление .	126
4.3.1. Интеллектуальное освещение	126
4.3.2. Аналоговое управление	126
4.3.3. Цифровое управление	127
РАЗДЕЛ 5. Динамика развития технологии светодиодных устройств	132
5.1. Необходимость массового производства светодиодных устройств	132
5.1.1. Высокая эффективность светодиодных источников света	133
5.1.2. Длительный срок службы светодиодных источников света	136
5.1.3. Высокое качество света	136
5.2. Снижение стоимости светодиодных устройств — основная движущая сила развития технологии их производства	138
5.2.1. Совершенствование и замена технологических процессов	141
5.2.2. Автоматизация анализа дефектов	144
5.2.3. Создание светодиода на уровне подложки	147
5.3. Государственная поддержка развития технологии светодиодных устройств	149
5.4. Образование и стандарты в сфере светодиодных технологий	152

5.4.1. Образование в сфере светодиодных технологий.....	152
5.4.2. Разработка стандартов в сфере светодиодных технологий.....	153
5.4.3. Экологическая безопасность светодиодной продукции.....	153
5.4.4. Трудности принятия твердотельного освещения.....	154
5.4.5. Конкурирующие технологии.....	155
5.4.6. Основные компании-изготовители полупроводниковых источников света.....	155
5.5. Прогнозы развития светодиодных устройств.....	155
5.5.1. Прогнозы развития светодиодов.....	156
5.5.2. Прогнозы развития светодиодных систем, работающих на переменном токе.....	159
5.5.3. Прогнозы развития светодиодных светильников.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	167
КАФЕДРА СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	171

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

AC	alternative current, переменный ток
CCT	correlated color temperature, коррелированная цветовая температура
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor, комплементарный металл-оксид-полупроводник
COB	chip-on-board, «чип на плате»
CRI	color rendering index, индекс цветопередачи
DBC	direct bonded copper board, напрямую сращённый с медью
DC	direct current, прямой ток
FWHM	full width at half maximum, ширина пика излучения на полувысоте
IT	information technology, информационные технологии
MCPCB	metal core printed circuit board, печатная плата на металлическом основании
MOCVD	metal organic chemical vapor deposition, осаждение паров металлорганических соединений из газовой фазы
OLED	organic light emitting diode, органический светодиод
PMMA	poly(methyl methacrylate), полиметилметакрилат
RGB	red-blue-green, красный-синий-зелёный
RGBA	red-blue-green-amber, красный-синий-зелёный-янтарный
I_f	прямой ток
T_j	температура p-n перехода
V_f	прямое падение напряжения
α	коэффициент термического расширения
$\Delta\lambda$	ширина пика излучения на полувысоте
$\Delta\lambda_{dom}$	изменение доминантной длины волны
ΔE	ширина запрещённой зоны
ζ	несоответствие постоянных кристаллических решёток
ρ	удельное сопротивление
Φ_v	световой поток
ВЧ	высокочастотный
ИМ	интегральная микросхема
КПД	коэффициент полезного действия
КСС	кривая силы света

КТР	коэффициент термического расширения
КФЛ	компактная флуоресцентная лампа
МКЯ	множественные квантовые ямы
ПЭМ	просвечивающий электронный микроскоп
СЭМ	сканирующий электронный микроскоп

ВВЕДЕНИЕ

Повышению энергоэффективности во всем мире в настоящее время уделяется много внимания. Энергоэффективность является одним из ключевых аспектов любой экономической деятельности. Требования к её повышению устанавливаются даже законодательно многими государствами с целью сохранения ресурсов. Светодиодное освещение гораздо более эффективно по сравнению с традиционными источниками света, его внедрение является приоритетным направлением развития. Появление нового рынка — рынка светодиодных устройств для осветительных целей, стало возможным благодаря существенному прогрессу в светодиодных и сопутствующих им технологиях. В 2007 году эффективность мощных светодиодов и светоизлучающих элементов светильников достигла сравнимых значений с эффективностью других существующих энергоэффективных источников белого света, в последующие годы она превысила данный показатель (см. рис. 1). Успехи в создании источников питания для светодиодного освещения с эффективностью 90% и более, обеспечении теплового режима, производства эффективных оптических систем послужили созданию новых высокотехнологичных источников света и формированию рынка светодиодного освещения.

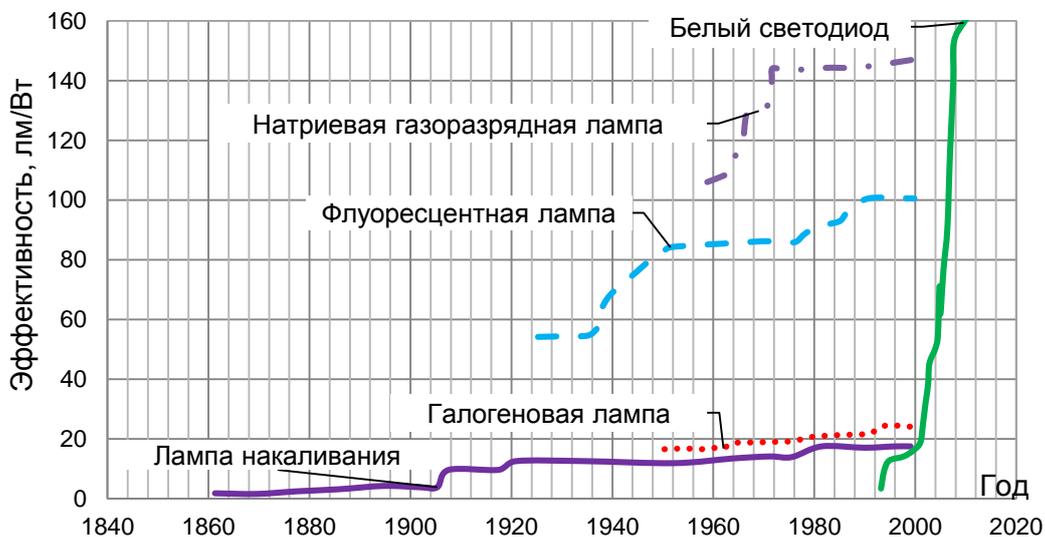


Рис. 1. Динамика роста эффективности источников белого света.

Стоит отметить также успешное развитие технологий производства полупроводниковых компонентов и устройств, приводящее к сокращению энергопотребления и увеличению производительности как самих устройств, так и изделий, созданных на их основе. Технологии полупроводниковых соединений и устройств будут ключевой развивающейся технологией для использования в беспроводных сетях, а также для целого ряда гражданских и оборонных применений.

РАЗДЕЛ 1. Светодиоды: виды, конструкции, характеристики. Основные характеристики полупроводниковых излучателей. Организация теплового режима в светодиодном изделии

Содержание

- 1.1. Светодиод. Назначение и свойства основных элементов светодиодов.
- 1.2. Основные характеристики светодиодных чипов и светодиодов.
- 1.3. Обеспечение теплового режима работы светодиода.
- 1.4. Основные виды и конструктивные исполнения мощных светодиодов. Светодиодная сборка «чип на плате».
- 1.5. Органические светодиоды.

1.1. Светодиод. Назначение и свойства основных элементов светодиодов

Светодиод — полупроводниковый источник некогерентного оптического излучения, принцип действия которого основан на явлении электролюминесценции при инжекции неосновных носителей заряда через гомо- или гетеро- *p-n* переход [1]. В настоящее время производятся светодиоды видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов.

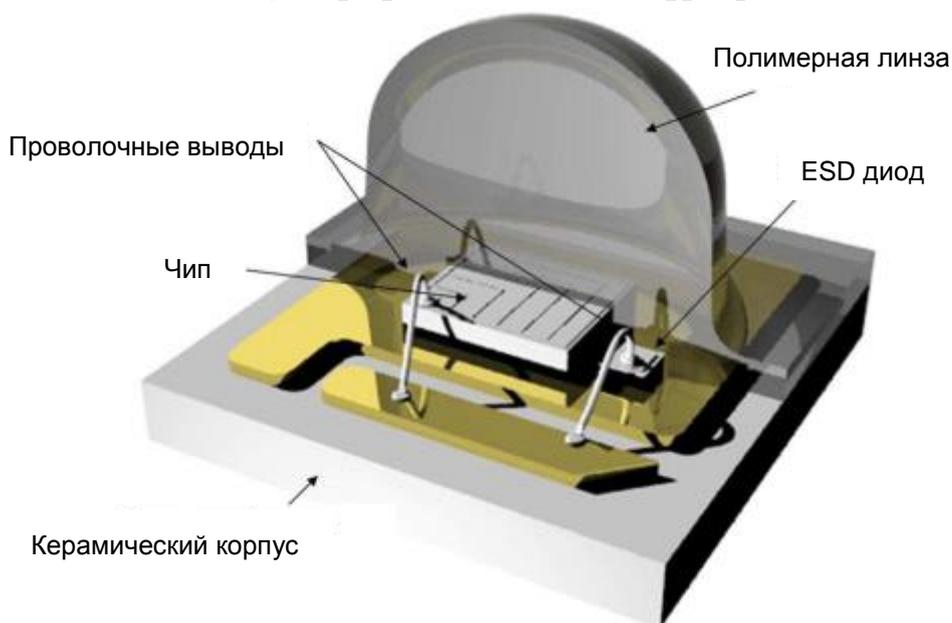


Рис. 2. Основные элементы конструкции мощного светодиода.

Светодиод состоит из полупроводникового светоизлучающего чипа, корпуса, проволочных выводов, соединяющих электрически светодиодный чип и электрическую разводку корпуса, материала-фиксатора чипа в

корпусе — клея или адгезива, или материала припоя в случае использования flip-чипов, оптического полимера или компаунда. Конструкция мощных светодиодов (рис. 2) дополнительно содержит диод, защищающий светодиод от электростатического разряда.

1.1.1. Светодиодный чип

Основу любого светодиода составляет светодиодный чип. В литературе используют и слово «кристалл», однако оно не отражает всей технологической сложности изготовления внутренней структуры светодиодного чипа.

Первым этапом создания светодиодного чипа является послойное выращивание определённой полупроводниковой гетероструктуры на выбранном материале подложки. Состав и физические свойства гетероструктуры определяют длину волны излучения светодиодного чипа. Основными материалами, из которых изготавливаются светодиодные чипы, являются соединения GaN, AlN, InN, GaAs, GaP и их твёрдые растворы [2]. Физическое качество гетероструктуры, наличие или отсутствие внутренних дефектов и примесей коренным образом определяют эффективность светодиодного чипа и срок его службы.

Например, компания «Оптоган» обладает оригинальными запатентованными эпитаксиальными технологиями, позволяющими выращивать структуры InGaAlN на сапфировых подложках с особо низким количеством ростовых дефектов (дислокаций). Благодаря низкой концентрации дислокаций чипы, произведённые компанией «Оптоган», не подвержены ускоренной деградации при высоких токах и температурах, что увеличивает время жизни светодиодов.

Однако качественно выращенная эпитаксиальная структура ещё не означает получения качественного и эффективного светодиодного чипа. Исключительно важными являются последующие технологические шаги, позволяющие создать из полупроводниковой пластины готовые к постановке в корпус светодиодные чипы, формирования выводов, нанесения защитного оптического покрытия, то есть проведения так называемого процесса «упаковки». На данном производственном этапе, называемом «формированием чипов», пластины с выращенными на них гетероструктурами проходят несколько циклов фотолитографии, химического травления, нанесения защитных и буферных слоев и электрических контактов. Стабильность и технологическая чистота каждого из указанных процессов определяют не только качество готового чипа, но и его цену. Именно поэтому производители постоянно совершенствуют каждый из отдельных процессов, доводя их до оптимального уровня. Сформированные чипы проходят визуальный контроль, определяются их оптические и электрические характеристики (рис. 3.). Затем пластина с чипами разделяется на отдельные чипы с помощью механической или лазерной резки. После этого чипы снова

тестируются, сортируются и поступают для конечного монтажа чипа в корпус светодиода. Наглядно с процессом производства светодиодного чипа и светодиода, а также светодиодного светильника можно ознакомиться, просмотрев видео на сайте компании «Оптоган», находящегося по адресу: www.optogan.ru/technology/video_technology.

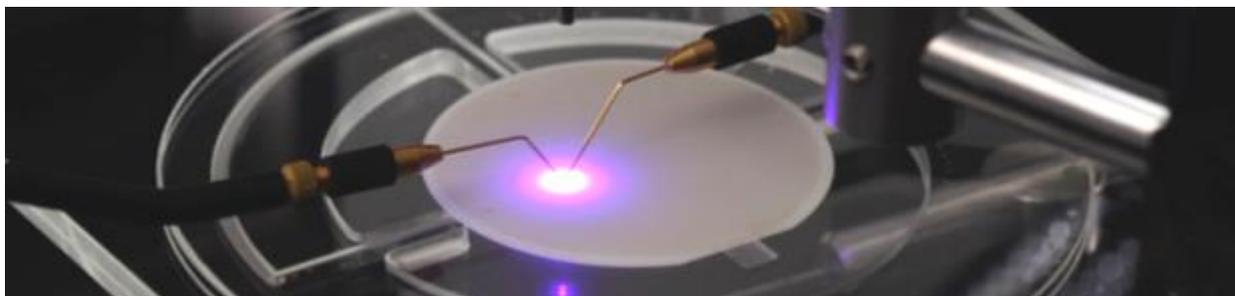


Рис. 3. Тестирование оптических и электрических характеристик светодиодных чипов на пластине, еще не разделенной на отдельные чипы [3].

В процессе монтажа светодиодный чип соединяется с внешними контактами корпуса светодиода и покрывается оптическим полимером, зачастую силиконом. Качество соединения чипа с внешними контактами корпуса определяет не только способность светодиода безотказно работать при заявленных электрических параметрах, но и определяет степень и качество отвода тепла из активной области светодиодного чипа, что влияет на долговечность светодиода. Оптический полимер не только защищает поверхность чипа от механического воздействия, но также способствует увеличению вывода излучения из чипа. Непосредственно в оптическом полимере может быть растворен люминофор, спектр поглощения которого приходится на спектр излучения чипа. В этом случае спектр излучения светодиода будет равен сумме спектра излучения чипа и спектра переизлучения люминофора.

Основное назначение светодиодных чипов состоит в том, чтобы излучать свет. Однако в процессе работы устройства часть поступающей электрической энергии теряется, переходя в тепло. Чрезмерный нагрев светодиодного чипа приводит к изменению его характеристик, снижению срока службы и даже к выходу из строя. Задача исследователей и разработчиков состоит в том, чтобы снизить количество тепловых потерь. Этого можно достичь различными путями, в частности, за счет уменьшения количества и толщины слоёв используемых материалов в светодиодном чипе, улучшения эпитаксиального качества гетероструктуры чипа, создания структуры, обеспечивающей равномерное растекание тока и многими другими способами [4–6].

Виды светодиодных чипов

По своей конструкции светодиодные чипы разделяются на *планарные (lateral)* и *вертикальные (vertical) светодиодные чипы*.

Производство тех и других начинается с роста гетероструктуры на выбранном материале подложки. В дальнейшем подложка остаётся в структуре планарных светодиодных чипов, тогда как из структуры вертикальных чипов подложка либо удаляется, если была изготовлена из диэлектрического материала, либо остаётся в структуре и исполняет роль электрического контакта в случае высокой электропроводности материала подложки.

Как известно, наиболее распространённый материал для подложки — это сапфир. Поскольку он является диэлектриком, оба электрических контакта латерального чипа располагаются на верхней поверхности сформированной гетероструктуры. Конструкция вертикальных чипов формируется так, чтобы электрические контакты находились по обеим сторонам гетероструктуры: сверху и снизу. В этом случае можно обеспечить более равномерное растекание тока, а также уменьшить количество излучения, поглощённого поверхностями контактов. Площадь верхнего контакта делают гораздо меньше площади нижнего, за счет чего поглощение и переотражение также снижается по сравнению с поглощением контактами планарных чипов. Подсчитано, что если чип имеет размеры 300×300 мкм², и при этом участок 100×100 мкм² занимают контактные площадки, то на четырёхдюймовой пластине 10% поверхности займут контакты. Конструкция вертикальных чипов обеспечивает лучший отвод тепла из активной области чипа.

Геометрия вертикального чипа допускает большую гибкость. На рис. 4 представлено несколько моделей вертикальных чипов.

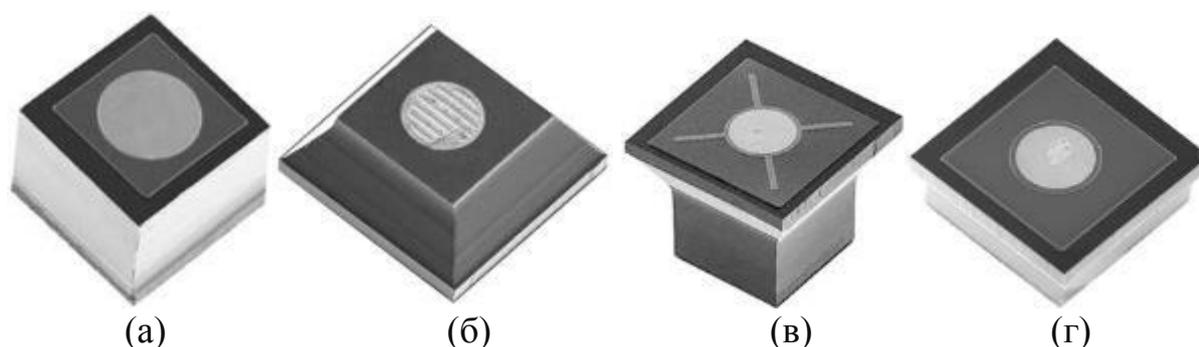


Рис. 4. Конструкции нескольких моделей светодиодных чипов производства компании Cree: (а) СВ230, (б) ХТ290 AuSn, (в) МВ290, (г) RT200-Gen III.

Отметим, что для обоих видов чипов характерно распространение излучения и через боковые стенки. Поэтому эффективность многокристального решения на базе таких чипов уменьшена по сравнению

с эффективностью устройства на базе одного чипа [7]. Однако эффективность чипа можно повысить за счет наклона его стенок.

Производство планарных чипов распространено в большей степени из-за относительной простоты процесса, сложившейся патентной ситуации и разработанного процесса сращивания пластин (*wafer bonding*) для переноса выращенной гетероструктуры чипа на подложку-носитель.

По способу монтажа светодиодные чипы подразделяются на **монтируемые разваркой проволокой** и **flip-чипы**.

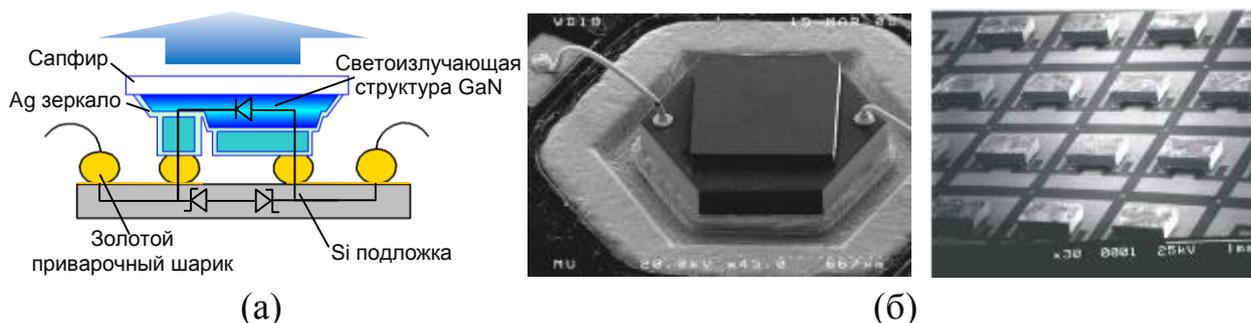


Рис. 5. Перевернутый кристалл на кремниевой подложке: схема устройства (а) и изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (б).

Разварка осуществляется с помощью ультразвуковой, термической или термоультразвуковой сварки металлических проволочек, чаще всего золотых. Во время разварки анод и катод светодиодного чипа соединяются с соответствующими контактными площадками корпуса. Flip-чипы монтируются методом перевернутого кристалла [8]. На рис. 5 (а) представлена схема устройства перевернутого кристалла, а на рис. 5 (б) — изображение, полученное с помощью СЭМ, одного кристалла в корпусе (слева) и набора чипов на кремниевой пластине, на которой нанесены линии электрической разводки.

Обсудим, например, чипы, излучающие синий свет. Гетероструктура таких чипов выращивается с использованием нитрида галлия (GaN). Чипы подразделяются по подложке, на которой осуществляется рост светодиодной структуры. Среди них различают чипы, выращенные на сапфире (GaN на сапфире), на кремнии (GaN на Si) и на карбиде кремния (GaN на SiC).

Светодиодные чипы, выращенные на сапфире, производятся в самом большом количестве за счет относительно низкой стоимости сапфировых подложек. Хотя эти чипы имеют характеристики ниже, чем чипы, выращенные на SiC, но при этом они значительно выигрывают у них в стоимости.

В Таблице 1 представлены основные характеристики материалов, из которых изготавливают подложки: значения постоянных решетки a , c ; рассогласование со слоем GaN; температурный коэффициент линейного

расширения α ; удельное сопротивление ρ . Как видно из Таблицы, наименьшее рассогласование с GaN имеет карбид кремния, однако стоимость этой подложки превышает стоимость подложки из сапфира почти в 20 раз.

Таблица 1. Физические свойства наиболее распространённых подложек, применяемых для эпитаксии GaN [9, 10]

Материал	Постоянные решётки, нм	Точка плавления, °C	Теплопроводность при 300 К, Вт/см·К	ζ , %	α , 10^{-6} K^{-1}	ρ , Ом·см	Цена подложки \varnothing 2 дюйма, €
Сапфир Al_2O_3	$a_0 = 0.4765$ $c_0 = 1.2982$	2030	0.32 оси c 0.35 оси a	13	9.03 оси c 5.0 \perp осей c	$> 10^{11}$	40
Кремний Si	$a_0 = 0.543102$	1414	1.56	17	2.616	$< 5 \cdot 10^4$	80
Карбид кремния 4H-SiC	$a_0 = 0.30730$ $c_0 = 1.0053$	2830	3.0–3.8	3.1	4.2	10	> 3000

Для увеличения вывода излучения из светодиодов подложку структурируют [11].

Светодиодные чипы, выращенные на SiC, получают ростом светоизлучающих структур InGaN на подложках SiC. Эти подложки обладают высокой тепло- и электропроводностью и поэтому используются как нижний контакт, что приводит к значительным положительным эффектам:

- к великолепному отводу тепла от p - n перехода (тепловое сопротивление p - n переход – корпус чипа составляет всего 2–5 °C/Вт);
- к увеличенной площади излучения, в 4 раза бóльшей, чем у чипа на подложке из сапфира;
- к тому, что нижний электрический контакт занимает всю площадь нижней грани, так что вся площадь активной области работает при одинаковой плотности тока, и нет локализации излучения и тока;
- к высокой механической прочности эвтектического соединения чипа и корпуса светодиода;
- к тому, что светодиодный чип имеет большой динамический диапазон и запас по импульсным токовым нагрузкам. Линейность люмен-амперной характеристики сохраняется вплоть до тока 120 мА, что соответствует его плотности почти в 200 А/см². Едва достигнув плотности тока 100–120 А/см², латеральные чипы теряют линейность.

Наиболее известной компанией, занимающейся разработкой и производством светодиодных чипов GaN на SiC, является корпорация

Cree. Теоретически и практически светодиоды GaN/SiC достигают лучшей производительности и эффективности.

Характерно, что эта компания одна из первых стала указывать в спецификациях на выпускаемые светодиоды так называемые «горячие люмены» — значение светового потока, испускаемого светодиодом, при температуре корпуса 85 °С. Подробнее с характеристиками светодиодов вы ознакомитесь далее.

Во время нормального режима работы светодиода обычно температура его корпуса составляет 55–85 °С. Знание «горячих люменов» позволяет точнее рассчитать количество светодиодов, необходимое для изготовления светодиодного светильника с требуемым значением светового потока. Также эти знания дают возможность лучше спрогнозировать и эффективность такой системы.

Коммерчески доступный продукт XT-E (рис. 6) обладает эффективностью 148 лм/Вт при 85 °С и 162 лм/Вт при 25 °С на рабочем токе 350 мА для холодного белого света 6000 К, и 114 лм/Вт — для 3000 К.



Рис. 6. Коммерческий продукт компании Cree — светодиод XLamp XT-E на подложке SiC [12].

Светодиодные чипы, выращенные на Si. Преимуществом системы GaN на Si перед чипами на сапфире является потенциальное снижение стоимости изготовления светодиодных чипов (стоимость подложки сейчас составляет 30% себестоимости чипа на сапфире). К тому же, обычный размер сапфировых подложек — 2 дюйма, в то время как в кремниевой технологии сейчас используются подложки диаметром до 8 дюймов. Увеличение площади ростовой поверхности за один производственный цикл существенно увеличивает количество производимых чипов, что снижает их цену. Стоимость 6-дюймовой подложки Si на 30 \$ дешевле стоимости 2-дюймовой подложки из сапфира, и при этом на ней можно вырастить в 10 раз больше чипов. Возможность создавать полупроводниковые устройства на кремниевых подложках даёт толчок к повышению интеграции устройств, к разработке «умных» светодиодных чипов и «умных светильников», начиная со светодиодных ламп, характеристиками которых можно управлять, в частности, регулировать световой поток.

К основным компаниям, развивающим технологию GaN на Si для светодиодов, относятся следующие:

- Osram Opto Semiconductor, Германия. В 2012 г. эта компания изготовила прототипы белых и синих светодиодов InGaN на 150 мм (6-дюймовой) кремниевых подложках;
- Azzurro Semiconductors, Германия. Эта компания выращивает GaN светодиоды на 150 мм Si подложках по запатентованной технологии, которая позволяет создавать слой GaN толщиной 8 мкм. Изгиб 150 мм подложки при этом не превышает 20 мкм, что позволяет использовать стандартный процесс CMOS для массового производства светодиодов.
- Bridgelux, США. Эта компания разрабатывает технологию GaN на Si и планирует в 2013 г. перейти к серийному производству.
- Siltronic AG, Бельгия, совместно с Исследовательским институтом наноэлектроники разрабатывает процесс роста устройств на подложках Si диаметром 200 мм.

На рис. 7 представлен образец светодиодного чипа, изготовленного на подложке Si.

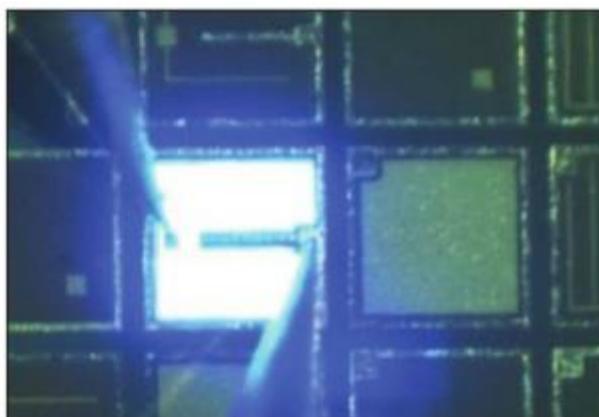


Рис. 7. Светодиод GaInN, выращенный на 6-дюймовой подложке Si [13].

Одна из трудностей развития данной технологии заключается в разных коэффициентах термического расширения Si и GaN при температуре роста 1000 °С. При охлаждении эти материалы начинают растрескиваться. Введение дополнительного слоя, сжимающего GaN перед нагревом, позволяет выращивать светодиодные структуры без трещин.

Светодиодные чипы, выращенные на GaN. Такие чипы обладают в 1000 раз меньшей плотностью дислокаций по сравнению с выращенными на сапфире. Рабочая плотность тока увеличена в них до 250 А/см² (в чипах на сапфире она составляет всего 100 А/см²), однако стоимость подложки из GaN существенно превышает стоимость подложки из сапфира.

Компания Sora — одна из немногих компаний, занимающихся ростом структур GaN на GaN. На рис. 8 представлена фотография светодиодного чипа, выращенного в этой компании. Площадь чипа — 0.07 мм². Площадь поверхности чипа во много раз больше площади поверхности перехода, что обеспечивает повышенный вывод генерируемого излучения (рис. 8).

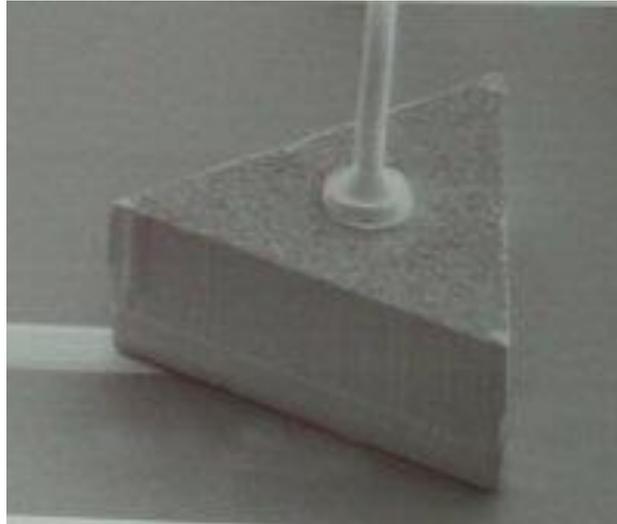


Рис. 8. Светодиодный чип GaN, выращенный на подложке GaN. Форма продольного сечения чипа представляет собой треугольник.

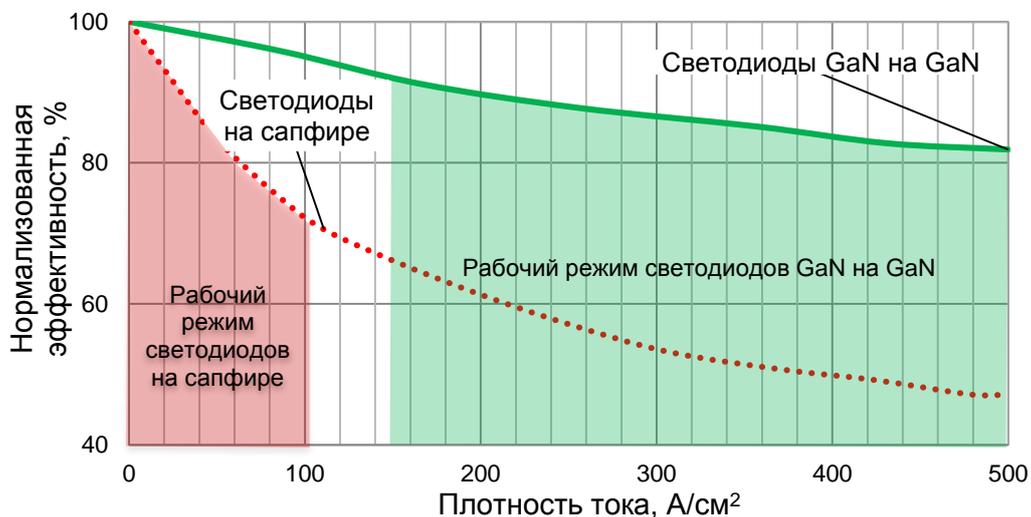


Рис. 9. Эффективность в рабочем режиме светодиодов, выращенных на подложках из сапфира, карбида кремния и нитрида галлия.

Чипы GaN на GaN имеют меньшее количество ростовых дефектов, благодаря чему можно получать в 10 раз больше излучения с той же площади. При этом материал выдерживает большие температурные нагрузки, что упрощает изготовление мощных светодиодных ламп, которые в этом случае могут работать с пассивным радиатором. В частности, компания Soraа в феврале 2013 г. выпустила лампу MR16 с выдающимися характеристиками [<http://www.soraa.com/technology/gan-on-gan>]. На рис. 9 представлено сравнение эффективности GaN чипов, выращенных на сапфире, и чипов GaN-на-GaN.

По падению напряжения на единичном чипе, чипы подразделяются на **низковольтные** и **высоковольтные**. Низковольтные чипы имеют в единичном устройстве один *p-n* переход, что обеспечивает падение напряжения около 3.2 В для чипа синего цвета свечения на рабочем токе

20 мА. По сравнению с напряжением в сети в 220 В это напряжение мало. Высоковольтные чипы представляют собой набор низковольтных чипов, соединённых между собой (рис. 10). Эти соединения формируются в процессе металлизации — практически на заключительном этапе изготовления светодиодного чипа. Высоковольтные чипы могут применяться в тех устройствах, в которых источник света рассчитан на большое напряжение, например, в лампах, заменяющих лампы накаливания и работающих непосредственно от сети. Процесс изготовления светодиодов из таких источников упрощается, поскольку требует гораздо меньшего количества операций при постановке чипов в корпус и при формировании сварных соединений.

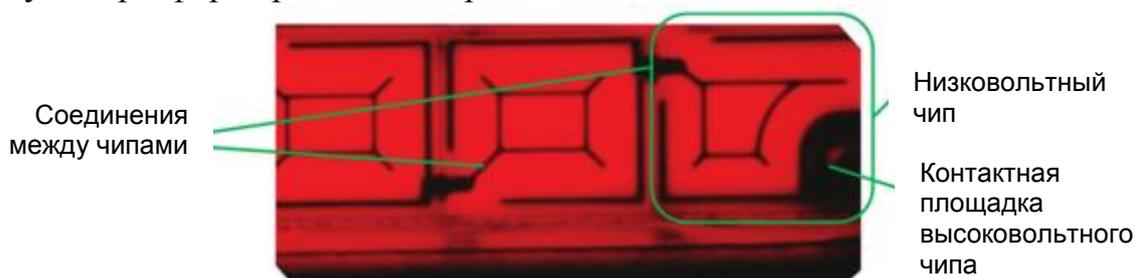


Рис. 10. Структурные элементы высоковольтного светодиодного чипа [13].

Высоковольтные чипы могут обеспечить высокую эффективность светодиодного модуля и светильника в целом, поскольку КПД сопутствующего источника питания повышается при повышении выходного напряжения и понижении выходного тока.

По создаваемому излучению светодиодные чипы подразделяются на **ультрафиолетовые, фиолетовые, синие, зеленые, жёлтые, оранжевые, красные и инфракрасные**. Название связано со спектральным диапазоном, закреплённым за тем или иным цветом. Характеристики светодиодных чипов различных цветовых диапазонов отличаются из-за различий в свойствах материалов, из которых изготавливаются чипы.

Таблица 2. Физические свойства материалов, используемых для производства светодиодных чипов [9]

Материал	Постоянные кристаллической решётки, нм	Точка плавления, °С	Теплопроводность при 300 К, Вт/см·К	ΔE при 300 К, эВ	α , 10^{-6} K^{-1}
AlN	$a_0 = 0.311$ $c_0 = 0.498$	3487	2.85	6.2	5.3 оси c 4.2 \perp оси c
GaN	$a_0 = 0.318$ $c_0 = 0.518$	2791	1.3	3.4	3.2 оси c 5.6 \perp оси c
InN	$a_0 = 0.354$ $c_0 = 0.57$	2146	0.8	1.89	3.7 оси c 5.7 \perp оси c
AlAs	$a_0 = 0.566$	1740	0.91	2.165	5.2
GaAs	$a_0 = 0.565$	1240	0.55	1.424	5.73

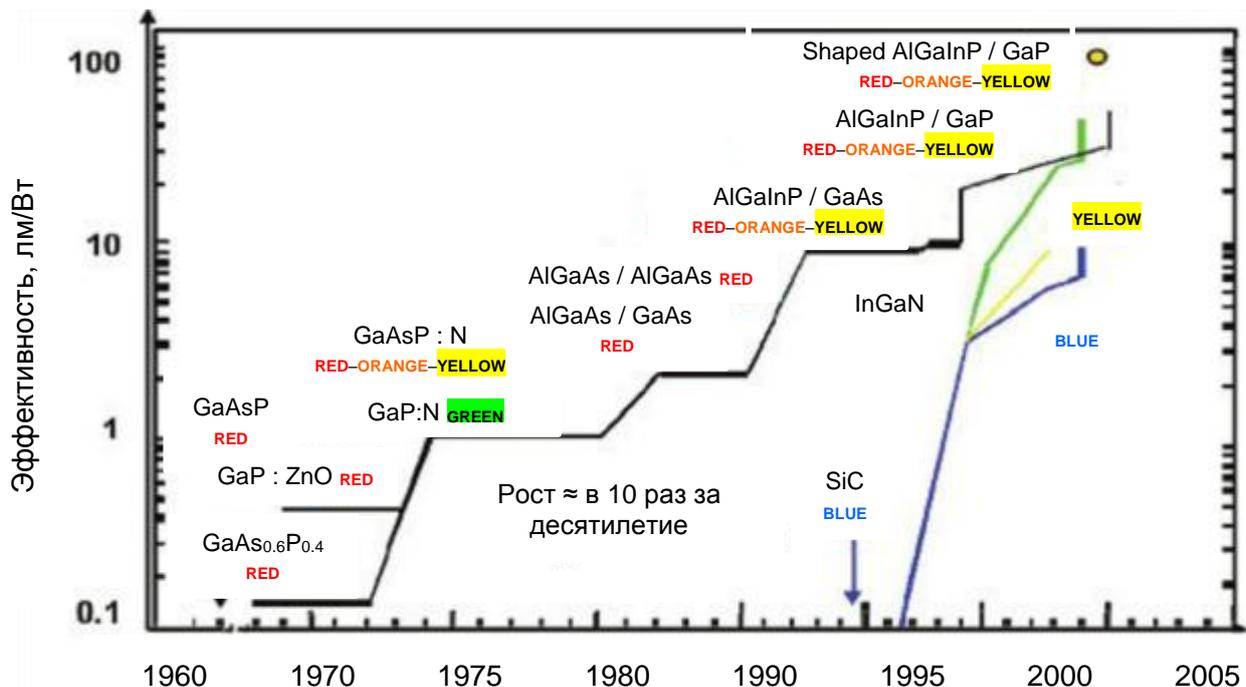


Рис. 11. Световая эффективность красных, жёлтых, зелёных и синих светодиодов с 1960 по 2000 г. [13].

В Таблице 2 представлены несколько основных физических характеристик полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются гетероструктуры светодиодных чипов. В Таблице обозначены: ΔE — ширина запрещённой зоны, α — температурный коэффициент линейного расширения.

На рис. 11 представлена хронология повышения световой эффективности светодиодных структур красного, оранжевого, жёлтого, зелёного, синего цветов излучения. Отследите по графику, когда началось изготовления тех или иных видов цветных светодиодов.

Красные светодиоды, длинноволновые светоизлучающие устройства диапазона 560–660 нм на основе AlInGaP, на сегодняшний день имеют эффективность 200 лм/Вт и активно применяются в автомобильных фарах, источниках белого света с высоким индексом цветопередачи и в архитектурных светильниках. Такую эффективность удалось достичь за счет использования тонкоплёночной структуры чипа. До этого, несмотря на достигнутое значение внутренней квантовой эффективности 90% за счет выращивания светодиодов на высококачественной подложке методом MOCVD, из-за высокого значения коэффициента преломления AlInGaP поглощалось до 96% сгенерированного в гетероструктуре света, и только 4% света выходило за пределы светодиодного чипа. Светодиод с пиковой длиной волны излучения в 615 нм показывал эффективность лишь в 40 лм/Вт.

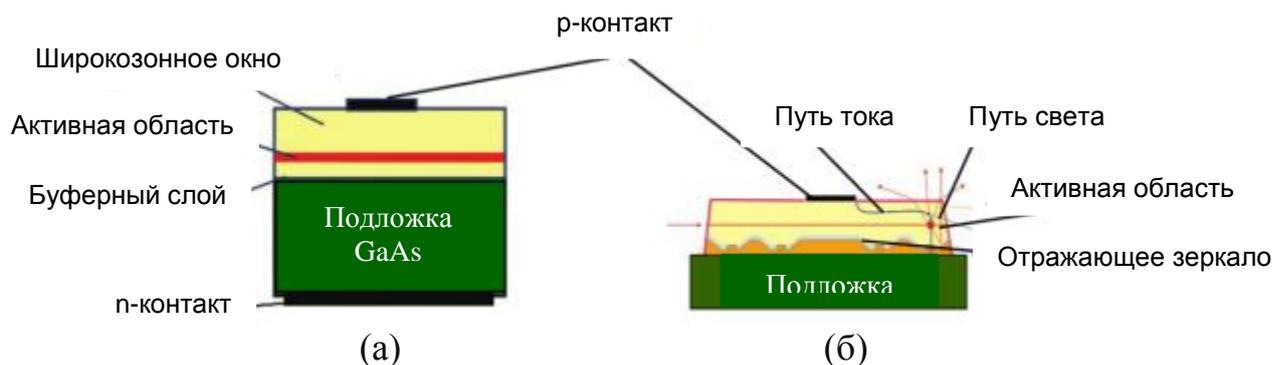


Рис. 12. Конструкция традиционного (а) и тонкопленочного (*thin film LED*) (б) светодиодных чипов [13].

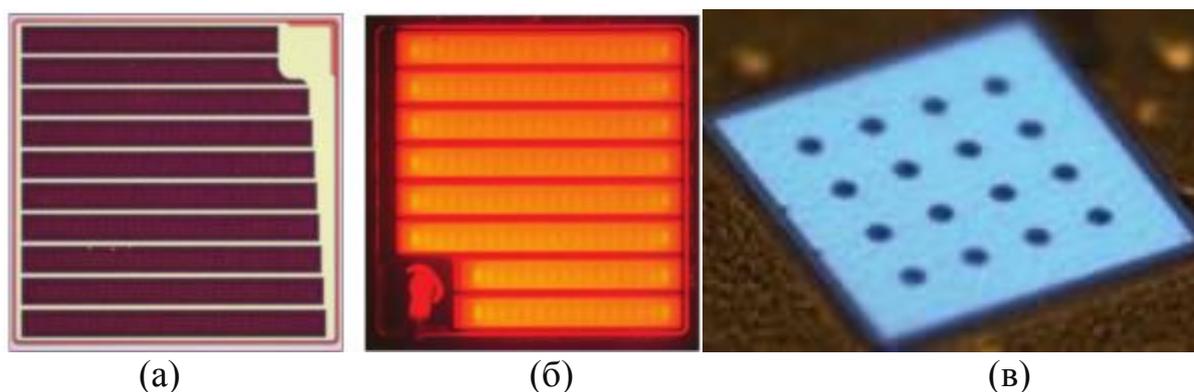


Рис. 13. Тонкоплёночный светодиодный чип производства компании Osram площадью 1 мм²: внешний вид до подачи питания (а), вид во время работы [13] (б). Тонкоплёночный светодиодный чип производства компании Philips, используемый в светодиодах Rebel [14] (в).

На рис. 12, 13 представлены конструкции и внешний вид тонкоплёночных чипов.

С целью улучшения характеристик в тонкоплёночную структуру чипа между поглощающей свет подложкой и активной областью было введено отражающее зеркало. Для снижения поглощения света была уменьшена толщина активной области и увеличена ширина запрещённой зоны, а также улучшены проводимость слоев и растекание тока путём совершенствования контактов.

На рис. 14–19 приведены типичные зависимости основных характеристик синих, зелёных и красных чипов. Их различия создают определённые трудности для разработчиков RGB-светодиодных систем.

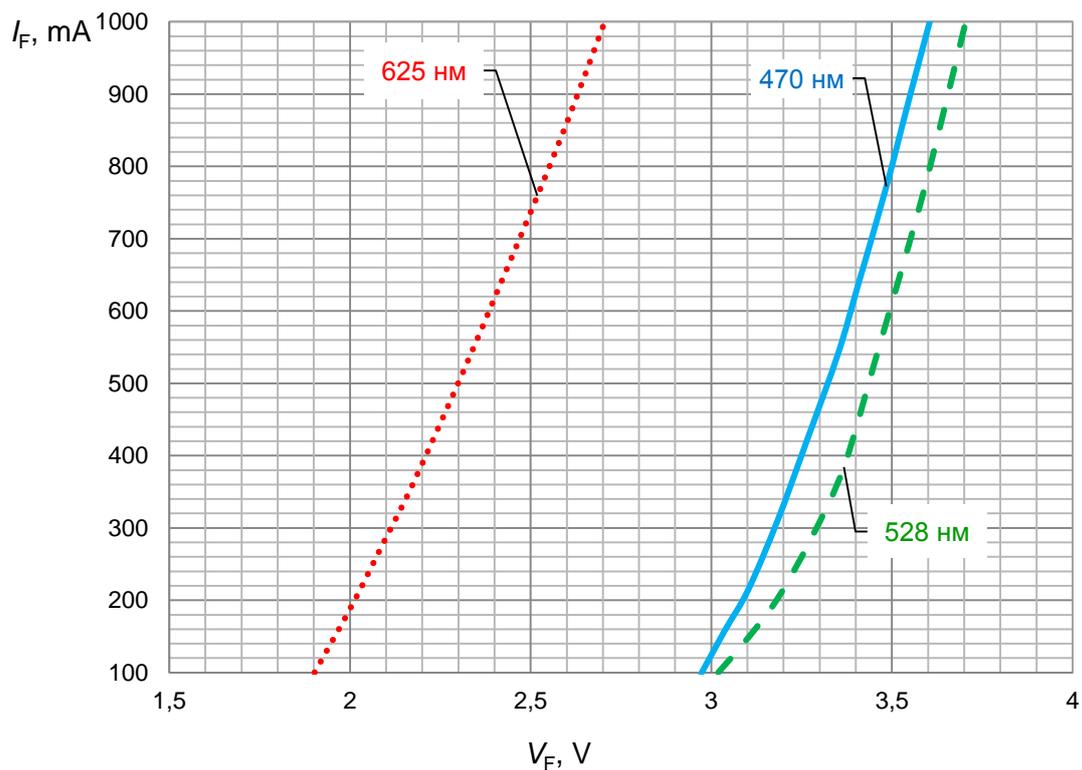


Рис. 14. ВАХ светодиодов с пиковой длиной волны излучения 625, 528 и 470 нм при $T = 25^\circ\text{C}$ [15].

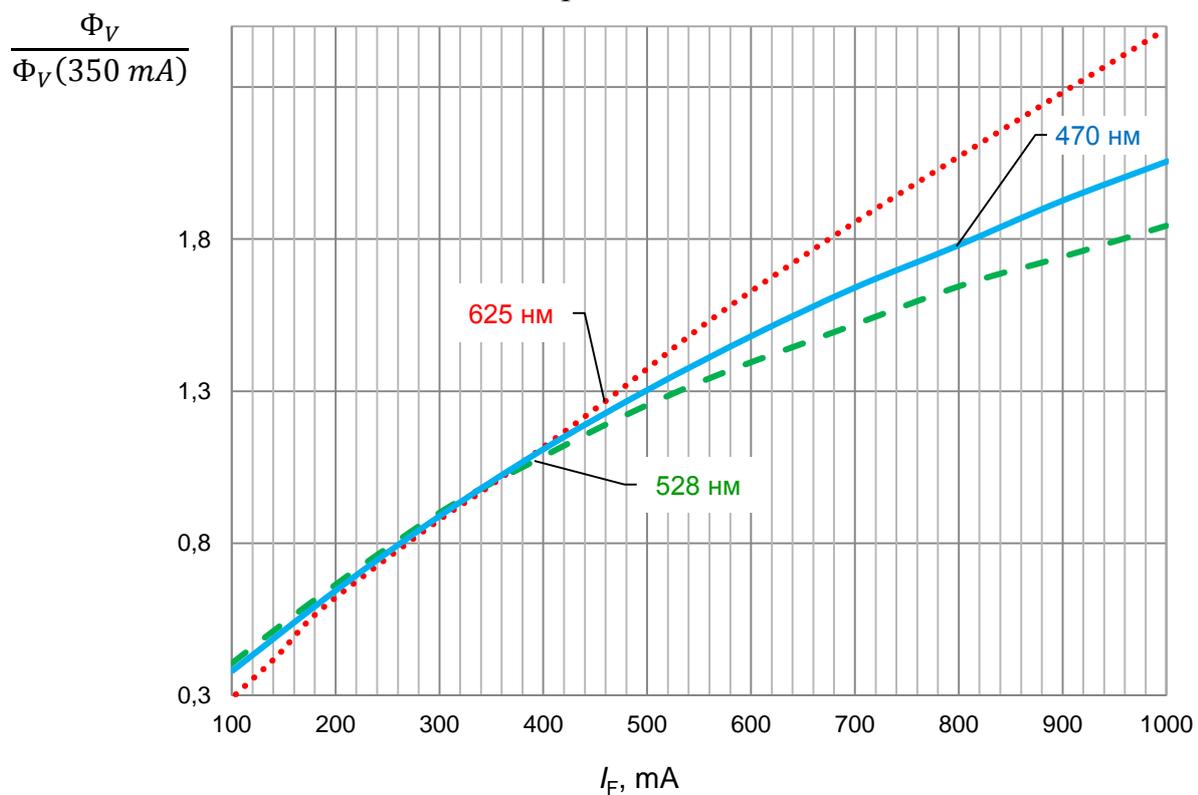


Рис. 15. Зависимость изменения светового потока относительно значения, полученного при 350 мА, от тока для светодиодного чипа с пиковой длиной волны излучения 625, 528 и 470 нм при $T = 25^\circ\text{C}$ [15].

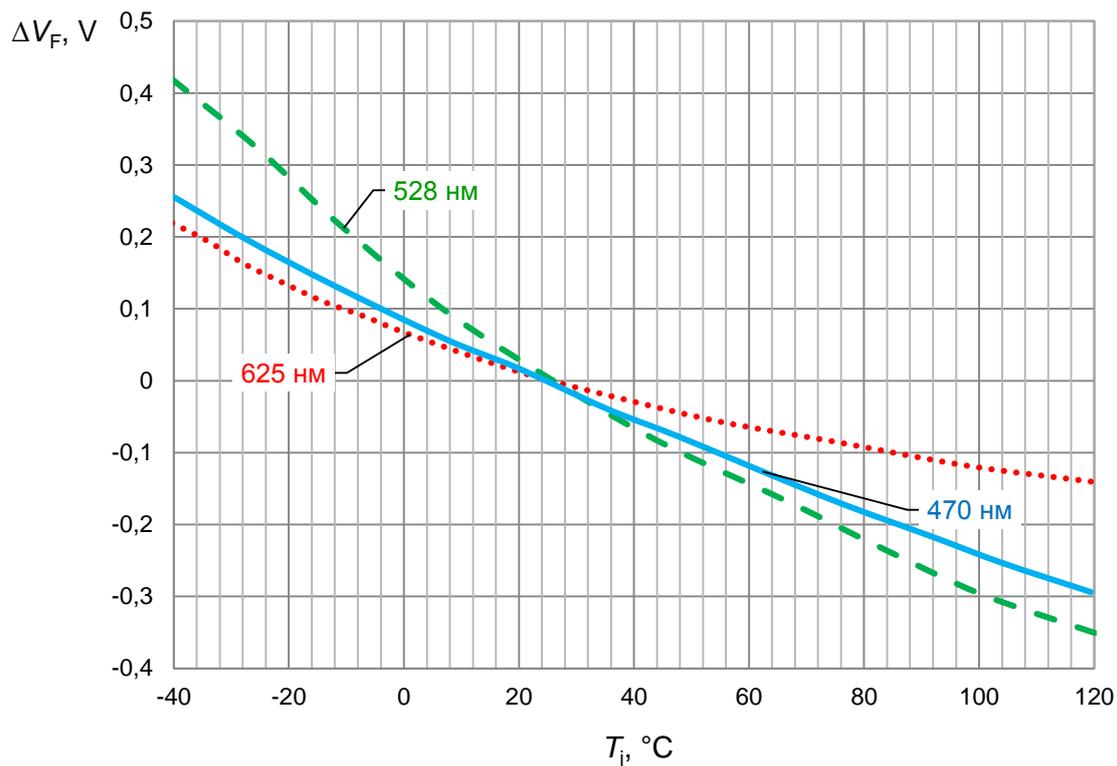


Рис. 16. Изменение напряжения $\Delta V_F = V^{T_j} - V^{25^\circ\text{C}}$ с ростом температуры перехода T_j для чипа с пиковой длиной волны излучения 625, 528 и 470 нм [15].

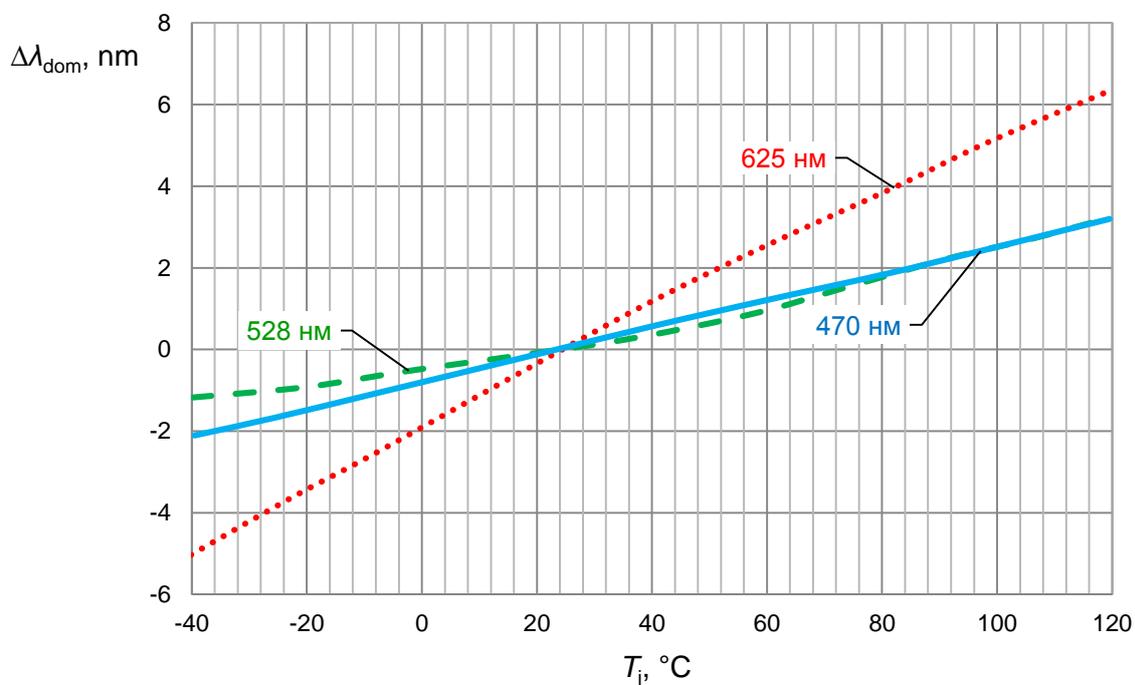


Рис. 17. Изменение доминантной длины волны $\Delta \lambda_{\text{dom}}$ с ростом температуры p - n перехода T_j для чипа с пиковой длиной волны излучения 625 (а), 528 (б) и 470 нм (в) [15].

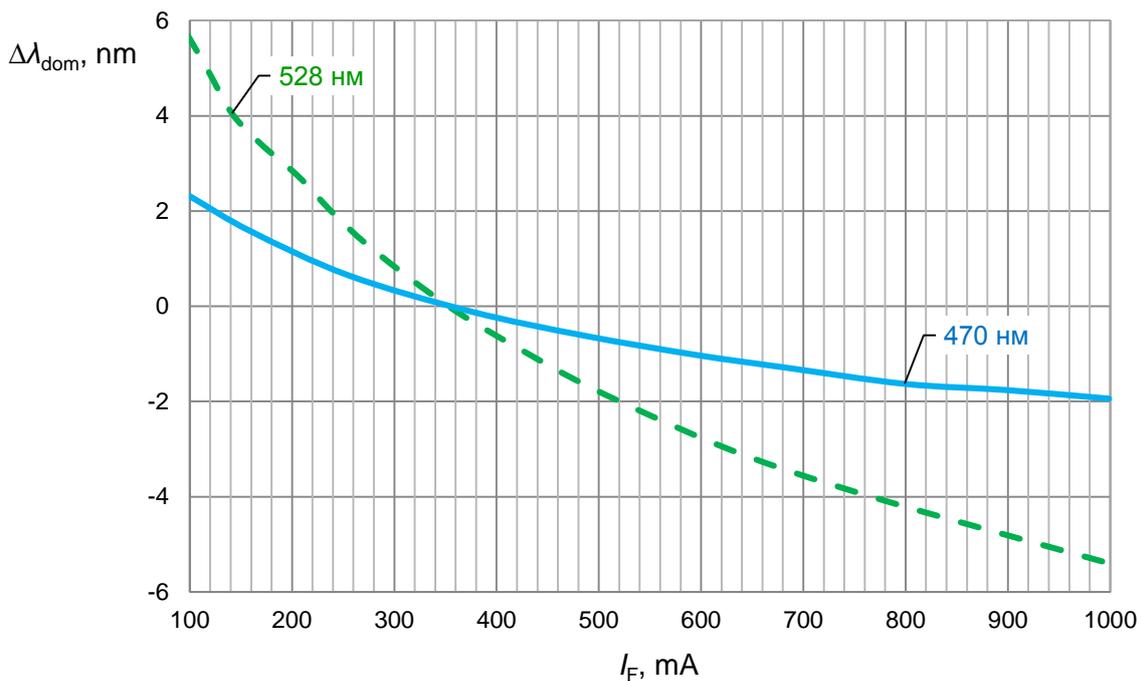


Рис. 18. Изменение доминантной длины волны $\Delta\lambda_{dom}$ с ростом постоянного тока I_F для чипа с пиковой длиной волны излучения 528 и 470 нм [15].

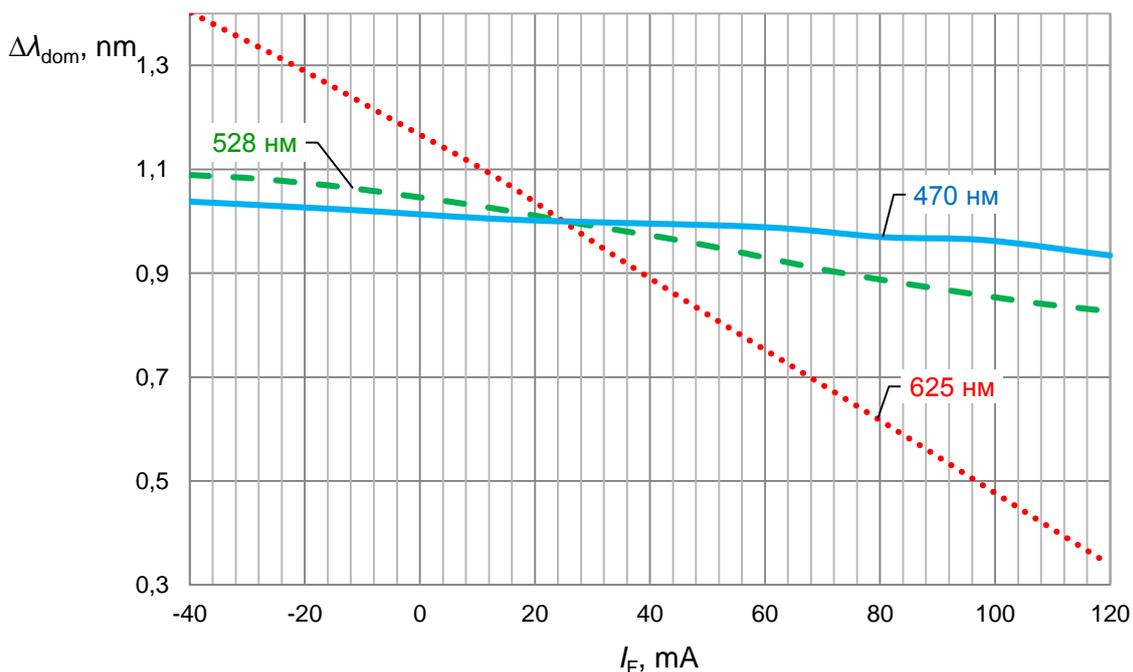


Рис. 19. Относительное изменение светового потока с ростом температуры p - n перехода T_j чипа с пиковой длиной волны излучения 625, 528 и 470 нм [15].

В качестве примера применения «цветных» светодиодов можно привести следующий: зелёные и красные светодиоды Gold Dragon производства компании Osram установлены в виде линии перед пешеходными переходами в городах Испании Burgosand и Terrasa для

снижения уровня дорожно-транспортных происшествий (рис. 20). Линии являются предупредительными, они синхронизированы со светофорами. Двойной световой сигнал служит для повышения внимания пешеходов.



Рис. 20. Применение зелёных и красных светодиодов в качестве дополнительных сигнальных элементов к светофорам [16].

1.1.2. Корпус светодиода

Основное назначение корпуса светодиода — обеспечить электрическое соединение, отвести тепло от чипа к радиатору, создать определённую диаграмму направленности излучения и защитить светодиодный чип и соединения от внешней механической нагрузки.

Материал корпуса подбирается в зависимости от мощности будущего светодиода. Для маломощных светодиодов используют корпуса из пластика, для мощных, потребляющих более 1 Вт — из керамики, а также корпуса на металлическом основании (*metal core printed circuit board* — *MCPCB*).

Обычно используют корпуса белого цвета с высоким коэффициентом отражения внутренней поверхности для увеличения вывода света из корпуса. Однако для специальных приложений могут применяться и корпуса других цветов. Так, например, для применения в подсветке экранов мониторов и дисплеев с контурами чёрного цвета светодиодные чипы также помещаются в черные корпуса, чтобы устройства визуально воспринимались как единое целое.

Для увеличения коэффициента отражения света на внутреннюю поверхность металлического, керамического или пластикового корпуса наносят металлическое покрытие. В частности, для изготовления синих, красных, зелёных и белых светодиодов её серебруют. Пластиковый корпус в основном выполняют из полиметилметакрилата (PMMA).

Корпуса светодиодов должны обладать:

- высокими тепловым сопротивлением и термостойкостью (*high heat resistance*);

- высокой прочностью (*strength*);
- высокой жёсткостью (*stiffness*) в широком диапазоне температур;
- низким влагопоглощением (*low moisture absorption*);
- превосходной химической стойкостью (*excellent chemical resistance*);
- превосходными электрическими свойствами (*excellent electrical properties*);
- высоким коэффициентом отражения (*high reflectivity*);
- устойчивостью к воздействию излучения светодиодного чипа (*light stabilized*).

1.1.3. Оптическая система светодиода

1.1.3.1. Полимерный компаунд

Основное назначение полимерного материала, покрывающего поверхности чипов и электрических выводов — увеличение вывода света из светодиодного чипа и защита внутренних элементов корпуса от внешних воздействий. Применяемый материал должен обладать определёнными коэффициентами термического расширения и влагопоглощения, устойчивостью к действию ультрафиолетового излучения солнца и к условиям окружающей среды. В случае наличия люминофора полимерный компаунд является основой для его удобного, с точки зрения производства, нанесения на светодиодный чип. Полимерный компаунд чаще всего является кремнийорганическим соединением и в производстве используется в качестве двухкомпонентного материала, одна компонента которого является основой, а вторая — отвердителем. Хранение таких материалов в раздельном состоянии возможно в течение длительного времени, около года. При смешивании же таких материалов полимеризация происходит в течение 8–12 часов.

Нанесение полимерного компаунда на корпус светодиода осуществляется разными способами: напылением полимерной композиции сжатым воздухом с последующей полимеризацией в конвейерных печах, т. н. «заливкой» (*dispensing*); нанесением полимерной композиции под давлением с одновременным нагревом для обеспечения полной полимеризации оптической смеси (*molding*); напылением нескольких слоев полимерной композиции на поверхность светодиодного чипа (*spray coating*) и некоторыми другими.

1.1.3.2. Линза

Направление распространения света из светодиода определяется конструкцией корпуса и линзой. Назначение линзы — создавать определённое распространение света в пространстве и при этом обеспечить как можно больший вывод света из светодиодного чипа [17]. Форма современных линз может быть любой. В основном же используют полусферические линзы, распределение силы света от которых подчиняется закону косинуса.

В ряде случаев используются «плавающие» линзы, которые нежёстко фиксируются к корпусу светодиода. Такая линза адгезионно закрепляется на кремнийорганический компаунд и как бы «плавает» в нем. Подобная конструкция позволяет исключить механические напряжения при термоциклировании и обеспечить автофокусировку в широком диапазоне температур окружающей среды. Корпус светодиода, используемый для такой конструкции линзы, имеет показатель теплового сопротивления $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Оптическая ось линзы светодиода проходит точно через геометрический центр корпуса, что улучшает совместимость и упрощает конструкцию линз вторичной оптики.

Одним из основных материалов для линз светодиодов является поликарбонат. Поликарбонат обладает высоким значением коэффициента преломления, позволяя изготавливать линзы малой толщины. Пропускание таких линз зависит от их толщины.



Рис. 21. Фокусирующие линзы из поликарбоната могут использоваться в конструкциях автомобильных фар [16].

Линзы из поликарбоната представляют сейчас большой интерес для исследователей-оптиков. Одно из основных их применений – изготовление однокомпонентных линз для автомобильных светодиодных источников света (рис. 21). В настоящее время автомобильные фары содержат несколько отдельных компонентов, которые тяжелее линз из поликарбоната.

1.1.3.3. Люминофор. Удалённый люминофор

Люминофор — это вещество, обладающее люминесценцией, то есть способностью преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение [18]. В производстве светодиодов люминофор изготавливают в виде порошка и используют его для получения источника белого света. Поглотив энергию от коротковолнового излучения чипов, люминофор переизлучает её в длинноволновой области спектра. Однако существуют и антистоксовые люминофоры, длина волны излучения которых меньше длины волны максимума поглощения. Антистоксовые люминофоры имеют низкую эффективность преобразования и пока активно не используются.

Максимум эффективности от светодиода, в конструкции которого использован люминофор, можно получить в случае, если пиковая длина волны излучения чипа совпадет с длиной волны максимума поглощения

люминофора, и при этом и чип, и люминофор являются высокоэффективными. В том случае, если координаты цветности чипа и люминофора пересекают область белого света на диаграмме цветности (рис. 22), подобранная должным образом концентрация люминофора позволяет изготовить источник белого света [2].

В настоящее время для получения источников белого света на основе систем «светодиодный чип – люминофор» используются силикатные, нитридные и алюминатные люминофоры, легированные металлами редких земель: YAG:Eu , $\text{CaMoO}_4:\text{Eu}$, $\text{Y}_3(\text{Al,Si})_5(\text{O,N})_{12}:\text{Ce}$, $\text{Sr}_2\text{Si}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_x\text{N}_{8-x}:\text{Eu}$ и другие. Цвет свечения таких люминофоров — зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. В светодиодной промышленности наиболее распространены люминофоры на основе иттрий-алюминиевых гранатов (ИАГ), легированных трёхвалентным церием, и на основе силикатов щелочно-земельных металлов, легированных европием. Активно развиваются люминофоры на основе оксинитридных соединений. Люминофоры на основе ИАГ обладают на данный момент квантовым выходом более 90% в отличие от силикатных и нитридных.

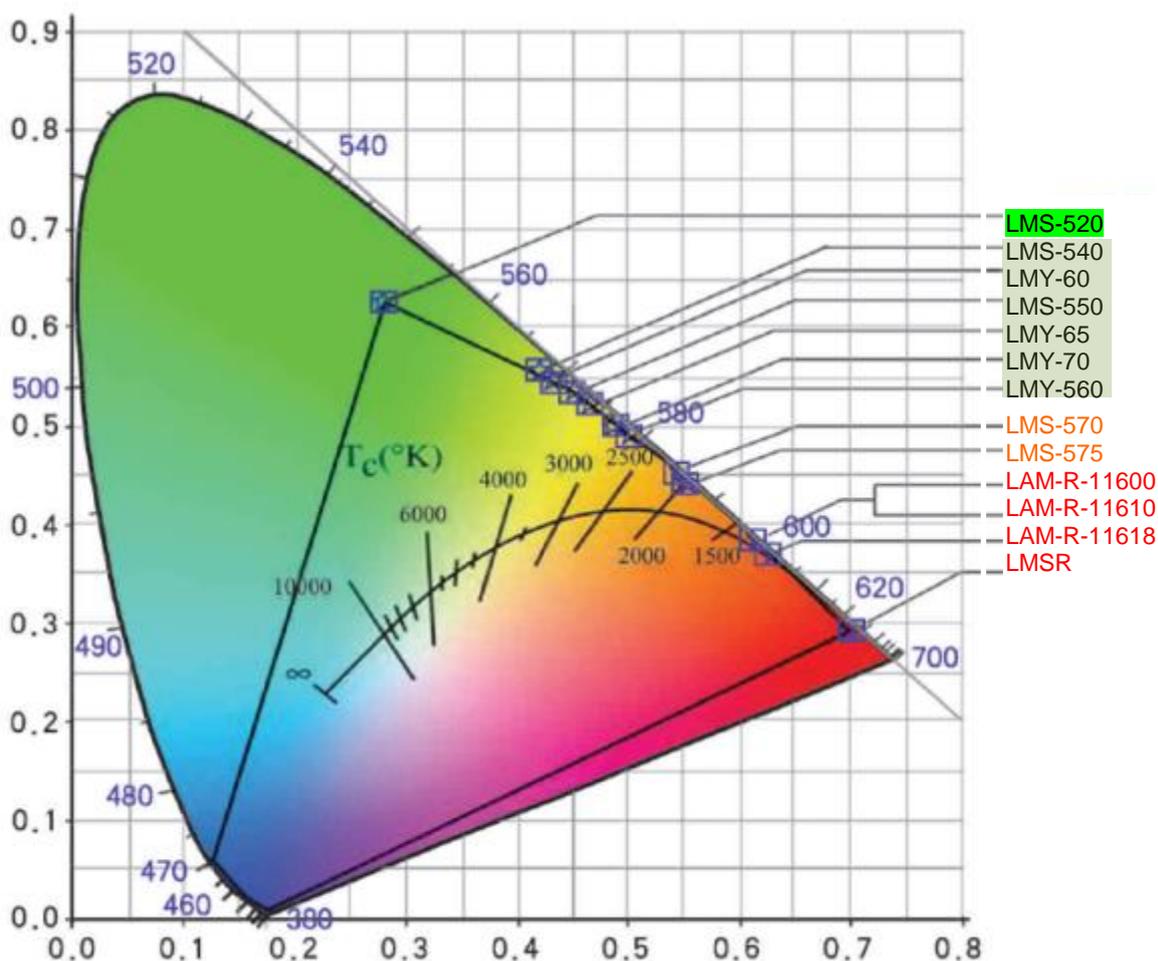


Рис. 22. Координаты цветности люминофоров, применяемых в светодиодных источниках света.

Таблица 3. Основные характеристики люминофоров, используемых в светодиодных технологиях

Структурная формула люминофора	Длина волны максимума излучения, нм	Длина волны максимума возбуждения люминесценции, нм
$\text{Si}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{16-y}\text{N}_y(\text{Sr},\text{Ca}):\text{Eu}$	580	410
$\text{Y}_3(\text{Al},\text{Si})_5(\text{O},\text{N})_{12}:\text{Ce}$	590	460
$\text{Sr}_2\text{Si}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_x\text{N}_{8-x}:\text{Eu}$	620..640	нет данных
$\text{Ca}_x\text{Al}_y\text{Si}_z\text{N}_3:\text{Ce}$	565	460
$\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{N}_{2-z}\text{O}_z:\text{Ce}$	630	530
$\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{N}_{2-z}\text{O}_z(\text{Al}):\text{Ce}$	560	460

В Таблице 3 представлен небольшой перечень люминофоров, используемых в светодиодной промышленности, и их основных характеристик. Как видите, для возбуждения некоторых из них требуется длина волны 460 нм. Эта длина волны соответствует излучению синих светодиодных чипов. Использование чипов с пиковой длиной волны излучения равной длине волны максимума возбуждения люминесценции люминофора позволяет наиболее эффективно преобразовывать излучение.

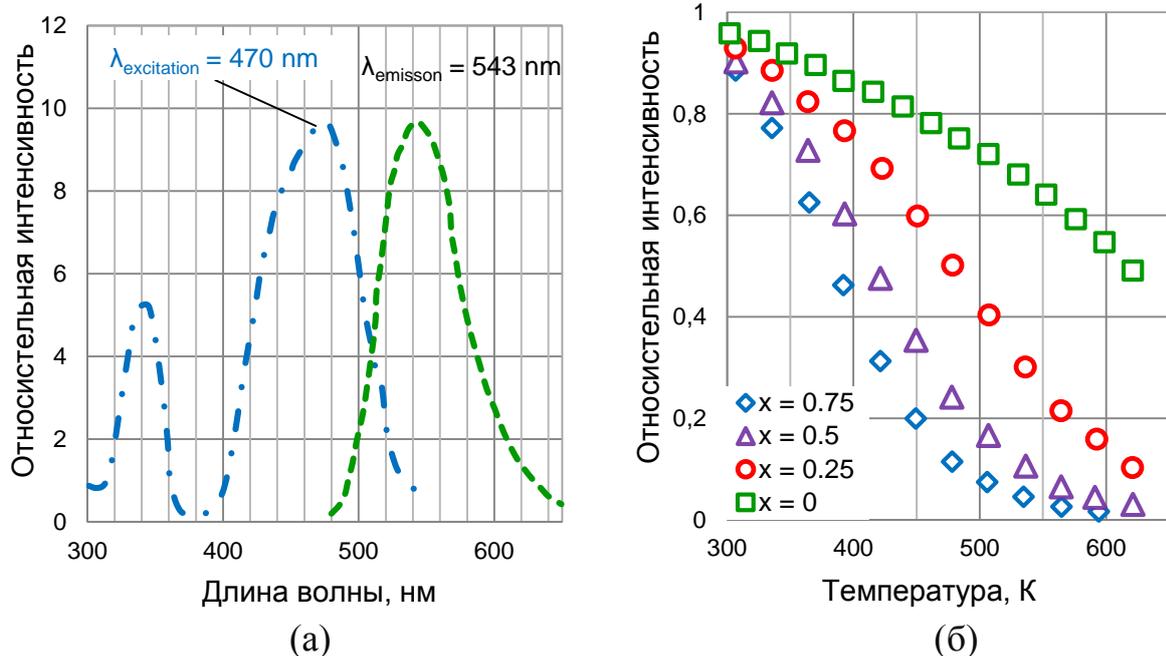


Рис. 23. Один из видов спектра возбуждения и излучения люминофора (а) и температурная зависимость люминесценции люминофора $(\text{Y}_{1-x}\text{Gd}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+} 0.3\%$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$), возбуждённого длиной волны 465 нм, в диапазоне 300–600 К (б).

Основными характеристиками люминофора являются: коэффициент преобразования энергии, спектры возбуждения и излучения, зависимость излучения от температуры и времени воздействия возбуждающего излучения, распределение частиц люминофора по размерам.

Эффективность и сохранение свойств преобразования энергии люминофором зависит от температуры, времени работы, влажности и других факторов. В зависимости от назначения светодиода, для получения белого света используется определенный тип люминофора. На рис. 23 в качестве примера представлены спектры излучения и поглощения люминофора, а также зависимость люминесценции люминофора от температуры для разных концентраций Gd и Y.

Люминофор может совмещаться с источником синего цвета свечения разными способами: наноситься прямо на чип путем закрепления частиц люминофора в «матрице» полимерного компаунда, покрывающего чип (рис. 24 (а)), или путем размещения частиц люминофора в оптическом материале (оптическом полимере, пластике) и расположения его на некотором удалении от чипа (рис. 24 (б)).

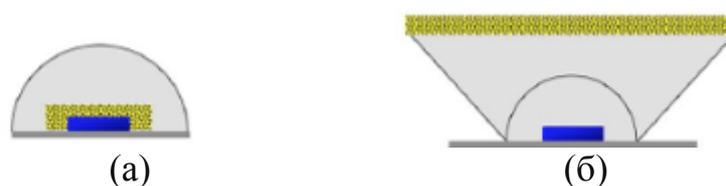


Рис. 24. Различные способы размещения люминофора: традиционный способ — люминофор наносится прямо на чип (а); удалённый люминофор (б).

Люминофор в непосредственном контакте с чипом. Такая конструкция светодиода создаёт условия для сильного нагрева люминофора в процессе работы светодиодного чипа, что приводит к заметной деградации свойств устройства (рис. 25).

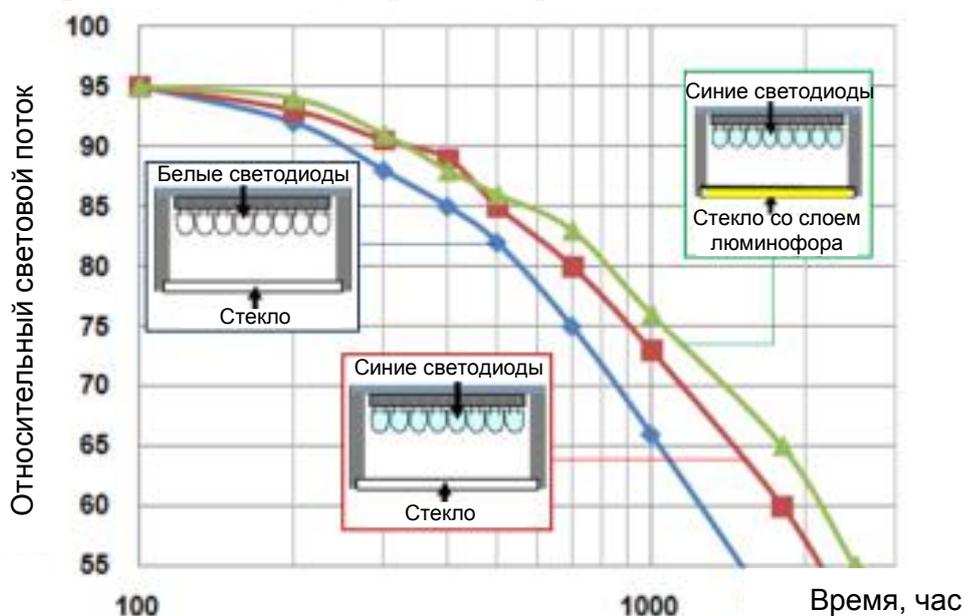


Рис. 25. Снижение светового потока из-за старения люминофора при различных способах его нанесения.

Зависимость, представленная на рис. 25, характерна для всех люминофоров, но в разной степени. Тем не менее, 85% производимых светодиодов белого света изготавливаются именно по такой технологии нанесения люминофора.

Удалённый люминофор. По расчётным оценкам, устройства, в которых используются высокоэффективные чипы и удалённые люминофоры, могут показать более высокую световую эффективность [19]. Удалённое размещение люминофора даёт следующие преимущества:

- уменьшение теплового воздействия на плёнку люминофора устраняет цветовой сдвиг во времени, повышая цветовую стабильность;
- увеличение эффективности преобразования;
- контролируемую яркость;
- высокую однородность цвета благодаря наличию «смешивающей камеры» — замкнутого пространства между светодиодами и удалённым люминофором, в котором происходит многократное переотражение света от обоих источников;
- отсутствие бликов (устранение мерцания, блёскости и дискомфорта для глаз);
- сохранение 70% светового потока после использования в течение 50 000 ч;
- возможность совершенной равномерности и естественности цвета, совмещения координат цветности света с центром на кривой излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ), тем самым, производства устройств с лучшей в промышленных условиях стабильностью цветовой точки (1 и 2 эллипсы Мак Адама);
- возможность создания ярких светодиодных продуктов или сокращения расходов за счет использования меньшего количества светодиодов;
- этот вариант качественнее и дешевле, чем конструкция белого светодиода.

На сегодня удалённый люминофор применяется в нескольких устройствах:

- в системе Fortimo производства компании Philips с эффективностью 62 лм/Вт при 1100 лм (рис. 26 (а));
- в светодиодах Vio производства компании General Electric с эффективностью 55 лм/Вт (рис. 26 (б));
- в заменителе лампы накаливания мощностью 60 Вт производства компании Cree с эффективностью 80 лм/Вт;
- в офисном светильнике производства компании Лидер Лайт с эффективностью 57 лм/Вт.

Удалённый люминофор применяют и в конструкциях рассеивателей светодиодных светильников.

Поскольку люминофор влияет на стоимость итогового светодиода, важной задачей для разработчиков является уменьшение люминофора,

приходящегося на единый светодиод, при наиболее эффективном его использовании и сохранении его свойств как источника дополнительного цвета при получении белого цвета.



Рис. 26. Светодиодные модули с системой удаленного люминофора: Fortimo DLM 1100 (Philips) [20] (а); Vio (GE) [21] (б).

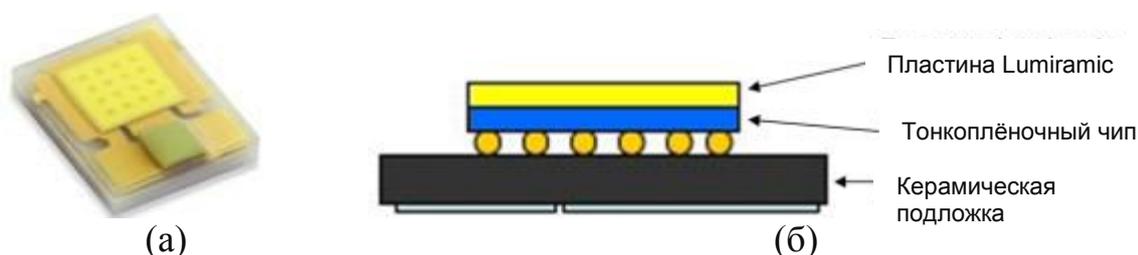


Рис. 27. Светодиод Rebel от Philips (а) и его конструкция (б) [16].

В светодиодах Rebel производства компании Philips Lumileds реализована технология «впечатывания» люминофора на поверхность чипа (рис. 27). Благодаря прецизионной точности и управляемости процесса нанесения уменьшается количество светодиодных бинов по яркости более чем на 75% при одной и той же коррелированной цветовой температуре. Это, естественно, отражается на качестве светильников, которые создаются на основе таких светодиодов, поскольку обеспечивается существенная однородность света.

1.2. Основные характеристики светодиодных чипов и светодиодов

Размер, мкм или mil. Светодиодные чипы выпускаются с разной формой продольного сечения: квадратной, прямоугольной, треугольной, шестиугольной. Характерный габаритный размер чипов квадратной формы поперечного сечения составляет от 200×200 мкм² до 5×5 мм². Толщина чипа достигает 100 мкм. Минимальный размер корпуса светодиода составляет приблизительно 2×2 мм² (корпус бывает пластиковым или керамическим), характерный размер корпуса на печатной плате с металлическим основанием (МСРСВ) — 2×3 см².

Часто единицей измерения габаритных размеров чипов служит mil. Единица измерения mil (сокращение от *mille* — тысячная доля) применяется для оценки расстояния в американской и английской

традиционных системах мер и равна 1/1000 дюйма. Эта мера используется в электронике, а также для измерения диаметра тонкой проволоки или толщины тонких листов и покрытий. 1 mil равен 25.4 мкм. В спецификациях на светодиодные чипы можно встретить запись 1023 mil, что означает, что чип имеет размеры длины и ширины 10 mil × 23 mil.

На рис. 28 представлены оптические изображения выпускаемых промышленно светодиодных чипов.

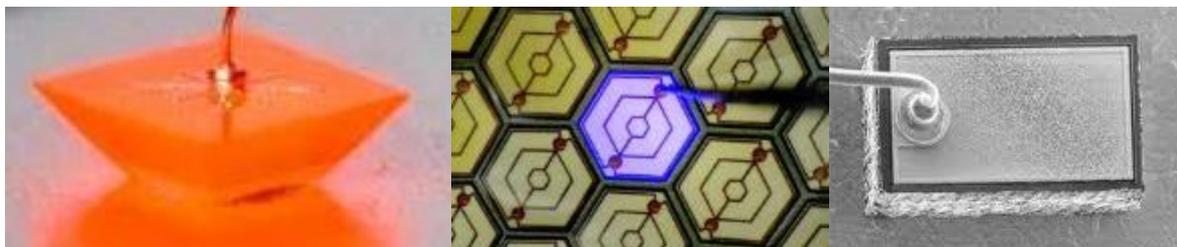


Рис. 28. Внешний вид некоторых светодиодных чипов.

Рабочий ток, А — значение постоянного тока, на который рассчитан данный светодиодный чип или светодиод.

Пиковый прямой ток, А — значение прямого тока при работе светодиода в импульсном режиме подачи тока. Указывается с длительностью импульса и коэффициентом заполнения (*duty cycle*). Обычно длительность импульса ≤ 0.1 мс, цикл $D \leq 1/10$.

Обратный ток, мкА — является током утечки и измеряется при определённом обратном напряжении, обычно при 5 В для светодиодов на основе InGaN.

Рабочее напряжение, В — падение напряжения на светодиодном чипе или светодиоде при подаче на него рабочего тока.

Потребляемая мощность, Вт. Произведение рабочего тока и рабочего напряжения.

Диапазон рабочих температур — диапазон, в котором гарантирована работа устройства с сохранением значений рабочих характеристик.

Температура хранения — температура хранения светодиодов или светодиодных чипов, при которой гарантируется сохранение заявленных в спецификации значений характеристик. Температура хранения всегда указывается с условиями влажности.

Прямая ветвь ВАХ — вольт-амперная характеристика, зависимость прямого падения напряжения от силы тока.

Обратная ветвь ВАХ — вольт-амперная характеристика, зависимость обратного падения напряжения от силы тока. Обратная ветвь ВАХ отражает качество светодиодного чипа, уровень электрических потерь.

Осевая сила света, мкд — фотометрическая величина, характеризующая интенсивность излучения источника света по её

восприятию человеческим глазом. По определению, сила света монохроматического источника с мощностью излучения 1/683 Вт на длине волны 555 нм в пределах телесного угла 1 ср (стерадиан) равна 1 кд.

Пиковая длина волны излучения, нм — длина волны, на которой наблюдается максимум интенсивности излучения.

Доминантная длина волны излучения, нм — длина волны монохроматического цвета, расположенного на периметре цветового графика на самом коротком расстоянии от цвета излучения источника света. Доминантная длина волны используется для разработки светодиодов белого цвета свечения.

Спектр излучения — распределение мощности излучения по длинам волн.

Мощность излучения, оптическая мощность или радиометрическая мощность, Вт — интегральная величина, равная суммарному потоку излучения на выходе полупроводникового излучателя:

$$P = \int_{\lambda} P_{\lambda} d\lambda \quad ,$$

где P_{λ} — спектральная плотность мощности излучения, Вт/нм (*power spectral density*), то есть распределение мощности излучения по длинам волн, λ (*wavelength*) — длина волны излучения.

Световой поток, лм (люмен) (luminous flux, lm) — количество мощности излучения, воспринимаемого человеческим глазом:

$$\Phi = 683 \int_{380}^{780} V_{\lambda} \cdot P_{\lambda} d\lambda \quad ,$$

где V_{λ} — кривая спектральной чувствительности человеческого глаза.

Для светодиодов белого света вместо мощности излучения используют понятие светового потока. Световой поток получается путём перемножения кривой спектрального распределения мощности излучения светодиодного чипа с кривой чувствительности человеческого глаза. Максимум данной кривой приходится на длину волны 555 нм зелёного света, поэтому, чем больше будет зелёного в спектре, тем больше будет количество люменов, однако, такой свет уже не будет белым. 1 Вт мощности излучения длины волны 555 нм даёт 683 лм светового потока.

Яркость поверхности источника, кд/м² (luminance, cd/m²) — отношение силы света, излучаемого источником в некотором направлении к площади поверхности, проецируемой в этом направлении. В большинстве случаев яркость определяется в направлении, перпендикулярном поверхности источника. В этом случае яркость равна отношению силы света к площади поверхности чипа.

Освещённость, лк (люкс = люмен/м²) (**illuminance, lux = lm/m²**) — отношение светового потока к единице освещаемой площади.

Световая эффективность оптического излучения, лм/Вт (**luminous efficacy of optical radiation, lm/W**) — характеристика, определяющая эффективность преобразования оптического излучения в световой поток, измеряется в люменах на 1 Ватт оптической мощности:

$$\text{Luminous efficacy} = \frac{\text{Luminous flux}}{\text{Optical power}} = \frac{\Phi}{P} = \frac{\text{световой поток}}{\text{оптическая мощность}}$$

Световая отдача источника света или световая эффективность источника света, лм/Вт (**luminous efficiency of a light source или luminous efficacy of the source, lm/W**) — характеристика, показывающая эффективность преобразования электрической мощности в световой поток, измеряется в люменах на 1 Ватт электрической мощности:

$$\text{Luminous efficiency} = \frac{\text{Luminous flux}}{\text{Electrical power}} = \frac{\Phi}{I \cdot U} = \frac{\text{световой поток}}{\text{электрическая мощность}},$$

где I — электрический ток, U — падение напряжения на светодиодном источнике света.

КПД по силе света (luminous intensity efficiency), кд/Вт — отношение светового потока, попадающего в один стерадиан на единицу входной электрической мощности. Измеряется для светильников и светодиодов.

КПД (power efficiency), % — отношение выходной оптической мощности к входной электрической мощности. Измеряется для светодиодных чипов и светодиодов.

Внутренний квантовый выход (internal quantum efficiency), % — отношение числа фотонов, излучённых в активной области, на один инжектированный электрон. Измеряется для светодиодных чипов.

Внешний квантовый выход (external quantum efficiency), % — отношение числа фотонов, излучённых светодиодом, на один инжектированный электрон. Измеряется для светодиодных чипов.

Коэффициент оптического вывода (extraction efficiency), % — вероятность выхода фотонов, излучённых в активной области, из светодиода. Измеряется для светодиодных чипов.

Координаты цветности CIE 1931 г x, y — координаты на цветовой диаграмме, описывающие цвет источников излучения [14]. Измеряются для светодиодов преимущественно белого цвета свечения.

Коррелированная цветовая температура (CCT), К — температура абсолютно чёрного тела, цвет которого максимально приближен к цвету источника белого света [22]. Измеряется для светодиодов и светильников белого света.

Кривая силы света или диаграмма направленности излучения — распределение интенсивности излучения по угла распространения (рис. 29).

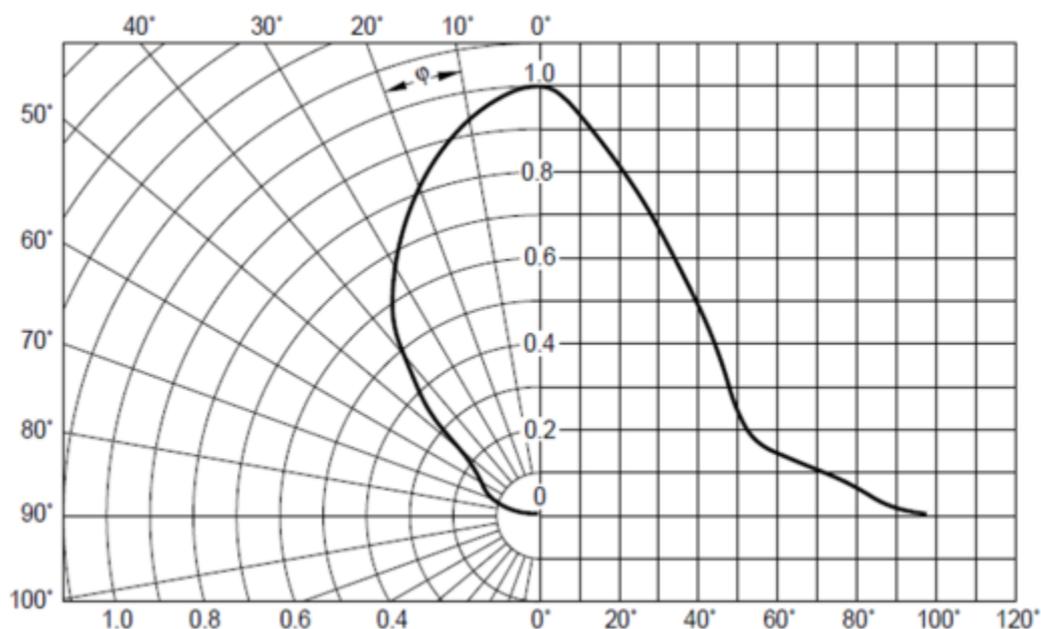


Рис. 29. Кривая силы света светодиода LR CP7P.

Двойной угол половинной яркости — угол, при котором интенсивность излучения уменьшается в два раза по сравнению с максимальным значением. Характеристика вычисляется на основании результатов измерения распределения светового потока в пространстве. Для светодиодных чипов обычно составляет 120° .

Зависимость мощности излучения от времени работы чипа/светодиода на рабочем токе — зависимость, показывающая скорость изменения свойств излучающего устройства со временем работы. Является основой для прогнозирования изменения оптических свойств устройства в будущем.

Зависимость мощности излучения от окружающей температуры при рабочем токе — характеристика, показывающая изменения оптических характеристик устройства при изменении температуры окружающей среды. Для светодиодов видимой области спектра, изготовленных на основе нитридов металлов III группы, характерно снижение мощности излучения с ростом температуры окружающей среды.

Коэффициент температурной зависимости светового потока (*hot/cold factor*) — отношение световых потоков, измеренных при температуре устройства 25°C и при выбранной, исходя из режима работы светодиодного чипа или светодиода, температуре «рабочего режима». Часто значение такой температуры выбирается равным 100°C . Этот коэффициент должен быть учтён при разработке изделий на основе светодиодов, поскольку рабочей температурой светодиодов зачастую

является температура диапазона 85–100°C. Поэтому для выбора светодиодов следует обращать внимание не только на значение светового потока при 25°C, но и на значение коэффициента температурной зависимости светового потока, позволяющего оценить значение светового потока в рабочем режиме. Этот параметр необходим также для расчёта количества светодиодов в светильнике с заданным световым потоком.

Тепловое сопротивление чип-корпуса, °C/Вт — способность материалов чипа и корпуса препятствовать распространению тепла от чипа до внешних электрических контактов корпуса.

Бин — набор диапазонов значений, которому удовлетворяют входящие в него элементы (с англ. bin — ящик, ларь). Для чипов параметрами биннинга являются рабочее напряжение, осевая сила света или оптическая мощность, пиковая или доминантная длина волны излучения. Для светодиодов белого света параметрами биннинга служат рабочее напряжение, осевая сила света и координаты цветности. При осуществлении биннинга обычно указывается максимальное (*max*) и минимальное (*min*) значения характеристик. Таким образом задаются границы диапазона. В большинстве случаев указывается среднее (*average*) или типичное (*typical*) значение характеристики.

В Таблице 4 перечислены основные бины, используемые для биннирования светодиодов. Также там представлено деление излучаемого света на холодный белый, дневной белый, нормальный белый и тёплый белый в соответствии со значением коррелированной цветовой температуры. В Таблице 5 приведены бины по прямому напряжению и силе света светодиодов, выпускаемых компанией «Оптоган».

Таблица 4. Виды белого света и цветовые координаты. Биннинг светодиодов по коррелированной цветовой температуре

Вид цвета	Холодный белый		Дневной белый		Нормальный белый		Тёплый белый	
Цветовой бин	6500 К		5000 К		4000 К		3000 К	
ССТ, К	6530±510		5028±283		3985±275		3045±175	
Код бина	65		50		40		30	
Цветовые координаты	x	y	x	y	x	y	x	y
	0.3250	0.3481	0.3551	0.3760	0.4006	0.4044	0.4562	0.4260
	0.3028	0.3304	0.3376	0.3616	0.3736	0.3874	0.4299	0.4165
	0.3068	0.3113	0.3366	0.3369	0.3670	0.3578	0.4147	0.3814
	0.3221	0.3261	0.3515	0.3487	0.3898	0.3716	0.4373	0.3893

На рис. 30 наглядно представлены перечисленные в Таблице 4 бины.

Следует отметить, что основные характеристики бинов отражены в имени продукта. На рис. 31 представлен типичный код компании «Оптоган», используемый для маркировки светодиодов.

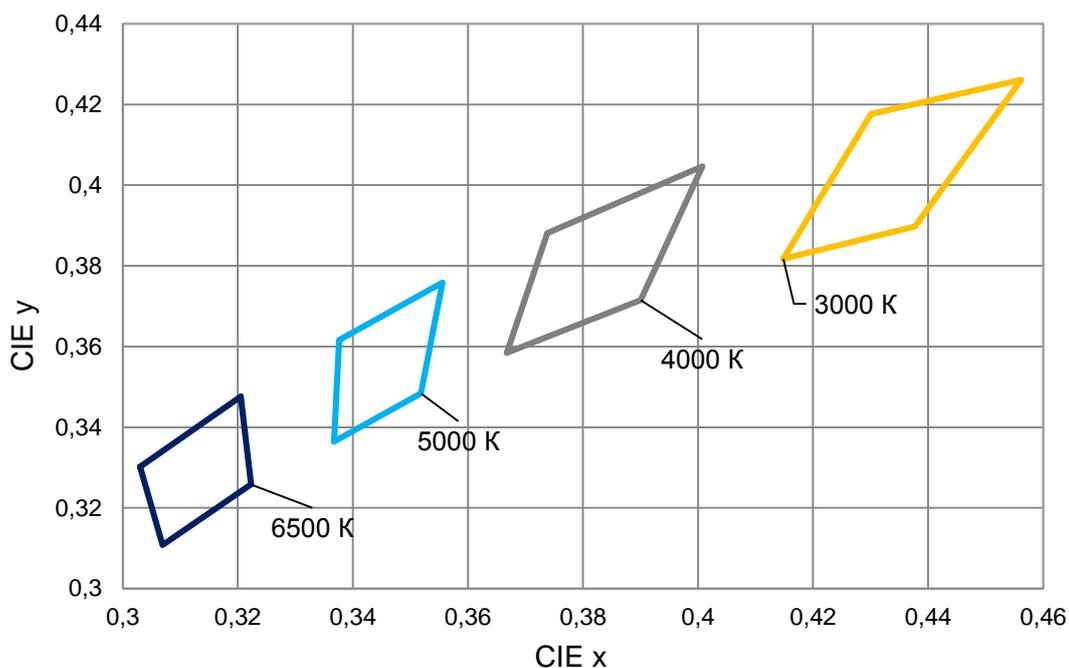


Рис. 30. Наглядное представление границ бинов светодиодов белого света различной коррелированной цветовой температуры 3000, 4000, 5000 и 6500 К.

Таблица 5. Пример разбиовки светодиодов по прямому напряжению и по силе света, принятой в компании «Оптоган»

Код бина	Прямое напряжение, В	Код бина	Сила света, мкд
0	2.9–3.5	D E F G	2150–2400 2400–2650 2650–2900 2900–3150
1	3.0–3.1		
2	3.1–3.2		
3	3.2–3.3		
4	3.3–3.4		
5	3.4–3.5		



Рис. 31. Один из вариантов маркировки светодиода: первые буквы чаще всего уникальны и обозначают компанию-производителя, последующие символы — код продукта и его характеристик.

1.3. Обеспечение теплового режима работы светодиода

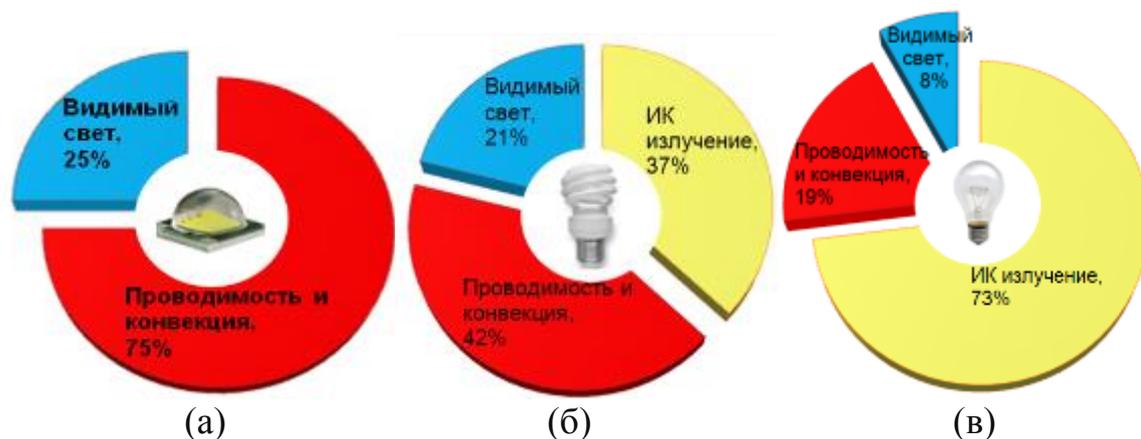


Рис. 32. Распределение потребляемой электроэнергии источниками света: светодиодом (а), флуоресцентной лампой (б), лампой накаливания (в).

Необходимость в наличии радиатора и в интенсивном отводе тепла от светодиода — одна из особенностей этого источника света: 25% потребляемой им энергии переходит в свет, а 75% приходится на тепловые потери (рис. 32 (а)). Если входная электрическая мощность источника света составляет 10 Вт, то в виде тепла рассеивается 7.5, 4.2 и 1.9 Вт соответственно в светодиодной лампе, во флуоресцентной лампе (рис. 33 (б)) и в лампе накаливания (рис. 32 (в)). Таким образом, хотя светодиодный источник обладает высокой эффективностью преобразования света, для него обязательна система охлаждения.

Самое важное в вопросе теплоотвода от светодиодного источника — это обеспечить по возможности наименьшее количество тепла в активной зоне прибора. Генерируемое в светодиоде тепло обусловлено потерями носителей за счет их утечки из активной области, поглощения рождённых фотонов слоями материала полупроводникового чипа, герметизирующего вещества и люминофора, потерями при преобразовании излучения люминофором. Снизить количество тепла можно за счет использования высококачественных и высокоэффективных светоизлучающих полупроводниковых структур и других материалов, меньших толщин слоев, а также применяя материалы с высокой теплопроводностью, однако полностью исключить генерацию тепла невозможно.

Электрические и оптические свойства полупроводников (нитридов металлов III группы), используемых при изготовлении светодиодов, сильно зависят от температуры и при её повышении начинают деградировать с увеличенной скоростью. При перегреве такие элементы выходят из строя. Избыточное воздействие тепла на светодиод вызывает сдвиг цветовых характеристик излучения, падение мощности излучения и сокращение срока службы светодиода.

Конструкции светодиодов высокой мощности (так называемых одно-ваттных светодиодов и светодиодов с большей мощностью),

предусматривают наличие радиатора — металлического основания, на котором размещаются полупроводниковые чипы. В это основание созданное тепло отводится путём теплопереноса от чипа через слои печатной платы, далее попадает на радиатор и рассеивается с него путём конвекции в окружающий воздух (рис. 33). В системах «чип на плате» используются корпуса из теплопроводящей керамики или корпуса печатных плат на металлическом основании (МСРСВ), которые крепятся непосредственно на радиатор.

Светодиоды низкой мощности (~ 100 мВт), в основном рассчитанные на потребление 20 мА, не требуют наличия в непосредственном контакте радиатора, поскольку скорость отвода тепла через металлические токоведущие соединения является приемлемой.

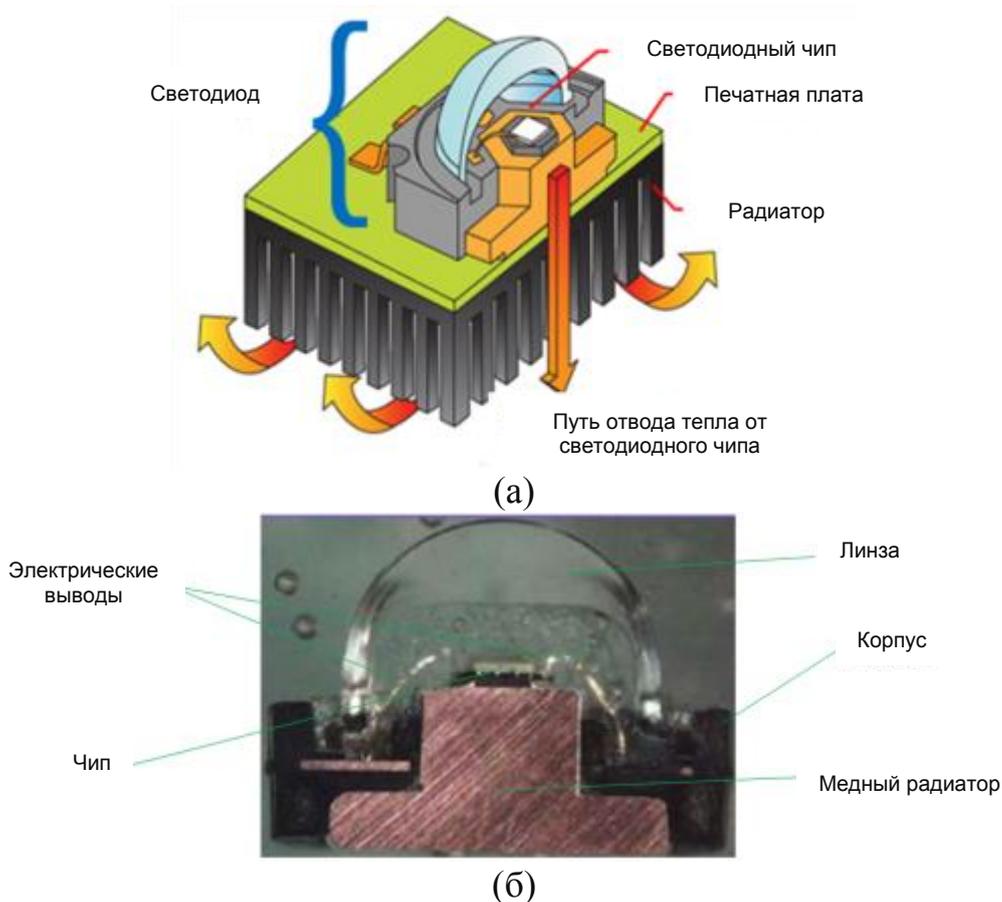


Рис. 33. Основной путь удаления тепла от светодиодного чипа в светодиоде (а) и внешний вид мощного светодиода в разрезе: чип светодиода размещён на встроенном медном радиаторе.

Нарушение в паяных соединениях, при помощи которых светодиоды монтируются на печатную плату, или сдвиг светодиодов относительно посадочных мест могут помешать отводу тепла по созданным для него путям и ухудшить качество светодиодного изделия в целом.

Желательно, чтобы источник питания для светодиодов находился от них на некотором удалении и не влиял дополнительно генерируемым в нем теплом на их характеристики.

В Таблице 6 приведены данные о теплопроводности и коэффициенте термического расширения (КТР) основных материалов, применяемых в конструкциях светодиодов.

Таблица 6. Теплопроводность и коэффициент термического расширения основных материалов для изготовления светодиодов

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	КТР, 10^{-6} K^{-1}
Si	150	2.3
GaAs	54	5.3
GaN	130	6.1
Al ₂ O ₃	20	3.9
AlN	170–230	3.3 (4.6)
Al	150–230	2.7
Cu	380	8.9
AlSiC	200	3
SiC	115	2.8–4.1
Ag	430	10.9

1.4. Основные виды и конструктивные исполнения мощных светодиодов. Светодиодная сборка «чип на плате»

1.4.1. Основные конструктивные исполнения мощных светодиодов

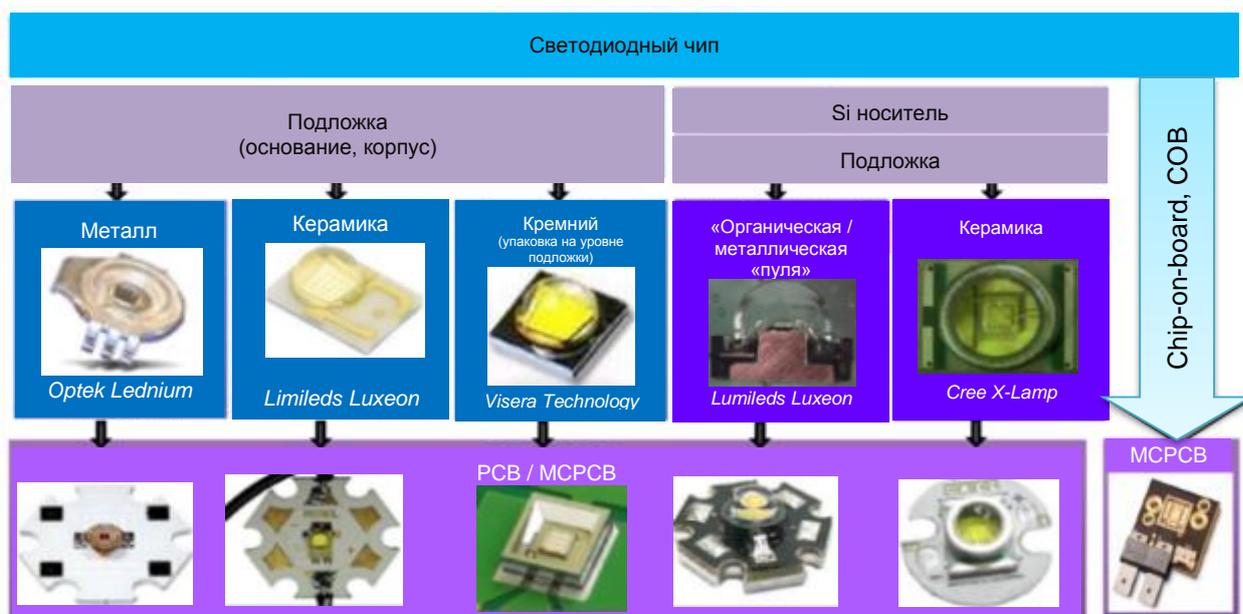


Рис. 34. Возможные варианты конструкций мощных светодиодов [10].

Современные светодиоды, в том числе применяемые для освещения и подсветки, являются *светодиодами высокой яркости (high bright LED, HB LED)*, сила света от них превышает 3000 мкд. Некоторые из них относятся к *светодиодам высокой мощности (high power LED, HP LED)*; это означает, что их электрическая мощность превышает 1 Вт.

Светодиоды высокой мощности имеют конструктивные отличия от маломощных светодиодов. В частности, светодиодный чип монтируется (рис. 34) либо прямо на подложку из металла, керамики или кремния (в случае кремния это происходит на стадии получения единичных кристаллов), либо предварительно устанавливается на кремниевую подложку (например, так делают flip-чипы). Конструкция мощных светодиодов типа «чип на плате» (*chip on board*) представляет собой набор чипов, установленных на подложку (часто — на печатную плату с металлическим основанием) из металла с прослойками диэлектрика или из керамики AlN или Al₂O₃.

Керамические подложки из Al₂O₃ и AlN делают из низкотемпературной и высокотемпературной керамики. Положительные аспекты использования керамических подложек сводятся к следующему:

- ✓ керамические подложки являются изоляторами;
- ✓ у них высокая теплопроводность, особенно у AlN;
- ✓ по коэффициенту термического расширения они близки к кремниевым и сапфировым подложкам;
- ✓ они подходят для высокоомощных светодиодов и используются при высоких температурах.

К недостаткам керамических подложек можно отнести то, что:

- ✓ форма корпуса должна выбираться с учётом процесса изготовления керамики, и при этом возникает необходимость в дополнительной оптике;
- ✓ стоимость изготовления керамических подложек относительно высока: подложка из AlN в 3 раза дороже подложки из Al₂O₃.

Одним из вариантов корпуса светодиода является керамический DBC-корпус, представляющий собой основание из керамики Al₂O₃ или AlN, на котором методом прямого диффузионного срачивания закреплены тонкие слои меди. В англоязычной литературе эти корпуса называются *direct bonded copper board*, сокращенно — DBC. Часто нижняя поверхность корпуса полностью покрыта медью, в то время как на верхней поверхности из меди сделана электрическая разводка, обеспечивающая электрическое соединение силовых ключей, силовых и управляющих выводов. DBC-керамический светодиод припаивается на металлический радиатор, который в процессе работы служит теплоотводом для полупроводниковых элементов.

Другим вариантом керамического корпуса светодиода является подложка на основе нанопористого слоя Al₂O₃, изготовленного методом

анодирования на алюминиевой пластине толщиной 0.1–0.3 мм (рис. 35). Локальные участки этой пластины окисляются и превращаются в пористый оксид алюминия, поры в котором заполняются диэлектрическим материалом. На поверхности из медного слоя создаётся рельеф для монтажа. В итоге получается изделие с теплопроводностью керамики, но за счет отсутствия операции формирования отверстий его стоимость получается значительно ниже.

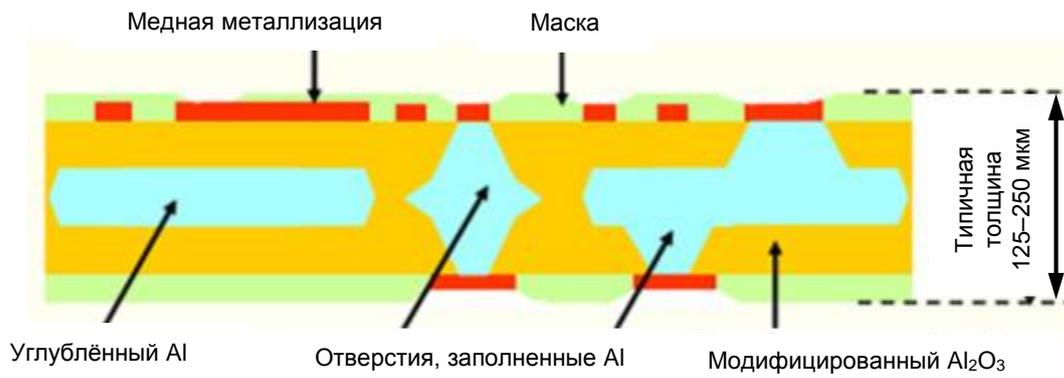


Рис. 35. Керамическая подложка ALOX, полученная анодированием алюминия.

Лучшие светодиоды в керамических корпусах обладают тепловым сопротивлением 8–15 К/Вт. На рис. 36 приведён способ разделения существующих видов конструкций мощных светодиодов и их внешний вид.

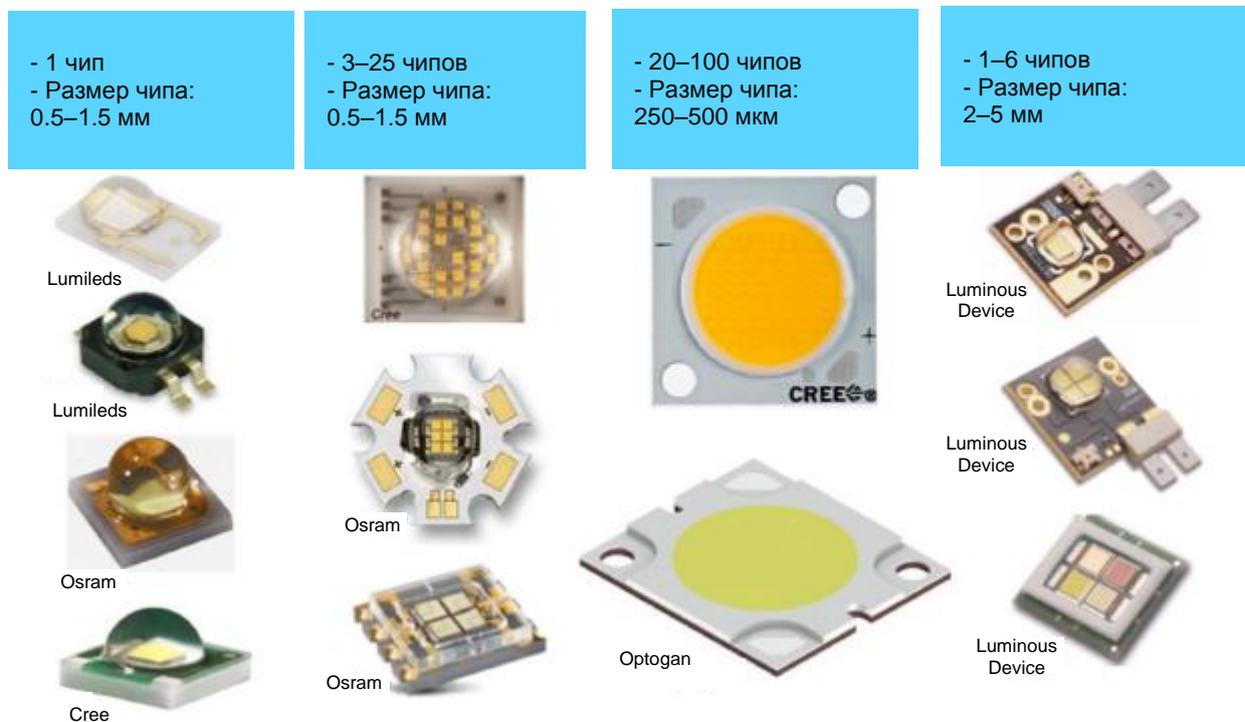
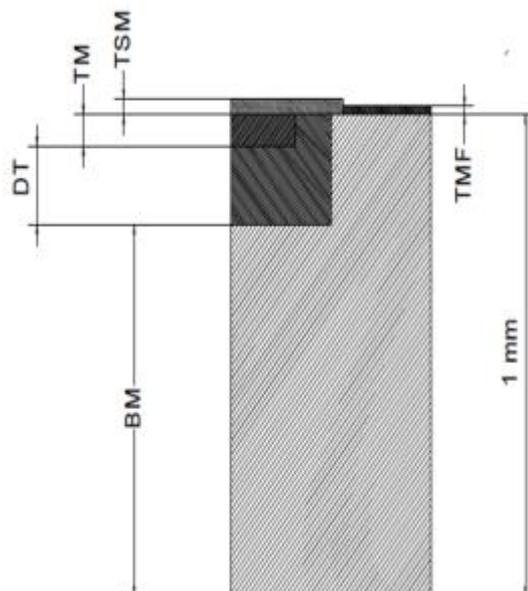


Рис. 36. Примеры высокомощных светодиодов [10].

1.4.2. Светодиодная сборка «чип на плате»

Доля светодиодов, изготовленных по технологии «чип на плате» (*chip-on-board, COB*), составляет около 8% от рынка светодиодов в целом. Ожидается, что в ближайшем будущем доля этого продукта на рынке достигнет примерно 20%. Рынок светодиодов COB сейчас находится в стадии развития и имеет высокий потенциал к росту, поскольку одной из основных областей применения таких светодиодов являются светодиодные лампы, заменяющие традиционные лампы накаливания. Государственные программы, нацеленные на запрет ламп накаливания и на урбанизацию, приведут к увеличению спроса на светодиодные лампы, и, как следствие, на мощные светодиоды, выполненные по технологии COB. Стоимость светодиодов COB пока высока, но по мере получения компаниями-производителями достаточного опыта в области их технологии, а также за счет перехода к серийному производству, их стоимость снизится.

В основном светодиоды COB используются в сфере освещения из-за высокой плотности потока излучения с единицы поверхности и хорошей смешиваемости цветов. Рынок этих светодиодов состоит из четырёх основных сегментов: освещение, подсветка, автомобильная промышленность и другие сферы применения, которые включают в себя медицинское оборудование и проекторы.



TSM — верхняя маска на металл, материал — WN68 (белый), толщина слоя 15–45 мкм;
TMF — финишное покрытие контактных площадок, материал — серебро и никель, 5 мкм;
TM — верхний слой металла, медь, 45–65 мкм;
DT — диэлектрик, свободный от галогенов, 165–185 мкм;
BM — нижний слой металла, медь, 700–780 мкм.

Рис. 37. Структура слоев печатной платы с металлическим основанием (*metal core printed circuit board*). Печатная плата используется в качестве корпуса светодиода, выполненного по технологии COB.

Светодиоды COB имеют следующие преимущества перед традиционными светодиодами:

- увеличенную мощность светового потока с единицы площади;
- высокое качество смешивания цвета;

- уменьшенный расход материалов;
- повышенную производительность процессов и оборудования;
- удобство в монтаже и креплении к электропитающим разъёмам.

На рис. 37 представлена структура МСРСВ корпуса мощной светодиодной сборки. Структура включает несколько слоев металла и диэлектрика.

Одна из проблем в разработке устройств СОВ — создание такого устройства, эффективность которого сравнима, а ещё лучше — превышает современный уровень эффективности дискретных светодиодов при использовании одних и тех же основных материалов (чипов, люминофора, заливочного компаунда).

Технология СОВ позволяет создавать мощнейшие единичные светодиодные источники света, которые представляют собой массив светодиодных чипов, установленных на единую плату и покрытых общим слоем защитного полимера. При этом использование платы, основания, или как её ещё называют, подложки, выполненной из сплава на основе меди, МСРСВ или керамических материалов с высокой теплопроводностью, позволяет получать рекордно низкое тепловое сопротивление, от 2 до 0.5 К/Вт, и обеспечивать эффективный теплоотвод, что является критическим моментом эксплуатации устройств, полученных по этой технологии. Мощность устройств СОВ составляет от 1 до 500 Вт.

Современным уровнем разработок системы СОВ является получение в едином изделии на единой подложке платы, источника света, источника питания и управляющей электроники. Одно из направлений деятельности компании «Оптоган. Новые технологии света» — это прорывной переход от отдельного светодиода к интегрированной осветительной системе (*high integrated chip on board*) [23]. Интеграция разрабатываемой системы обеспечивается внедрением новейших материалов, обладающих повышенными значениями тепловых, электрических и оптических рабочих параметров. Развиваемые научные подходы нацелены на достижение в осветительных системах нового поколения существенного роста яркости, цветопередачи и энергоэффективности при уменьшении размеров и затрат на изготовление таких систем.

Недавно компания «Оптоган. Новые технологии света» выпустила уникальный мощный светодиодный модуль СОВ Optogan X10 на керамической подложке, разметка которой позволяет разделять его на меньшие элементы, каждый из которых также является мощной светодиодной сборкой (рис. 38).

Электрические контакты каждого суб-модуля открываются в нужных местах промышленным способом, например, путём испарения материала с помощью лазера, или простым механическим путём. Различные размеры и формы элементов позволяют использовать их в лампах, заменяющих

галогеновые лампы, в светильниках, содержащих рефлектор, а также в производственных и фасадных светильниках.

Один сегмент модуля Optogan X10 потребляет 6.5 Вт ($700 \text{ мА} \times 9.3 \text{ В}$) и имеет эффективность выше 110 лм/вт. В режиме постоянного тока нагрузка на сегмент может быть увеличена до 10 Вт ($1.03 \text{ А} \times 9.7 \text{ В}$). При обеспечении необходимой степени охлаждения можно использовать весь блок Optogan X10 как единый световой модуль с потребляемой мощностью 325 Вт. Нагрузка при желании может быть увеличена до 500 Вт. На рис. 39 представлен внешний вид единичных элементов Optogan X10 и их характеристики. Как видите, элемент можно разделять как по последовательной схеме, в этом случае напряжение на итоговом устройстве будет расти, так и по параллельной схеме.

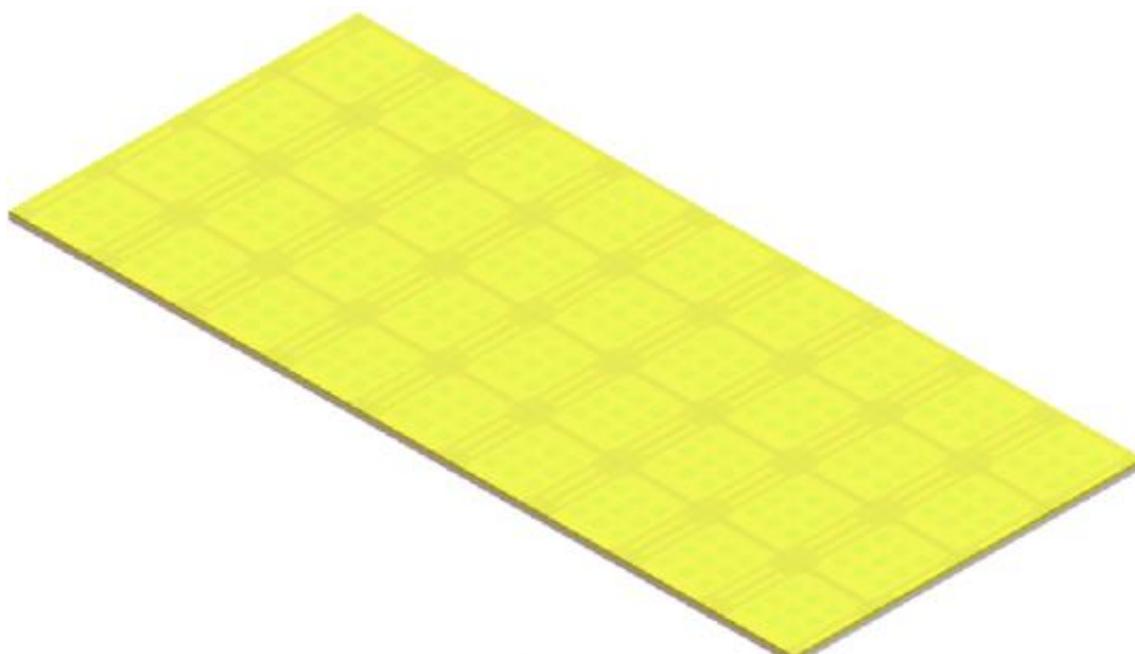


Рис. 38. Светодиодный модуль Optogan X10, выполненный по технологии COB, при желании может быть легко разделен на модули с различными размерами без применения каких-либо инструментов [3].

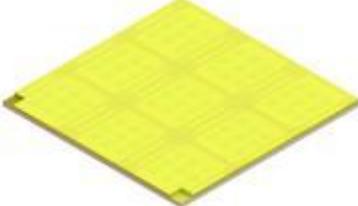
				
X10	2 X10	2 X10	4 X10	9 X10
6.5 Вт	13 Вт	13 Вт	26 Вт	58.5 Вт
10×10 мм	20×10 мм	20×10 мм	20×20 мм	30×30 мм
9.3 В	9.3 В	18.6 В	18.6 В	27.9 В
0.7 А	1.4 А	0.7 А	1.4 А	2.1 А

Рис. 39. Характеристики отдельных сегментов модуля Optogan X10 [3].

Основные особенности и характеристики мощной светодиодной сборки COB Optogan X10:

- универсальность производства и применения;
- лёгкость масштабирования;
- высокая светоотдача (110 лм/Вт);
- высокая концентрация светового потока (до 1100 лм/см²);
- низкая стоимость света (20 \$/кЛМ);
- низкое тепловое сопротивление (материал подложки — алюмооксидная керамика с теплопроводностью ~30 Вт/м·К);
- высокая однородность световых и цветовых характеристик по пластине;
- высокая стабильность световых и цветовых характеристик (отсутствие деградирующих материалов, в частности, пластика);
- возможность интегрирования части элементов драйвера.

Хотя практическая реализация совмещения светодиодного источника света и схемы управления в коммерческом масштабе на данный момент отсутствует, но работы над ней активно ведутся.

В смежной технологии лазерных устройств компания OPEL Defence Integrated System (ODIS) при разработке лазера VCSEL по технологии РОЕТ (*planar optoelectronic technology*) впервые продемонстрировала работу интегрированного устройства, объединяющего электронные и оптические элементы в едином чипе (рис. 40). В результате совмещения компонентов уменьшилась стоимость, и одновременно повысились скорость обработки, плотность размещения и надёжность компонентов. Были представлены также другие оптоэлектронные устройства, включая HFET, оптические тиристоры, осцилляторы и сверхъяркие устройства — все они были монолитно изготовлены в рамках процесса РОЕТ. РОЕТ может изменить существующее состояние широкого спектра приложений, таких как планшетные компьютеры и смартфоны.

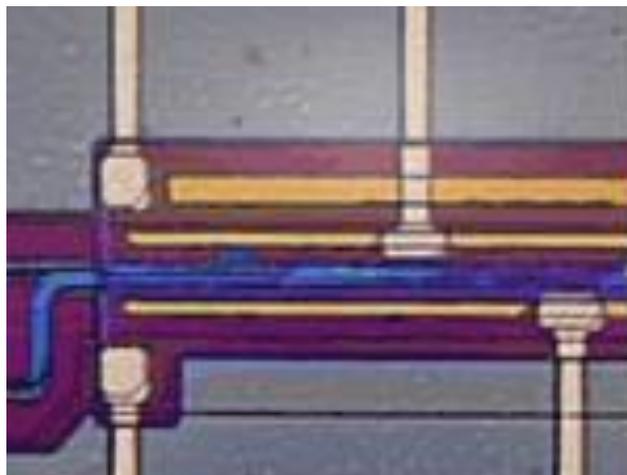


Рис. 40. Технология планарной оптоэлектроники способна преодолеть ограничения медных соединений в чипах на основе Si [13].

1.5. Органические светодиоды

Органические светодиоды (*organic light emitting diode*, OLED) — это светодиоды, в которых излучение света генерируется в специальных органических полимерах. Структура таких светодиодов чаще всего представляет собой две пластины из стекла, прозрачного пластика или фольги, между которыми расположены тонкие слои органических молекул (рис. 41). Одним из проводящих полимеров, используемых в технологии OLED, является полианилин. В качестве материала слоя, испускающего свет, выбирают полифлуорен. Слой катода может быть прозрачным или нет в зависимости от цели создания световой панели. На сегодняшний день излучение от полимерных светоизлучающих молекул перекрывает видимый диапазон спектра.

Преимуществом данной технологии перед традиционными светодиодными технологиями является возможность изготовления светоизлучающих панелей большой площади при меньшем числе технологических процессов, отсутствие требований к наличию корпуса, что существенно снижает стоимость конечного светильника, возможность изготовления гибких светодиодных панелей, а также прозрачных панелей при отсутствии излучения [24].

Изготовление органических светодиодов осуществляют при помощи вакуумного осаждения, вакуумно-термического испарения, струйной печати.

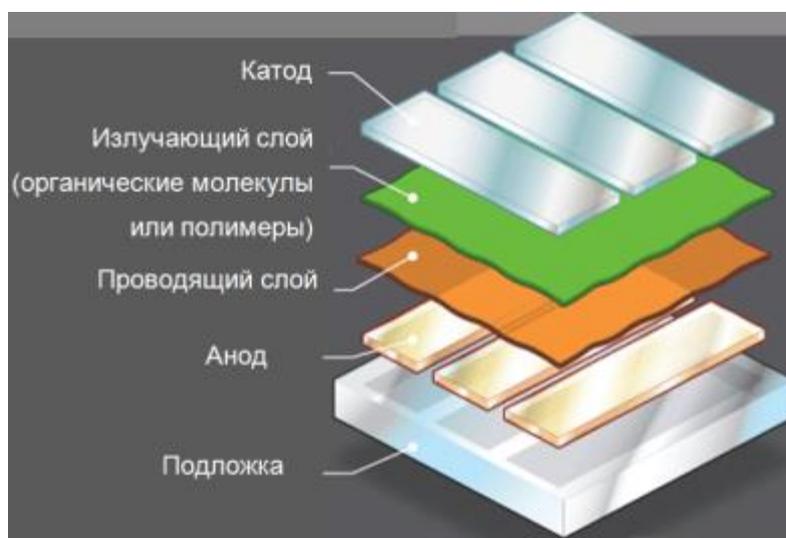


Рис. 41. Структура органического светодиода.

1.5.1. Технология органических светодиодов

При изготовлении органических светодиодов используются следующие способы осаждения органических молекул:

- ❖ осаждение органического вещества из паровой фазы (*organic vapor phase deposition*, OVPD): при низком давлении в камере нагретое

органическое вещество переносится газом-носителем к охлаждённой подложке и осаждается на ней в виде тонкой плёнки;

- ❖ вакуумное осаждение или вакуумное термическое испарение (*vacuum deposition or vacuum thermal evaporation, VTE*): нагретые в вакуумной камере органические молекулы переносятся к холодной подложке и осаждаются на ней в виде тонкой плёнки. Процесс дорогостоящий и неэффективный;
- ❖ струйная печать (*inkjet printing*): молекулы «разбрызгиваются» по поверхности подложки. Процесс значительно уменьшает стоимость изготовления и позволяет создавать органические панели большой площади, например, для 80-дюймовых ТВ экранов или электронных табло. Технология представляет огромный интерес и активно развивается.

Одним из направлений в технологии получения органических светодиодов является применение активных слоев на основе композитов полимер – неорганические полупроводниковые наночастицы. Композитный активный слой OLED сочетает в себе технологичность полимерной 3D матрицы с уникальными оптическими и электрическими свойствами квантовых точек, позволяя управлять цветом излучения.

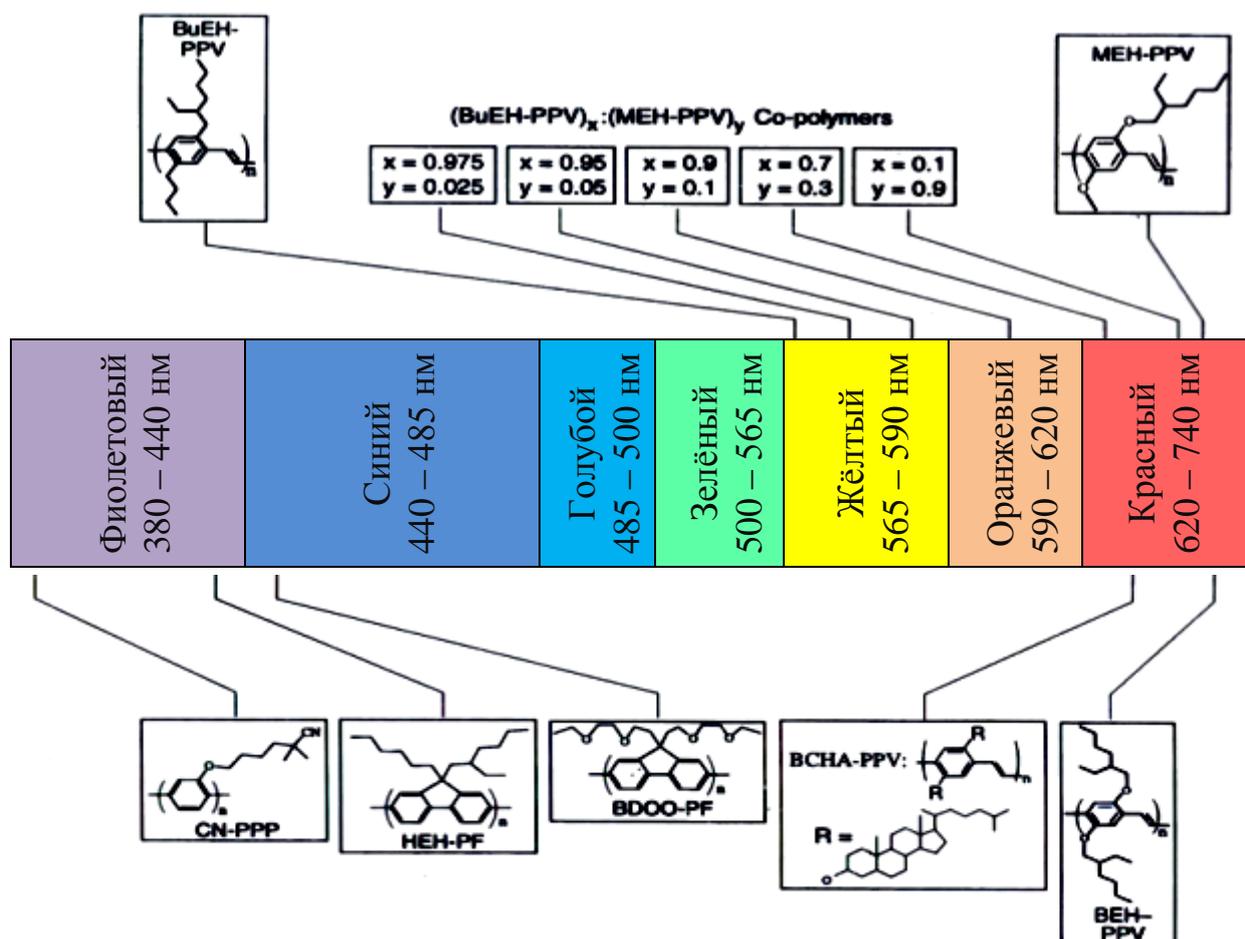


Рис. 42. Полимерные молекулы, используемые в органических светоизлучающих диодах.

На рис. 42 представлены пространственные структуры органических молекул, используемых для получения всевозможных цветов излучения спектра.

1.5.2. Характеристики органических светодиодов

Основными характеристиками органических светодиодов являются:

- ✓ Рабочий ток, А
- ✓ Падение напряжения, В
- ✓ Электрическая мощность, мощность потребления, Вт
- ✓ Яркость, кд/м²
- ✓ Световая эффективность, лм/Вт
- ✓ Координаты цветности, x, y
- ✓ Коррелированная цветовая температура, К
- ✓ Индекс цветопередачи
- ✓ Однородность яркости, %
- ✓ Угол половинной яркости, градусы

1.5.3. Спектр излучения органических светодиодов

Спектр излучения OLED зависит от используемых молекул. На рис. 43 и 44 представлены спектры излучения двух разных органических светодиодов с коррелированной цветовой температурой 3000 К.

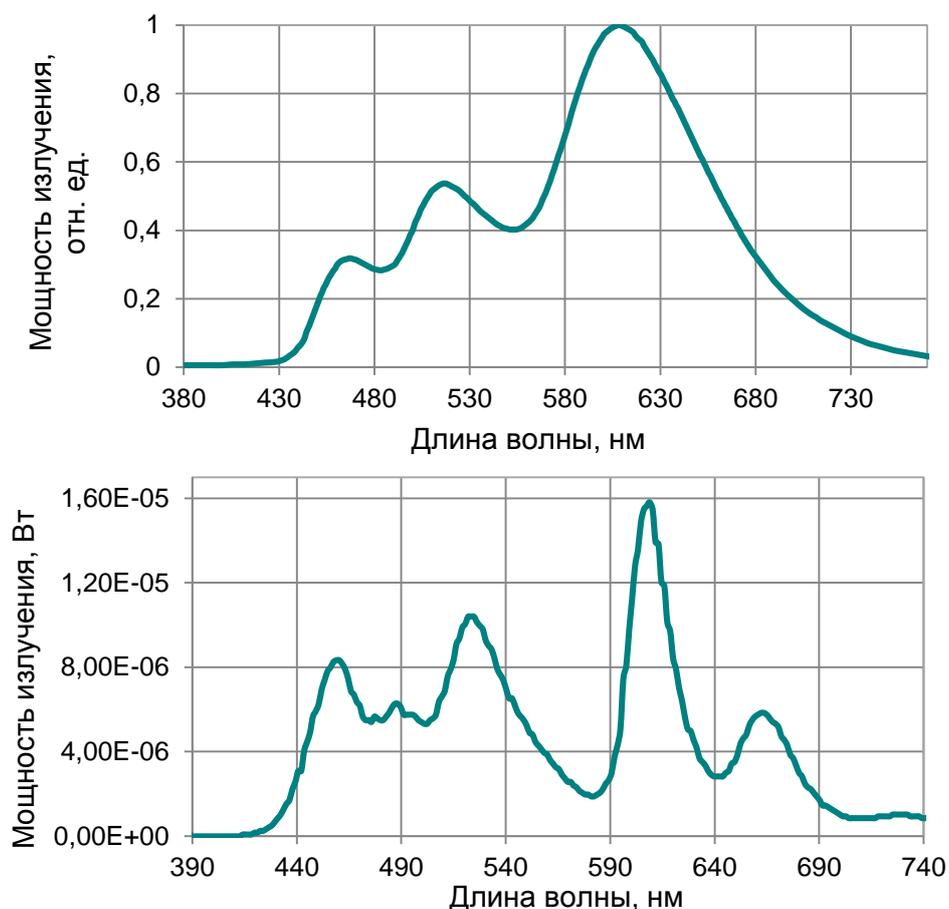


Рис. 43. Виды спектров излучения органических светодиодов при CCT = 3000 К.

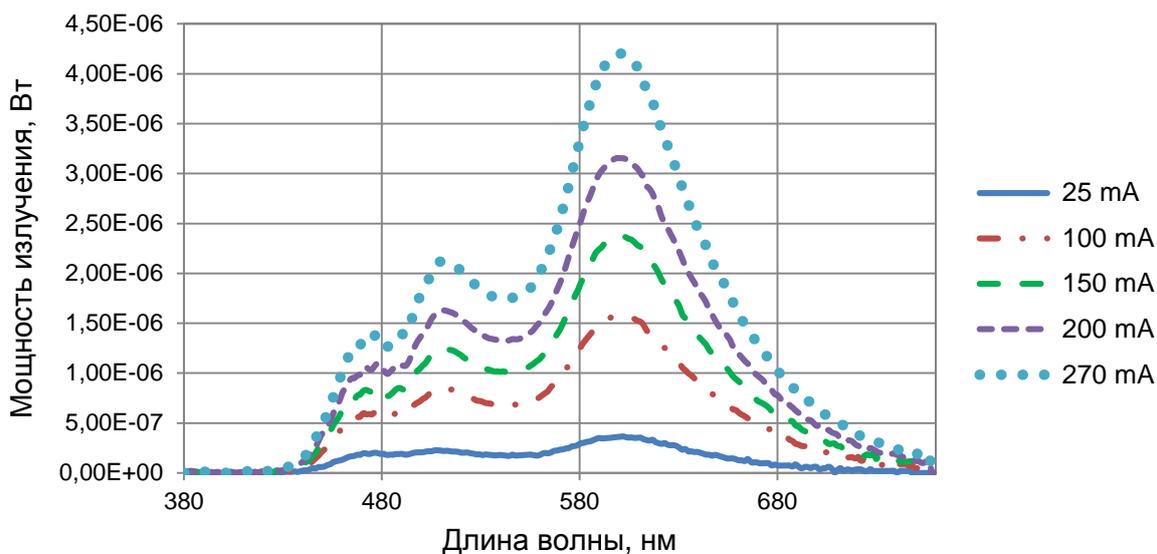


Рис. 44. Спектр излучения OLED при разном токе.

1.5.4. Применение органических светодиодов

Продукция OLED-технологии применяется в мобильных телефонах, КПК, цифровых камерах, подсветке. Изготовление устройств освещения из OLED станет возможным только после того, как возрастет эффективность этих источников. В 2012 г. она достигла уровня 60 лм/Вт.

Немного истории: в 2004 г. компания Sony начала массовый выпуск OLED-экранов для карманного персонального компьютера (рис. 45 (а)). Первой компанией, выпустившей цифровую камеру на базе дисплея OLED, была компания Kodak в 2003 г. с продуктом EasyShare LS633 (рис. 45 (б)). В Таблице 7 приведены значения коммерчески доступной органической панели производства компании Osram.



Рис. 45. OLED дисплей для Sony Clie (а) и цифровая камера Kodak EasyShare LS633 (б).

Таблица 7. Характеристики коммерчески доступного органического светодиода производства компании Osram [25]

Характеристика	Вид значения	Значение
Рабочее напряжение, В	минимальное	3.37
	типичное	3.62
	максимальное	3.87
Электрическая мощность, Вт	минимальное	0.91
	типичное	0.97
	максимальное	1.04
Яркость, кд/м ²	при 270 мА	910
	при 135 мА	455
	при 67.5 мА	278
Эффективность, лм/Вт	типичное	14
Координаты цветности	x	0.458
	y	0.427
ССТ, К	минимальное	2580
	типичное	2800
	максимальное	3320
CRI	типичное	86
Однородность яркости, %	минимальное	75
	типичное	81
	максимальное	100
Угол половинной яркости, градус	типичное	120

По прогнозам, ожидается применение OLED в составе следующей продукции: информационных дисплеев большой площади, домашнего и офисного освещения, гибких панелей. OLED могут заменить существующие LSD панели за счет более чем в 1000 раз более высокой скорости обновления информации. Особенности устройств OLED позволят создавать из них газеты с обновляющейся информацией.

По мере улучшения свойств органических светодиодов, в частности, при повышении светового потока и эффективности, OLED станут заменять традиционные источники общего освещения, излучая свет из окон, потолка и стен. OLED-светильники открывают дизайнерам огромный простор для творчества в части своего устройства и внешнего вида.

В настоящее время японские производители потребительской электроники Sony и Panasonic ведут переговоры о совместной разработке телевизоров нового поколения на базе технологий OLED. Между тем, их южнокорейские конкуренты Samsung Electronics и LG Electronics уже активно внедряют OLED и планируют наладить коммерческое производство экранов на органических светодиодах уже к концу 2012 г.

На рис. 46 представлено одно из дизайнерских решений по созданию светильника из органических светодиодов.



Рис. 46. OLED светильник O'Leaf производства компании Royal Philips Electronics.

В Таблицах 8 и 9 приведены достигнутые значения эффективности органических панелей и прогноз их улучшения к 2020 г.

Таблица 8. Эффективность органических светодиодных панелей

Характеристика	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Электрическая эффективность, %	55–60	80
Внутренний квантовый выход, %	85	95
Эффективность вывода излучения, %	45	75
Спектральная эффективность, %	86	95

Указанные в Таблице 9 параметры приведены для устройства на базе органического светодиода с индексом цветопередачи больше 85, коррелированной цветовой температурой в диапазоне 2580–3710 К при площади панели OLED больше 200 см². Ожидаемая к 2015 г. эффективность органических панелей останется низкой по сравнению с ожидаемой эффективностью для светодиодов на основе GaN, уже сейчас равной 165 лм/Вт. Таким образом, чтобы такие OLED-устройства заняли достойное место на рынке устройств освещения, должны быть достигнуты серьезные успехи в их технологии.

Отметим, что с 2009 по 2010 г. электрическая эффективность органических светодиодов возросла с 55 до 60%.

Таблица 9. Основные показатели развития устройств на органических светодиодах

Год	Основные показатели и их значения
2008	Световая эффективность > 25 лм/Вт, стоимость < 100 \$/кЛМ, срок службы 5000 ч (для одного пикселя)
2010	> 60 лм/Вт (для панели)
2012	< 45 \$/кЛМ (для панели)
2015	>110 лм/Вт (для панели) при 10 000 лм/м ²
2018	50 000 ч; 10 000 лм/м ²

Перечислим организации и компании, принимавшие участие в составлении прогноза развития OLED-устройств и светильников: GE Lumination, University of Southern California, Universal Display Corporation, Acuity Brands Lighting, Inc., University of Minnesota, Sandia National Laboratories, Vartek Associates, LLC, Lawrence Berkeley National Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratories, National Science Foundation, GE Global Research, Arkema, Inc., Eastman Kodak Company. Разработкой OLED занимаются компании Fraunhofer, OSRAM и «Оптоган. Органические световые решения».

РАЗДЕЛ 2. Активно развивающиеся полупроводниковые устройства

Содержание

- 2.1. Ключевые технологии и области исследований, необходимые для производства светодиодов.
- 2.2. Светодиодные устройства на основе нитрида галлия.
- 2.3. Светодиодные устройства на основе карбида кремния и кремния.
- 2.4. Традиционный процесс производства светодиодов.
- 2.5. Обеспечение теплового режима работы светодиода.

2.1. Ключевые технологии и области исследований, задействованные в производстве светодиодов

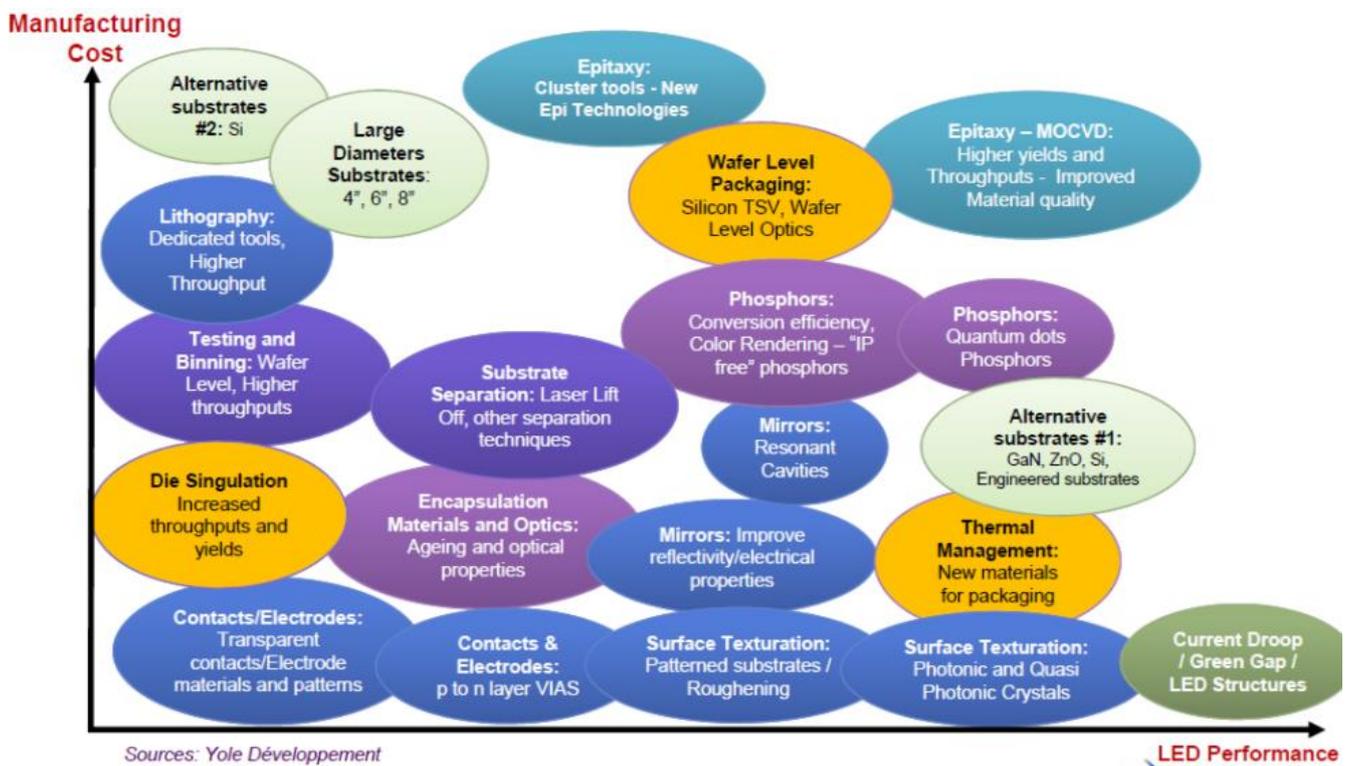


Рис. 47. Ключевые технологии светодиодов.

На рис. 47 показаны двадцать ключевых технологий создания светодиодов. На диаграмме они распределены по стоимости производства, то есть по затратам на их воплощение в жизнь, и по степени влияния на характеристики светодиодных устройств. Среди них: литография (lithography), оборудование которой сказывается на производительности процесса изготовления светодиодного чипа; использование подложек большего диаметра (large diameter substrates) — 4, 6 и 8 дюймов —

позволяет увеличить число изготавливаемых в едином цикле устройств, а значит, повысить производительность установки, обеспечивая ускоренную окупаемость оборудования и снижая издержки производства; текстурирование (*surface texturation*), то есть создание определенного рисунка, специального рельефа на поверхности ростовой подложки (подложки, на которой происходит рост) — текстурирование поверхности светодиодного чипа, создание фотонных кристаллов позволяют значительно увеличить вывод излучения из чипа, повысив мощность излучения и его эффективность, а значит, при конструировании светодиода снизить количество чипов для получения устройства заданной мощности и количество используемых материалов, что, в конечном итоге, позволяет понизить стоимость изделия; создание оптических зеркал (*mirror*) для формирования резонаторов, которые позволяют усилить генерацию излучения и увеличить вывод света из чипа; обеспечение теплового режима (*thermal management*) работы светодиода, от которого в сильной степени зависит сохранение оптических и электрических характеристик устройства в течение длительного периода эксплуатации. Все перечисленные на рис. 47 технологии играют важную роль в создании надежного, высокоэффективного и дешевого светодиодного устройства.

2.2. Светодиодные устройства на основе нитрида галлия

Изготовление светодиодов белого цвета свечения стало возможным после успехов в получении качественных эпитаксиальных светодиодных структур на основе нитрида галлия **GaN** [26]. Рост гетероструктур светодиодов осуществляется преимущественно методом осаждения из металлоорганических соединений в газовой фазе [27], *metal organic chemical vapour deposition*, **MOCVD**, где в качестве прекурсоров используются триметиллы галлия $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$, **TMGa**, индия $\text{In}(\text{CH}_3)_3$, **TMIIn**, алюминия $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$, **TMAI**, моносилан SiH_4 и бис(циклопентадиенил)магний $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Mg}$, **Cr₂Mg**, в качестве источников примесей для получения структур *p*- и *n*- типа проводимости.

На рис. 48 приведено распределение установленных в мире реакторов MOCVD за период 2009–2011 г.

В настоящее время в большинстве случаев используемой подложкой для роста светодиодных структур является подложка из сапфира. На рис. 49 представлена наиболее часто используемая подложка размером два дюйма в диаметре, а также выращенная 10-ти дюймовая подложка, использование которой позволит существенно увеличить производительность.

Отметим, однако, что использование сапфировой подложки не позволяет достичь максимально возможной эффективности приборов, поскольку сапфир обладает отличными от GaN постоянной решётки, коэффициентом термического расширения, что приводит к возникновению

в гетероструктуре механических напряжений и пьезоэлектрических полей. Как следствие, уменьшается эффективность излучательной рекомбинации [28].

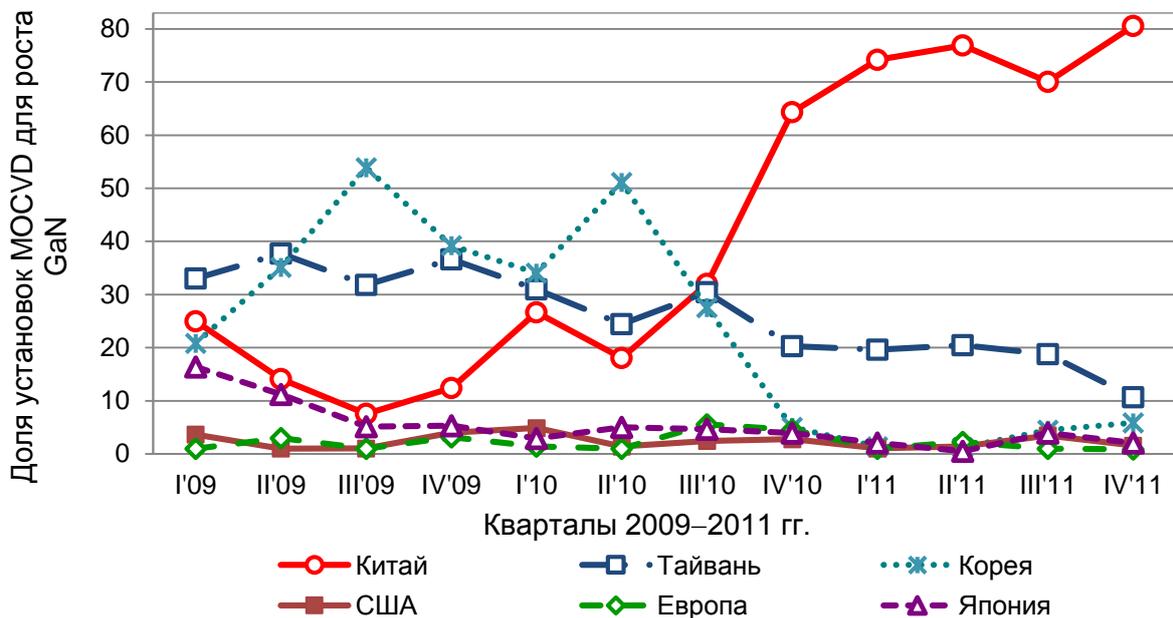


Рис. 48. Распределение установленных в мире реакторов MOCVD по данным IMS Research.



Рис. 49. Двухдюймовая и десяти дюймовая подложка сапфира (LEDs Magazine, February 2011).

Представляется, что получение максимально возможных, рекордных значений характеристик светодиодных устройств станет возможным при использовании в качестве подложки, на которой осуществляется рост светоизлучающей структуры, подложки из GaN [29], согласованной со слоями структуры по постоянной решётки и коэффициенту термического расширения. В настоящее время в мире активно ведутся научные работы по получению подложек GaN высокого кристаллического совершенства. Получение подложки объёмного GaN представляется непростой задачей,

поэтому во многих исследовательских группах ведутся работы по получению так называемых темплэйтов GaN на сапфире [30], темплэйтов GaN на SiC [31]. Такие структуры получаются путём наращивания GaN на гетероподложку с последующим отделением слоя. В ряде случаев такое решение оказывается оправданным. Для роста толстых слоёв GaN применяется хлорид-гидридная эпитаксия, ХГЭ, hydride vapour phase epitaxy, HVPE [32]. Для светодиодов, излучающих в ультрафиолетовом диапазоне 240–360 нм, перспективной подложкой для роста оказывается нитрид алюминия AlN. Производство таких подложек осуществляется аммонотермальным методом [33] и методом ХГЭ [34]. На рис. 50 представлена подложка диаметром 2", изготовленная компанией Crystal-N.



Рис. 50. 2" подложка AlN от Crystal-N (*Compound Semiconductor*, June 2013).

Подробнее с характеристиками светодиодов, созданных на основе подложек сапфира, GaN, карбида кремния SiC и кремния Si будет рассказано в Разделе 2. В настоящем разделе кратко рассмотрены мировые тенденции в сфере светодиодных технологий [13, 16].

Рынок полупроводниковых светодиодных чипов уже составляет миллиарды долларов. Первым применением светодиодов стала подсветка мобильных телефонов и экранов. За последние несколько лет широкое внедрение светодиоды в подсветке экранов больших размеров, ноутбуков и телевизоров. На данный момент целью развития светодиодных технологий является замена существующих систем общего освещения в домах и на улицах экологичными и энергосберегающими светодиодными продуктами.

2.3. Светодиодные устройства на основе карбида кремния и кремния

Создание светодиодов, использующих в качестве подложек для роста светоизлучающих структур SiC и особенно Si, определяется, в первую очередь, стремлением ещё больше удешевить процесс производства чипов.

Получение подложки из Si является хорошо отработанным процессом, что дало возможность получать подложки размером до восьми дюймов.

На рис. 51 (а) показаны подложки из сапфира, SiC в ориентации плоскости роста m , образец подложки из GaN в ориентации плоскости роста m . Там же приведена относительная стоимость изготовленных продуктов. На рис. 51 (б) демонстрируются экспериментальные образцы светодиодной гетероструктуры, выращенной на 150-мм подложки Si.

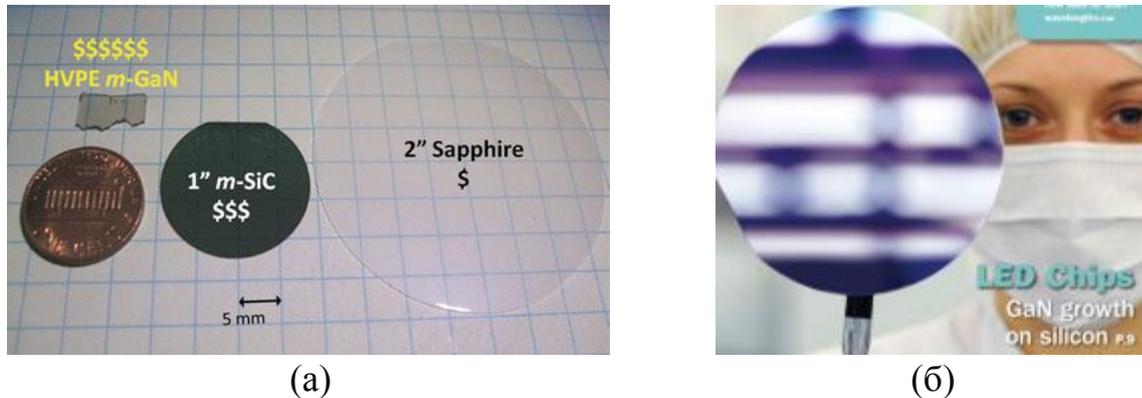


Рис. 51. Фотография 2” подложки сапфира, 1” подложки SiC с ориентацией для роста в m -плоскости, полуполярной подложки GaN 5x10 мм (а). Подложка m -GaN изготовлена методом ХГЭ [35]. 150-мм, аналог 6” подложки Si с выращенной GaN светодиодной структурой (б) (*LEDs Magazine*, February 2012).

2.4. Традиционный процесс производства светодиодов. Светодиоды белого света

2.4.1. Традиционный процесс производства светодиодов

Традиционный процесс производства светодиода включает в себя следующие операции (рис. 52):

1. Крепление подложки, на которой будет выращиваться структура, на подложку-носитель.
2. Проведение процессов эпитаксии (MOCVD, HVPE, MBE), литографии, металлизации. Отделения выращенной структуры от подложки-носителя.
3. Визуальный контроль подложки на наличие дефектов, определение их количества.
4. Измерение электрических и оптических характеристик чипов.
5. Скрайбирование подложки на отдельные чипы, разделение подложки.
6. Проверка качества каждого отдельного чипа и их сортировка в зависимости от значений измеренных характеристик.
7. Крепление чипа в корпусе светодиода с помощью клея или припоя (в зависимости от вида чипа).
8. Монтаж электрических соединений между электрическими площадками чипа и корпуса светодиода.
9. Инкапсуляция светодиодного чипа и токоведущих выводов.

10. Формирование первичной оптики над светодионом.
 11. Тестирование и сортировка полученных светодиодов.

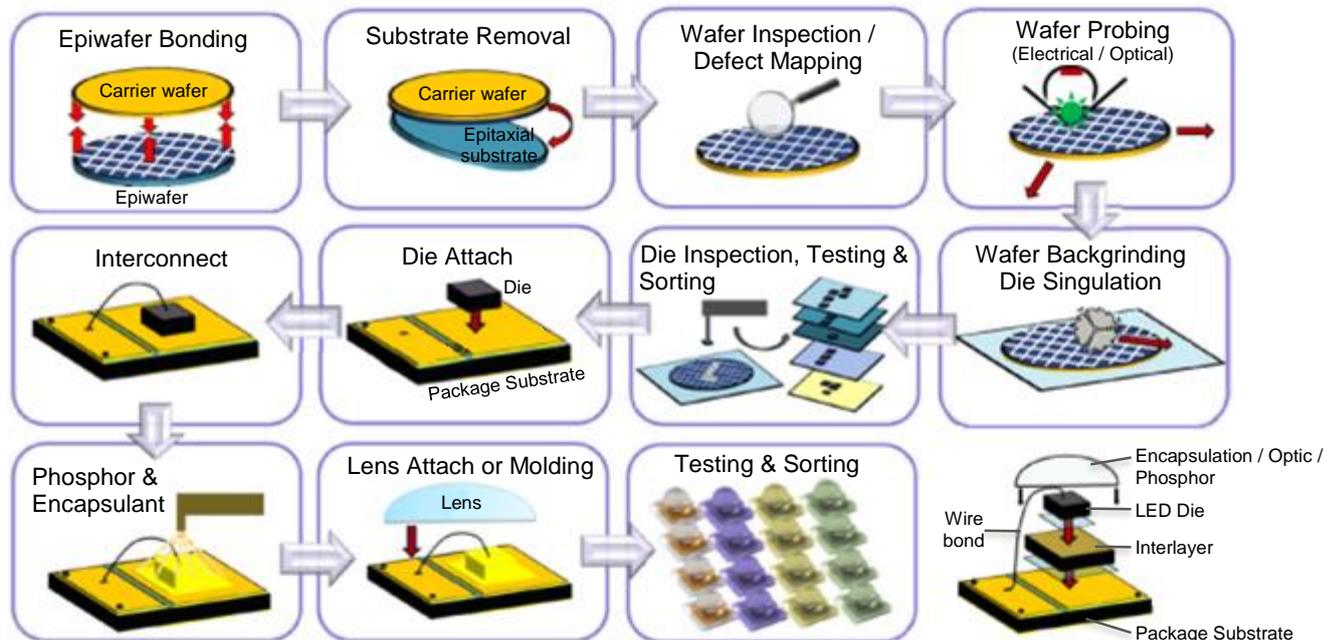


Рис. 52. Процесс производства светодиода [10].

Для получения светодиода белого цвета свечения в полимерную композицию добавляют люминофор. В этом случае п. 9 осуществляется с помощью люминофорно-полимерного композита. «Цветной» светодиод получают «заливкой» чипа оптически прозрачным полимерным материалом, чаще всего на основе кремнийорганических соединений.

2.4.2. Способы получения белого света с помощью светодиодов

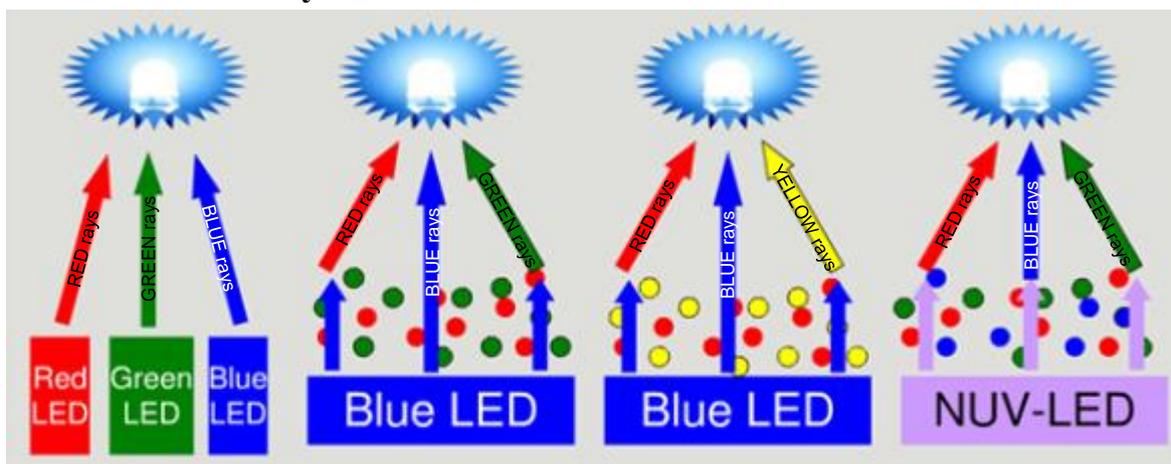


Рис. 53. Схематичное изображение возможных способов получения светодиодов белого цвета свечения.

На рис. 53 схематично представлены способы получения светодиодов белого цвета свечения. Выделяют системы RGB (*red – blue – green*) и RGBA — систему RGB с добавлением светодиода оранжевого цвета свечения, так называемого янтарного цвета (*amber*). Белый свет в

такой системе получается за счет смешивания красного, зелёного, синего и янтарного цветов. В остальных системах «чип – люминофор» люминофоры и чипы используются в следующих комбинациях: светодиодный чип синего цвета свечения – люминофор с переизлучением в зелёной и красной областях спектра; светодиодный чип синего цвета свечения – люминофор с переизлучением в жёлтой и красной областях спектра; светодиодный чип ультрафиолетового излучения – люминофор с переизлучением в синей, зелёной и красной областях спектра.

РАЗДЕЛ 3. Светодиодные светильники: основные элементы, характеристики, стандартизация

- 3.1. Виды светодиодных светильников. Светодиодные лампы
- 3.2. Основные элементы светодиодного светильника
- 3.3. Совершенствование конструкции светильников
- 3.4. Тепловое управление в светодиодном светильнике
- 3.5. Стандарты для производителей светодиодных светильников и их компонентов

3.1. Виды светодиодных светильников. Светодиодные лампы

3.1.1. Виды светодиодных светильников

В зависимости от места применения светодиодные светильники подразделяются на следующие виды: светильники архитектурного освещения, светильники для развлекательных помещений (ресторанов, развлекательных центров, кинотеатров), светильники-дисплеи для розничной торговли, светильники для коммерческого и промышленного освещения, светильники уличного освещения, светильники для жилищно-коммунальных хозяйств (ЖКХ), светильники для жилых помещений, портативные источники света, светильники аварийного освещения, светильники для освещения охраняемых объектов, светильники для сельского хозяйства, подсветки и другие виды.

В зависимости от способа и места крепления светильники могут быть *потолочные* и *настенные*, которые в свою очередь подразделяются на *встраиваемые* и *накладные*. Встраиваемые светильники популярны в архитектурном, декоративном освещении, освещении витрин, различного рода подсветок в мебельном интерьере и многих других. Их основное преимущество — компактность и монтаж непосредственно внутри поверхности, что создаёт гармоничное впечатление за счет отсутствия выделения формы самого светильника и демонстрации только его светового потока.

На рис. 54 приведено несколько различных исполнений светодиодных светильников.



Рис. 54. Различное исполнение светодиодных светильников.



Рис. 55. Светильники для высоких пролётов (*high-bay light fixture*).



Рис. 56. Светодиодные лампы *spot light*, выполненные для разных разъемов: E14 (а), GU 10 (б), MR16 (в).

В англоязычной литературе некоторые виды светодиодных светильников обозначаются следующими терминами:

High-bay light — светильники для высоких пролётов (рис. 55), например на складах;

Spotlight — светильники направленного света (рис. 56), прожектор для подсветки;

Low-bay light — светильники для низких пролётов;

Flood light — светильники-прожекторы с высокой интенсивностью света (рис. 57). Предназначены для наружного освещения и устанавливаются в супермаркетах, на парковках, фабриках, во дворах, на рекламных щитах, зданиях, элементах ландшафтного дизайна;

Down light — светильники, свет которых распространяется вниз (рис. 58 (а)). Применяются для общего освещения в домах, часто в виде встраиваемых. Обладают определённой диаграммой направленности, за формирование которой отвечает расположение светодиодов и форма отражателя;

Rigid light bar — светильники, выполненные в виде световых панелей на жёстком основании. По форме представляют собой линейки, содержащие светодиоды (рис. 58 (б)). Устанавливаются в нишах потолков, стоек, мебели, витрин и других подобных элементах интерьера для подсветки;

Flexible LED strip light — гибкие светодиодные ленты (рис. 58 (в)), шириной до 2 см. Их иногда помещают в прозрачный или полупрозрачный влагонепроницаемый корпус для получения рассеянного излучения. Такие ленты удобны для монтажа и используются для различного рода подсветки, в том числе рекламной;

Выделяют светильники по сфере применений: например, светильник для освещения туннелей — *tunnel light fixture*, представленные на рис. 59; светильники для освещения объектов жилищно-коммунальных хозяйств (см. рис. 60 (б)); светильник для освещения дорог — *street lighting fixture*, показанные на рис. 61.

Panel LED lighting — световые панели, излучающие свет с поверхности, равно протяжённой в двух направлениях (рис. 60 (а)). Используются как источники общего освещения в зданиях;

LED bulb — светодиодные лампы (рис. 62), используемые для замены традиционных ламп накаливания, люминесцентных ламп, в светильниках внутреннего и наружного освещения, в автомобилях, в компактных фонарях и в других устройствах.



Рис. 57. Применение прожекторов большой интенсивности света (*flood light fixture*).

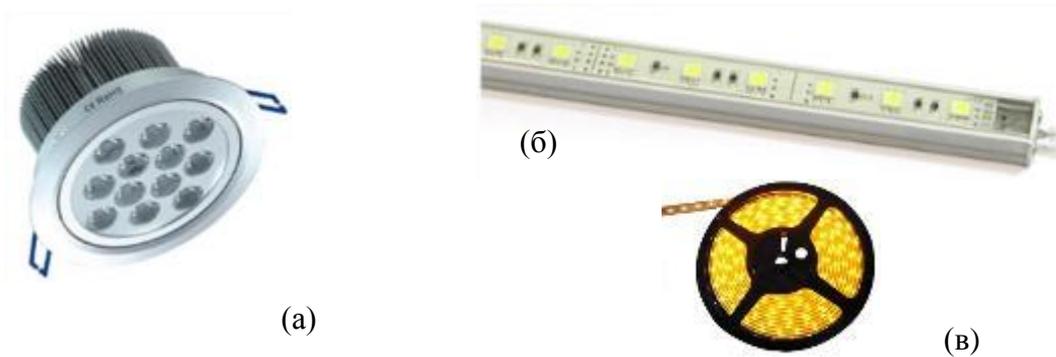


Рис. 58. Светильник направленного излучения (*down light fixture*) (а), световая панель на жёстком основании (*rigid light bar*) (б), гибкая светодиодная лента (*flexible LED strip light*) (в).



Рис. 59. Светильники для освещения туннелей (*tunnel light fixture*).



Рис. 60. Световые панели, используемые для освещения офисных зон (*light panel*) (а) и светильник для ЖКХ (б).



Рис. 61. Уличные светодиодные светильники для освещения автомагистралей (*street lighting fixture*).



Рис. 62. Светодиодные лампы (*LED bulb*).

В зависимости от источника питания светодиодные светильники подразделяются на питающиеся от сети (*on-grid lighting*) и от электрической энергии альтернативных источников (*off-grid lighting*).



(а)

(б)

(в)

Рис. 63. (а) Светодиодный фонарь, установленный в июле 2011 г. в г. Бойс, штат Айдахо (США) — сочетание светодиодного освещения и преобразователя энергии света в электрическую за счет солнечных батарей, эстетично размещённых на фонарном столбе; (б) солнечные панели на крыше дома и комплект из светодиодных ламп и солнечной батареи; (в) светодиодный светильник *SOFT Rockers* с питанием от солнечных батарей рядом с Массачусетским технологическим институтом

В основу светодиодных источников света, питающихся от альтернативного источника энергии, положено совмещение солнечных батарей, блока накопления электроэнергии и светодиодного источника света. Солнечные батареи генерируют постоянный ток, который может

быть непосредственно передан на светодиодный светильник без дополнительной сложной электроники, такой как источник питания светодиодного источника — драйвер. Это повышает эффективность устройств, поскольку устраняются потери, сопровождающие работу драйвера, и расширяет возможности применения светодиодных источников света. Такие светильники получили английское название *solar-powered LED lighting fixture* — светодиодные светильники с электрическим питанием от солнечных батарей. Они применяются в архитектурном освещении (для освещения садов, прогулочных дорожек, указателей), для уличного освещения (парковок, пешеходных переходов, указателей пешеходных переходов), для освещения в жилых домах, находящихся в сельскохозяйственной местности, куда не доведены линии электропередач, и в уличных фонарях (рис. 63). Основным направлением развития рынка этого вида освещения является замена ламп, использующих топливо (керосин, спирт), на светодиодные, которые питаются энергией солнечных батарей. Это направление активно развиваться в странах с высокой солнечной активностью и большим сельскохозяйственным сектором, таких как Индия и Африка.

Другой областью применения такого вида источников света является обеспечение военнослужащих, направляемых в удалённые районы. В массовом масштабе данные источники не производятся, и их распространённость в основном обусловлена снижением нагрузки на электрическую сеть и уменьшением выбросов углекислого газа в атмосферу.

На рис. 63 (а) представлена практическая реализация системы «светодиодный фонарь – солнечная батарея», впервые выполненная на основе фонарного столба: солнечные панели размещены непосредственно на фонарном столбе, что надёжно их защищает от порывов ветра. Такое решение гораздо более эстетично: солнечные панели совершенно не заметны. Инвертор, встроенный в фонарный столб, позволяет передавать электроэнергию по сети в течение дня. Между собой такие фонари соединены беспроводным образом по стандарту IEEE 802.15.4, который лежит в основе системы ZigBee, служащей для управления яркостью, включения и выключения фонарей. В фонаре использован светодиодный светильник Evolve производства компании GE Lighting. По оценке экспертов, экономия энергии за счет использования твердотельного источника света в таком фонаре может достигать 50–60%, а в сочетании с адаптивным управлением и солнечной энергией — до 70–100%.

3.1.2. Виды светодиодных ламп

Устройство светодиодной лампы.

Светодиодные лампы представляют собой технические устройства, состоящие из следующих основных конструктивных элементов (рис. 64): оптической системы из отражателя и рассеивателя, светодиодного модуля, радиатора и источника питания (драйвера). Дополнительным элементом является цоколь, при помощи которого лампа соединяется в светильнике с патроном. К отличительным особенностям такого светодиодного источника света относятся: форма рассеивателя, отражателя и радиатора, а также устройство светодиодного модуля.



Рис. 64. Основные компоненты светодиодной лампы.

Светодиодные модули для светодиодных ламп выполняются либо на дискретных светодиодах, либо на светодиодах, выполненных по технологии «чип на плате» (COB). Мощные светодиодные сборки COB прекрасно подходят на роль светодиодных модулей в таких устройствах, поскольку значительно сокращают длительность процесса изготовления, из которого исключается операция пайки, и в котором снижается количество используемых материалов. Однако конструкции таких светодиодных ламп все ещё дорабатываются и совершенствуются, поскольку эффективность лампы на основе COB по сравнению с лампой, собранной на дискретных светодиодах, несколько ниже.

Виды светодиодных ламп

По назначению светодиодные лампы бывают заменяющими традиционные источники света — лампы накаливания, люминесцентные, металлогалогенные и другие лампы, и *инновационные*, не имеющие аналога.

По способу получения белого света светодиодные лампы подразделяются на лампы, использующие:

- светодиоды белого света системы «синий чип – жёлтый люминофор»¹, полученные на основе преобразования длины волны излучения «синего

¹ Под словами «синий чип» подразумевается полупроводниковый светоизлучающий чип, пиковая длина волны излучения которого находится в синей области спектра. Под словами «жёлтый люминофор», аналогично предыдущему определению, подразумевается люминофор, спектр переизлучения которого приходится на желтую область спектра.

чипа» в длины волн жёлтого диапазона видимого спектра посредством люминофора и аддитивного смешивания данных цветов для получения белого света. 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 увеличивают 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.

Белый свет также можно получить путём комбинации синих, красных и зелёных чипов, однако в светодиодных лампах общего освещения светодиоды белого света системы RGB не используются, поскольку зависимости оптических и электрических характеристик данных чипов от температуры сильно отличаются друг от друга (см. рис. 14–19). В результате конструкторское решение становится достаточно сложным в работе без применения дополнительной управляющей электроники. Тем не менее, системы RGB выступают как основа для создания осветительных устройств с функцией изменения спектра излучения в интеллектуальных системах освещения.

Ещё одной возможностью улучшить качество света и получить индекс цветопередачи более 95 является использование системы RGBA, содержащей дополнительно светодиод с пиковой длиной волны, лежащей в оранжевой области спектра. Такие системы теоретически способны дать очень высокую световую эффективность, до 400 лм/Вт.

По используемым компонентам светодиодные лампы подразделяются на:

- светодиодные лампы на единичных светодиодах;
- светодиодные лампы на интегрированной системе COB.

По виду рассеивателя светодиодные лампы подразделяются на:

- светодиодные лампы с полупрозрачным рассеивателем. В таких лампах используются белые светодиоды или COB, 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 рассеивателя и термических потерь в люминофоре.

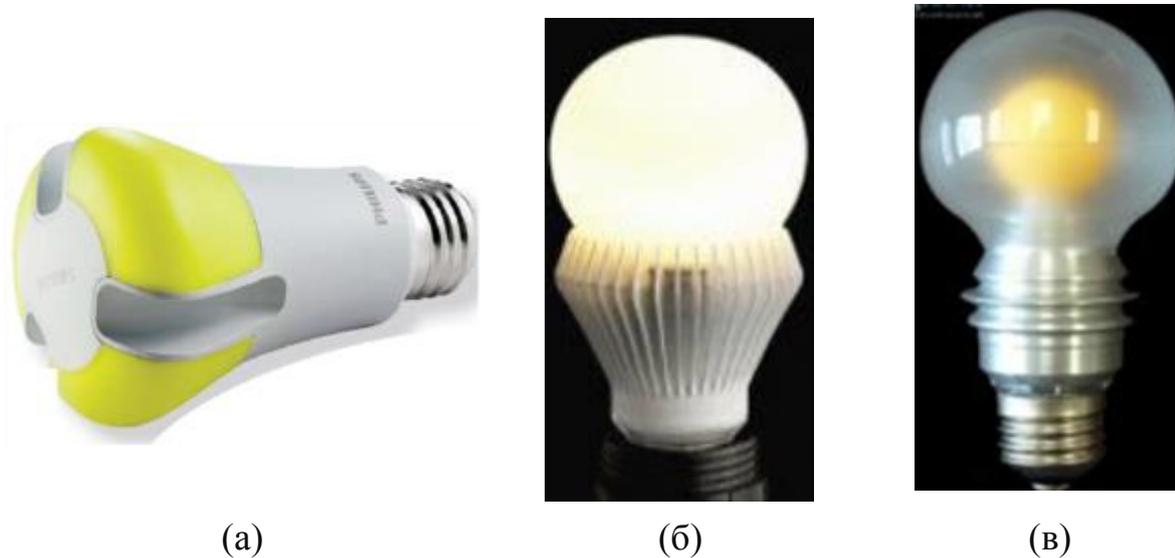


Рис. 65. Светодиодные лампы, в которых используется технология удалённого люминофора для получения белого света, производства компаний Philips (а), Cree (б), Lighting Science Group и Light Prescriptions Innovators (в).



Рис. 66. Устройство светодиодной лампы производства компании Cree, в которой использована технология удаленного люминофора.

На рис. 65 представлено несколько моделей светодиодных ламп, выполненных с использованием технологии удалённого люминофора. На рис. 66 показано внутреннее устройство подобной лампы, производства компании Cree.

Светодиодные лампы различаются по виду цоколей и ламп [36]. Поскольку они изготавливаются в большинстве для замещения

традиционных ламп накаливания, галогенных, колбных и других, обозначение видов цоколей сохраняется.

MR16 (цифры могут различаться) — стандартный типоразмер галогенных ламп накаливания с отражателем. Обычно используется штырьковый цоколь (G9, G4, G23 и другие).

R50 (цифры показывают диаметр лампы) — типоразмер рефлекторных ламп. Они служат для создания направленного света. В большинстве случаев цоколь используется резьбовой — E27 или E14.

Колбные лампы представляют собой лампы, конструктивным элементом которых является колба, выполненная в виде стеклянной, чаще пластиковой, трубки. Колбные лампы различаются по диаметру и по типу цоколя и имеют следующие обозначения: **T5** (диаметр 5/8 дюйма = 1.59 см), **T8** (диаметр 8/8 дюйма = 2.54 см), **T10** (диаметр 10/8 дюйма = 3.17 см), **T12** (диаметр 12/8 дюйма = 3.80 см).



Рис. 67. Светодиодные лампы T8.

Светодиодные линейные лампы T8 (рис. 67) предназначены для эксплуатации внутри помещений в качестве источника рассеянного света и используются для замены обычных люминесцентных ламп с цоколем G13, длиной 60–120 см.

Виды цоколей

В каждом светильнике используется определённый тип патрона, в который можно установить только такую лампу, которая имеет подходящий цоколь. Цоколи ламп имеют определённые обозначения [37], состоящие из последовательности: буква – цифра – строчные буквы. Первая буква указывает на тип цоколя:

- E** — резьбовой цоколь, цоколь Эдисона;
- G** — штырьковый цоколь;
- R** — цоколь с утопленным контактом;
- B** — штифтовой цоколь (байонет);
- S** — софитный цоколь;

P — фокусирующий цоколь.

Второе число указывает диаметр соединительной части цоколя или расстояние между выводными штырьками.

Третьи строчные буквы в шифре показывают количество контактных пластин, штырьков или гибких соединений: **s** — один контакт; **d** — два контакта; **t** — три контакта; **q** — четыре контакта; **p** — пять контактов.

Резьбовой цоколь, цоколь Эдисона



Рис. 68. Резьбовой цоколь.

Цоколь Эдисона — это резьбовая система быстрого соединения лампы с патроном (рис. 68). Обозначение E $\alpha\alpha$ обозначает цоколь Эдисона с характерным диаметром, указанным в миллиметрах. Например, цоколь E27, означает, что диаметр цоколя равен 27 мм.

В Таблице 10 приведены типы, диаметры и наименования наиболее часто встречающихся резьбовых цоколей.

Таблица 10. Виды и наименования существующих резьбовых цоколей

Тип	Диаметр, мм	Наименование
E5	5	Микроцоколь (LES)
E10	10	Миниатюрный цоколь (MES)
E12	12	Миниатюрный цоколь (MES)
E14	14	"Миньон" (SES)
E17 (110 В)	17	Малый цоколь (SES)
E26 (110 В)	26	Средний цоколь (ES)
E27	27	Средний цоколь (ES)
E40	40	Большой цоколь (GES)

Штырьковый цоколь — G

Представляет собой штыревую систему соединения лампы с патроном. Цифры в обозначении показывают расстояние между центрами штырьков, а для большего количества штырьков — диаметр окружности, на которой расположены центры штырьков. Буквы U, X, Y, Z указывают на модификацию конструкции, такие цоколи не являются взаимозаменяемыми.

Серия светодиодных ламп с цоколем G4 (рис. 69) и напряжением питания 11–14 В широко используются в настольных светильниках. В Таблице 11 представлены виды и наименования наиболее распространённых штырьковых цоколей.

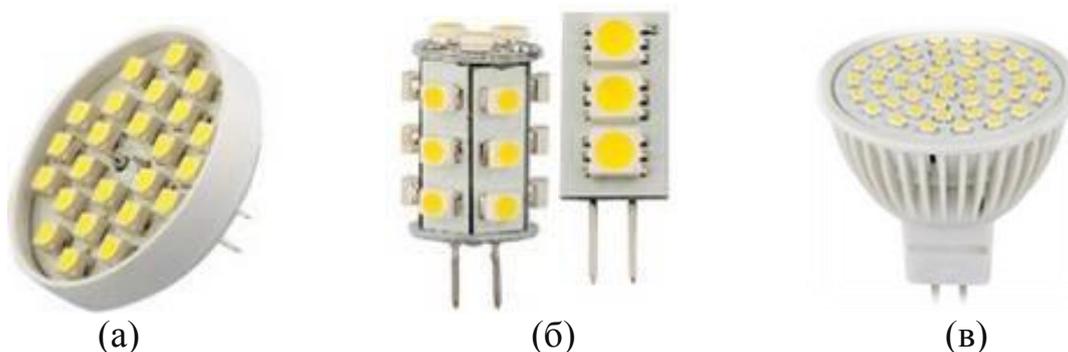


Рис. 69. Некоторые варианты исполнения светодиодных модулей — светоизлучающей основы светильника с цоколем G4 . (а), (б); светодиодная лампа с цоколем G4 (в).

Таблица 11. Виды и наименования существующих штырьковых цоколей

Тип	Расстояние между контактами, мм
G4, GU4, GY4	4
G5	5
G5.3, GU5.3, GX5.3	5.3
GY6.35	6.35
G9	9
GZ10	10
G13	13
G53, GU53, GX53	53

У ламп с цоколем GU10 имеются утолщения на конце контактов для поворотного соединения с патроном (см. рис. 70).

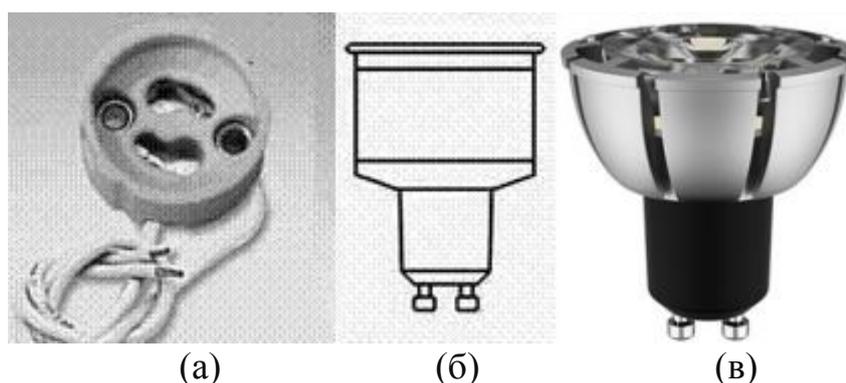


Рис. 70. Вид патрона (а) и цоколя GU10 (б) светодиодной лампы с цоколем GU10 (в).

Иногда цоколь рассматривается как комбинация двух или более аналогичных цоколей. В этом случае перед общим обозначением указывается количество комбинируемых цоколей, например, 2G11, 2G10, 2G13. На рис. 71 представлены две комбинации штырьковых цоколей.

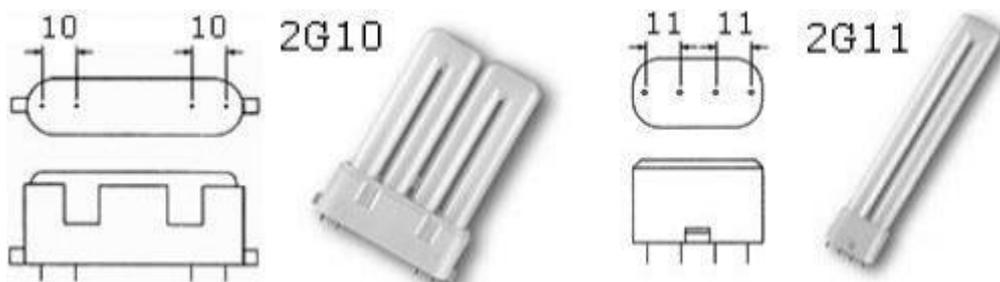


Рис. 71. Комбинации штырьковых цоколей.

Цоколь с утопленным контактом — R

Как правило, лампы с цоколем R7s (рис. 72) применяются в осветительных установках, отличающихся высокой интенсивностью; в быту они используются крайне редко. Отличительными особенностями ламп с цоколем типа R являются незначительная масса и малые габариты. После R7s, обозначения цоколя, указываются цифры 78 или 118, которые показывают общую длину лампы в миллиметрах.

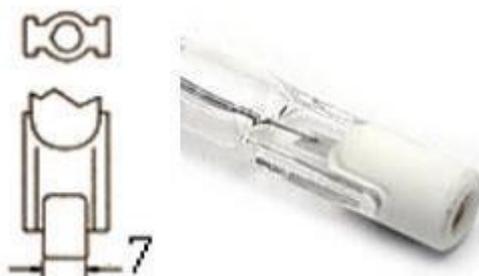


Рис. 72. Цоколь с утопленным контактом R.

Штифтовой цоколь — В

На корпусе цоколя имеются штифты для соединения с патроном (рис. 73). В22d — штифтовой цоколь с диаметром корпуса около 22 мм.



Рис. 73. Штифтовой цоколь В.

Софитный цоколь — S

Софитные цоколи S19 и S14s показаны на рис. 74.



Рис. 74. Софитный цоколь S19 и S14s.

Фокусирующий цоколь — Р

P14.5s — фокусирующий цоколь с одним контактом и диаметром корпуса (ориентирующей части) 14.5 мм (рис. 75).



Рис. 75. Фокусирующий цоколь с одним контактом P14.5s

3.2. Основные элементы светодиодного светильника

В отличие от предшествующих технологий источников искусственного освещения, светодиодные технологии требуют комплексного подхода к созданию светодиодного светильника. При создании светильника на первое место выходит информация о его функциональном назначении (подсветка, освещение жилых домов или офисов, декоративное освещение, уличное или туннельное освещение или что-то другое), месте нахождения (внутри помещения или снаружи) и о наличии сторонних факторов (воздействие прямых солнечных лучей, влаги, ветра, дождя, загрязнений, химических паров, высокой или низкой температуры и проч.). При разработке нового светотехнического светодиодного устройства должны учитываться его эстетика, эргономичность при производстве и существующие стандарты.

На рис. 76 представлены основные факторы, влияющие на конструкцию светодиодного светильника.

Основные элементы светильника показаны на рис. 77. Составными элементами светодиодного светильника являются:

- корпус;
- светозлучающий модуль на светодиодах большой мощности;
- источник питания и управляющая электроника — для обеспечения светодиодов рабочим током и его управлением;

- *оптическая система* — конструктивный элемент, состоящий из *отражателя* и *рассеивателя* света для создания необходимого распределения света в пространстве, диаграммы направленности светового излучения;
- *радиатор* и прочие элементы конструкции, участвующие в *организации теплового режима*; они обеспечивают отвод тепла, создаваемого в ходе работы источников света, источника питания и управляющей электроники.



Рис. 76. Факторы, влияющие на характеристики светодиодного светильника и его основные элементы.

В большинстве случаев в светодиодном светильнике под светодиодным модулем понимается группа светодиодов или мощный светодиод и устройство (драйвер), которое в общем случае преобразует переменный ток от сети электропитания в постоянный ток, необходимый для работы светодиодов. В англоязычной литературе такой модуль может называться *“light engine”*. Иногда под светодиодным модулем понимают только светодиодный источник света без драйвера; в представленном на рис. 77 конструктивном разделении элементов светильника на составляющие имеется в виду именно это определение.

Стоимость светодиодного светильника обычно высока; она фигурирует в качестве параметра при его разработке и выражается в *единицах стоимости на люмен*. Эффективность и стоимость одного люмена являются одними из ключевых показателей для представления светодиодного изделия рынку. Эти два параметра учитывают все перечисленные выше особенности светодиодного светильника, поскольку, например, организация теплового режима, стоимость которого в собранном светильнике играет немаловажную роль, может увеличить

световую эффективность и продлить срок эксплуатации устройства. В свою очередь, с помощью оптической системы светильника можно повысить световой поток и при этом создать незначительную добавку к стоимости. В зависимости от сферы применения светильника инженеры-разработчики находят баланс между стоимостью единицы светового потока и эффективностью устройства. Безусловно, без качественных элементов, включающих светодиоды, драйвер и оптическую систему, создать высокоэффективный светильник будет невозможно. В этой связи, организации теплового режима светодиодного светильника отводится важная роль, так как надёжность, срок службы и характеристики светодиода сильно зависят от температуры.



Рис. 77. Элементы светодиодного светильника.

Технические решения светодиодных светильников часто бывают нетрадиционными. Необходимость совместить в едином исполнении описанные выше конструктивные элементы создаёт огромное пространство для творчества разработчиков.

На рис. 78 представлены основные элементы светодиодного светильника CR22 производства компании Cree, в котором белый свет формируют светодиоды белого света, созданные на основе системы «синий чип» – «жёлто-зелёный люминофор» и светодиоды, излучающие в красной области спектра. Красные и белые светодиоды установлены в

один ряд в центре светильника на радиатор, воспринимаемый как элемент дизайна. Ребра радиатора обращены в помещение, обеспечивая доступ к свободной развитой поверхности радиатора. Свет от светодиодов поступает вверх в смешивающую камеру, отражается от рефлектора и рассеивается по обе стороны от стенок светильника.

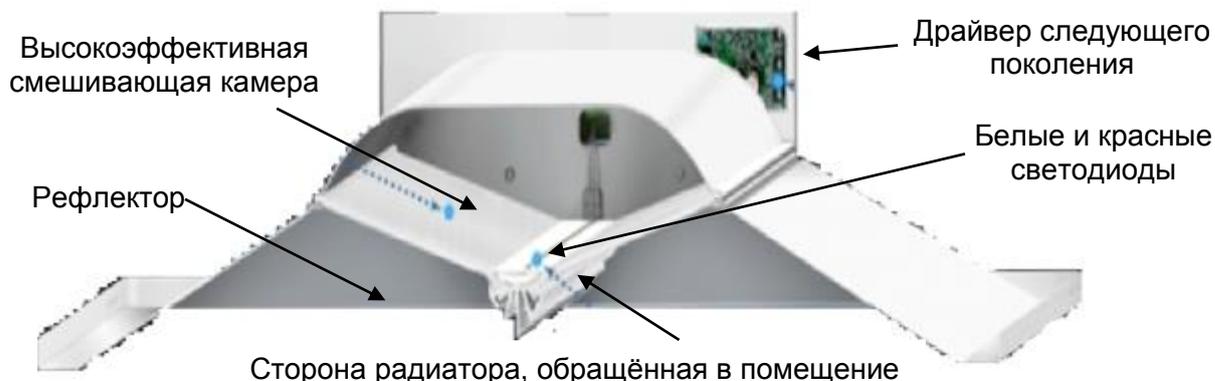


Рис. 78. Светодиодный светильник CR22 производства компании Cree.

3.2.1. Оптическая система светодиодного светильника

Основное назначение оптической системы — формирование определённого распространения света в пространстве при одновременном

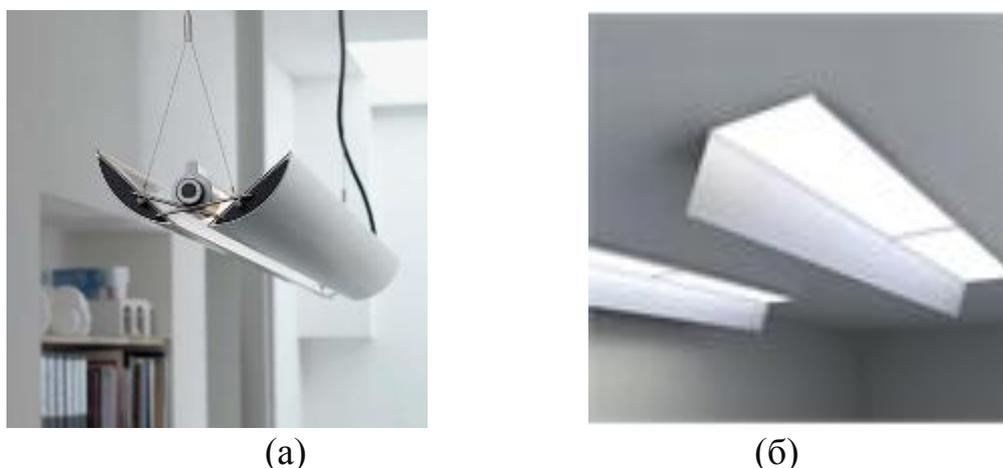


Рис. 79. Светильники, оптические системы которых представлены только отражателем (а) [38] или только рассеивателем (б).

сохранении светового потока, поступающего от единичных светодиодов. Кроме того, в зависимости от места применения будущего светильника и его функциональных качеств, оптическая система отвечает за однородность освещённости, восприятие света с единого светового пространства или поточечно, наличие или отсутствие бликов. Основными элементами оптической системы являются *отражатель* и *рассеиватель*. Эти конструктивные элементы могут присутствовать в светильнике одновременно или по отдельности (рис. 79).

По наличию или отсутствию компонентов оптической системы светильники можно разделить на три типа:

Светильники с рассеивателем. В таких приборах световой модуль полностью скрыт от глаз наблюдателя. Рассеянный свет равномерно распределяется по освещаемому пространству.

Светильники с отражателем. Некоторые модели светильников выпускаются без рассеивателя. Они комплектуются одним рефлектором, который направляет свет вниз или вверх и в стороны. При этом формируется не столь равномерное общее освещение, однако такие светильники в основном служат прожекторами, равномерный свет от которых получается за счет перераспределения света в пространстве при отражении от освещаемых поверхностей.

Светильники с отражателем и рассеивателем. Форма отражателя создаёт направление, в котором будет выходить излучение, а рассеиватель позволяет воспринимать свет однородным с поверхности светильника.

3.2.1.1. Отражатель (рефлектор) светильника

Отражатель выполняет функцию направления света и его перераспределения в пространстве за счет многократного отражения. Он может быть любой формы в зависимости от функционального назначения светильника.

По способу распределяемого отражённого потока света, *отражение* может быть *зеркальным* (направленным), *рассеянным* (диффузным), *направленно-рассеянным* и *смешанным* [39]. Наиболее важными характеристиками материалов, отражающих свет, следует считать коэффициент отражения и кривую распределения отражённого потока света в пространстве (индикатрису), а в цветных светоотражающих материалах немаловажен такой показатель, как распределение коэффициента отражения в спектре. Однако цветные материалы при изготовлении осветительных приборов, как правило, не применяются.

Материалы с *направленным* и *направленно-рассеянным* типом *отражения* представляют собой металлы, обработанные различными методами, или же покрытия из металла на неметаллическом основании. Рассеянное отражение формируют матовая бумага, ткани, большинство красок и эмалей. *Смешанным отражением* обладают специфические силикатные эмали и блестящие белые материалы (силикатные и синтетические материалы с добавками, не пропускающими свет, блестящая бумага и другие). *Направленное отражение* даёт возможность более точно и направленно распределять поток света ламп, создавая тем самым необходимую кривую силы света (КСС). Максимальным коэффициентом отражения из всех очищенных металлов обладает серебро. Его коэффициент отражения равен 0.92. Но из-за своей высокой стоимости серебро используется лишь в виде тонко нанесённого слоя на обычных

стеклянных отражателях некоторых прожекторов и в увеличительных приборах.

Распространённым среди материалов отражателей является также обработанный алюминий, в чистом виде имеющий коэффициент отражения 0.8, но быстро окисляющийся на воздухе. Защиту этого металла от контакта с воздухом осуществляют преимущественно методами альзакирования или анодирования. Процесс альзакирования заключается в покрытии металлической поверхности тонкой плёнкой двуокиси или окиси кремния. Эта тонкая плёнка понижает коэффициент отражения, однако полностью блокирует доступ воздуха к металлу, укрепляя в то же время его поверхность. Процесс анодирования состоит в обработке поверхности металла растворами ортофосфорной кислоты, ангидрида хрома и других элементов при одновременном воздействии электрического тока. Обработанная поверхность становится отполированной, а сформированный защитный слой предотвращает изменение коэффициента отражения поверхности металла со временем под воздействием влаги [40].

Поскольку стоимость металлов с каждым годом увеличивается, а коэффициент отражения металла сильно зависит от степени его чистоты, экономически и экологически оправданным решением является использование вместо очищенного алюминия его сплавов, а также стали и пластика (например, поликарбоната), придающих готовому материалу отражателя прочность и гибкость, а самому отражателю — возможность принимать любые формы и размеры. Иногда в качестве материала отражателя используют стекло. Такие материалы, как пластик и стекло, сначала покрывают слоем высокоочищенного алюминия путём его испарения в вакууме, и затем защитным слоем, например, SiO_2 . Если материал отражателя предназначен для направленного отражения, то поверхность материала основы должна быть максимально гладкой и не иметь шероховатостей. В противном случае отражение будет направленно-рассеянным.

На сегодня коэффициент отражения от листов металла с тонким слоем высокоочищенного алюминия достиг значения 99.99%, а с нанесёнными поверх защитными слоями из SiO_2 и TiO_2 — 95%. Наивысший коэффициент отражения света достигается при замене высокоочищенного Al на серебро; в этом случае коэффициент отражения максимален и равен 98%.

Отражатели на основе сплавов алюминия выполняются и с направленно-рассеянным типом отражения разного качества рассеяния. Рассеянное излучение для светильников, в которых не предусмотрено наличие рассеивателя, получают, используя распыление белых красок и эмалей на основе цинковых окисей, окислов титана и других на внутреннюю поверхность корпуса. Коэффициент отражения качественных эмалей составляет 85%.

Материал отражателей, свойства которого должны сохраняться неизменными в предполагаемых условиях работы, подбирается с учётом мощности светильника. Прежде чем использовать тот или иной материал, оцениваются его термостойкость, стойкость к химическому воздействию и влажности, прочность на ударное нагружение и устойчивость к другим факторам воздействия. Для высокомоощных световых приборов основными материалами отражателей являются алюминий и сталь; при этом зачастую отражатель выполняет функцию корпуса прибора. Часто для таких устройств в качестве материала отражателей выбираются особые стекломали, которые обладают зеркально-диффузным отражением смешанного типа. В этих материалах при достаточно небольших углах направления потока света преобладает рассеянное отражение, а при увеличенных углах повышается доля зеркального отражения. При этом общий коэффициент отражения увеличивается приблизительно до 85%. Эту характерную черту материалов с отражением смешанного типа следует принимать во внимание при изготовлении осветительных приборов.



Рис. 80. Светодиодный модуль с рефлексором.

Форма и размер рефлексора могут быть различными и применяться как к единичному светодиоду минимального размера (рис. 80 и 81), так и ко всему светотехническому изделию (рис. 82).

Зачастую в лампах и в светильниках помимо отражателя используют и линзы, однако, это не всегда так. Компания AcuityBrands, Inc., США, ввела свою первую линейку светодиодных ламп (рис. 84) в мае 2011 г. Эти лампы подобны лампам Megaman™ (бренд компании Neonlite); в них вместо линз используют отражатель, чтобы направить свет от вертикально установленных светодиодов. Были представлены модели ламп PAR16,

PAR20, PAR30, PAR38, MR16 и AR111 в нескольких цветовых температурах с различными диаграммами направленности.



Рис. 81. Светодиодная лампа мощностью 20 и 24 Вт, предназначенная для замены традиционных ламп соответственно мощностью 150 и 200 Вт, применяемых в уличных фонарях. Металлический отражатель выполнен над каждым отдельным светодиодом.



Рис. 82. Светодиодные лампы Acuculamp производства компании AcuityBrands, Inc с вертикально установленными светодиодами; в этих лампах отсутствуют вторичные линзы.

3.2.1.2. Рассеиватель светильника

Оптический рассеиватель необходим для создания однородности распределения света в пространстве, отсутствия бликов в светильниках общего освещения и в создании равномерного освещения в светильниках подсветки. Оптические рассеиватели в современных светильниках делают из поликарбоната (РС) (рис. 83) и полиметилметакрилата (РММА), поскольку эти материалы позволяют изготавливать линзы и рассеиватели практически любых размеров, форм и диаграмм направленности. Они к тому же гораздо легче, например, стекла, и технологичны, а также

прочнее других полимерных материалов, таких, например, как полистирол, полипропилен, стиролакрилонитрил и другие.

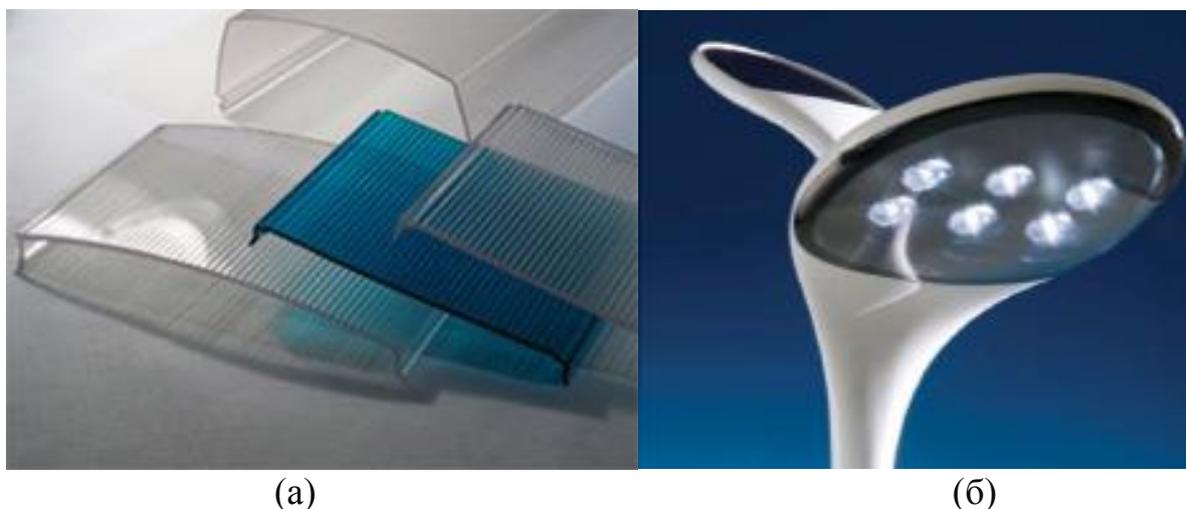


Рис. 83. Рассеиватели из поликарбоната (а) и их использование в светодиодных светильниках для уличного освещения (б).

Современные материалы на основе поликарбоната хорошо подходят для светодиодных ламп и светильников, в том числе дизайнерских. Они обеспечивают защиту от воспламенения, обладают малым весом, сохраняют свои свойства под действием ультрафиолетового излучения, способны работать при температурах от -30 до $+50$ °С.

Помимо рассеивателей, находящихся на некотором удалении от источника света, в светодиодном освещении, авиационных дисплеях, дорожных знаках, в подсветке дисплеев и жидкокристаллических экранов, для освещения стен и аллей и для других целей применяются специальные плёнки, которые накладываются непосредственно на источник света. Например, в плёнках Luminit выходящий пучок имеет неосевое направление распространения света (рис. 84). Такие плёнки используются именно в тех случаях, когда требуется не прямое распространение света.

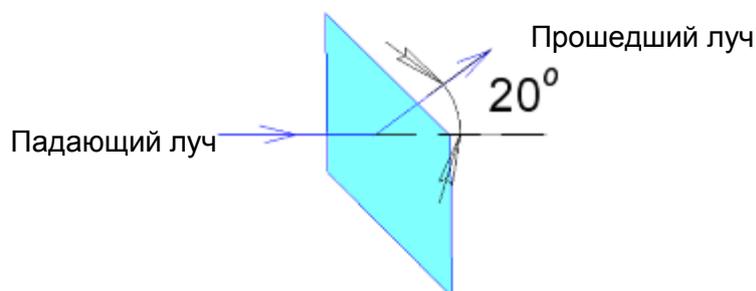


Рис. 84. Схема распространения луча света в специальной плёнке Luminit, для которой характерно неосевое распространение света.

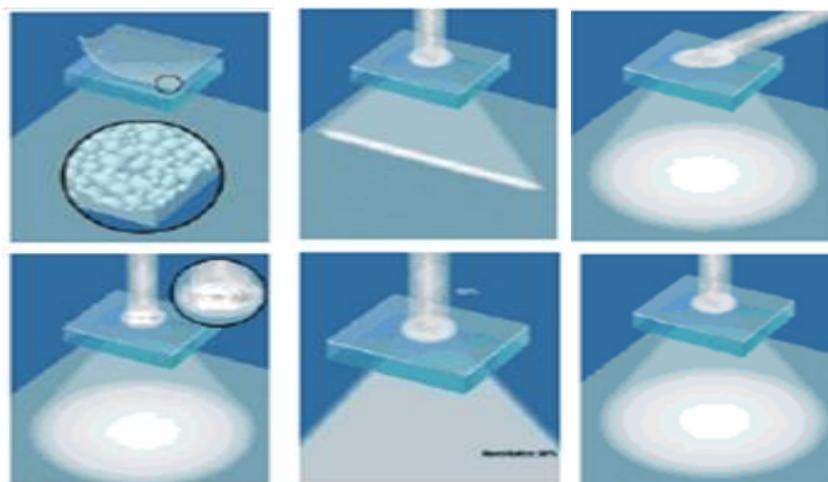


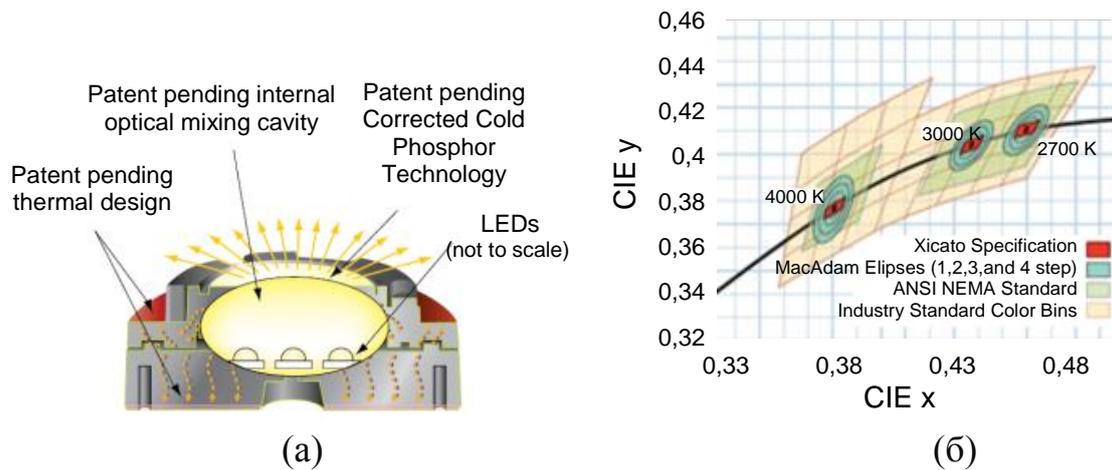
Рис. 85. Применение для рассеяния света плёнок, отклоняющих падающий на них прямо свет на характерный угол. Показаны варианты направления распространения света.

Они могут применяться либо самостоятельно, и в этом случае угол отклонения лучей составляет 20° , либо в комбинации с отражателем, и тогда угол распространения будет определяться уже конструкцией системы. С помощью плёнок, изменяющих направление света, можно комбинировать особенности диффузного и углового распределения света в пространстве. Плёнки производства компании MesoOptics представляют более широкие варианты распространения светового луча в пространстве (рис. 85).

Отметим, что в некоторых случаях оптический рассеиватель содержит люминофор, а сами светодиоды в таком светильнике чаще всего излучают синий свет. Такая концепция называется системой удалённого люминофора; она реализована во многих светодиодных продуктах (рис. 86 и 87). Преимущества удалённого люминофора описаны выше.



Рис. 86. Офисный светильник производства компании ЛидерЛайт, в рассеиватель которого помещен люминофор.



(в)

Рис. 87. Устройство светодиодного модуля Xicato, в котором использована технология удалённого люминофора: схема устройства (а), его преимущества по цветовой стабильности (б), внешний вид таких модулей [41] (в).

Компания Intematix производит линейку продуктов — рассеивателей, содержащих люминофор, причем, совершенно разнообразной формы. На рис. 88 представлены некоторые их образцы.

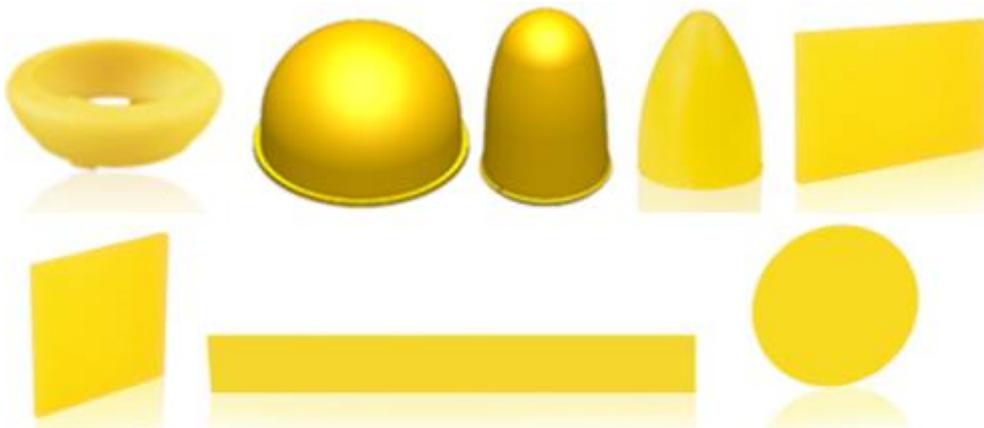


Рис. 88. Линейка рассеивателей с люминофором производства компании Intematix под брендом Chromalit.

Компания заявляет об увеличении на 30% эффективности светодиодного светильника при использовании такого способа преобразования излучения в белый свет.

В Таблице 12 приведены характеристики круглой панели удалённого люминофора Chromalit.

Таблица 12. Характеристики рассеивателей с люминофором Chromalit в виде плоской круглой панели (см. рис. 88) [42]

Код продукта	CCT, К	Постоянство цвета (в пределах эллипсов Мак Адама) (SDCM)*	Диаметр, мм	CRI	Угол обзора, градус	Эффективность преобразования, лм/Вт**			
						при 25°C		при 80°C	
						Мин.	Тип.***	Мин.	Тип.
CL-827-LR-PC	2700	3	61.5	80	115	150	165	147	162
CL-830-LR-PC	3000	3	61.5	80	115	165	180	162	176
CL-835-LR-PC	3500	3	61.5	80	115	172	187	169	183
CL-840-LR-PC	4000	3	61.5	80	115	180	195	176	191
CL-827-SR-PC	2700	3	45.0	80	115	150	165	147	162
CL-830-SR-PC	3000	3	45.0	80	115	165	180	162	176
CL-835-SR-PC	3500	3	45.0	80	115	172	187	169	183
CL-840-SR-PC	4000	3	45.0	80	115	180	195	176	191

* SDCM — standard deviation color matching, стандартное отклонение согласования цвета.

** Вт — здесь единица радиометрической мощности, то есть мощности излучения источника света.

*** Минимальное и типичное значения.

3.2.2. Спектры излучения светодиодных светильников

Как известно, спектр излучения по-разному влияет на организм человека [43]. Например, присутствие красного цвета в спектре белого света создаёт тёплый белый свет — приятный, жизнерадостный и притягивающий внимание; акцент на синий цвет в спектре стимулирует работоспособность. Именно поэтому при создании светильника для определённого применения особое внимание уделяется его спектру. Так, в спектры излучения белого света светодиодных светильников, устанавливаемых в магазинах и торговых центрах, добавляют красную составляющую.

Качество цвета характеризуется индексом цветопередачи [22]. Для лампы накаливания он принят равным максимально возможному значению 100. Для люминесцентных ламп этот показатель не оценивается ввиду линейчатости спектра. Индекс цветопередачи рассчитывается на основе цветовых различий между эталонным и тестируемым источниками света.

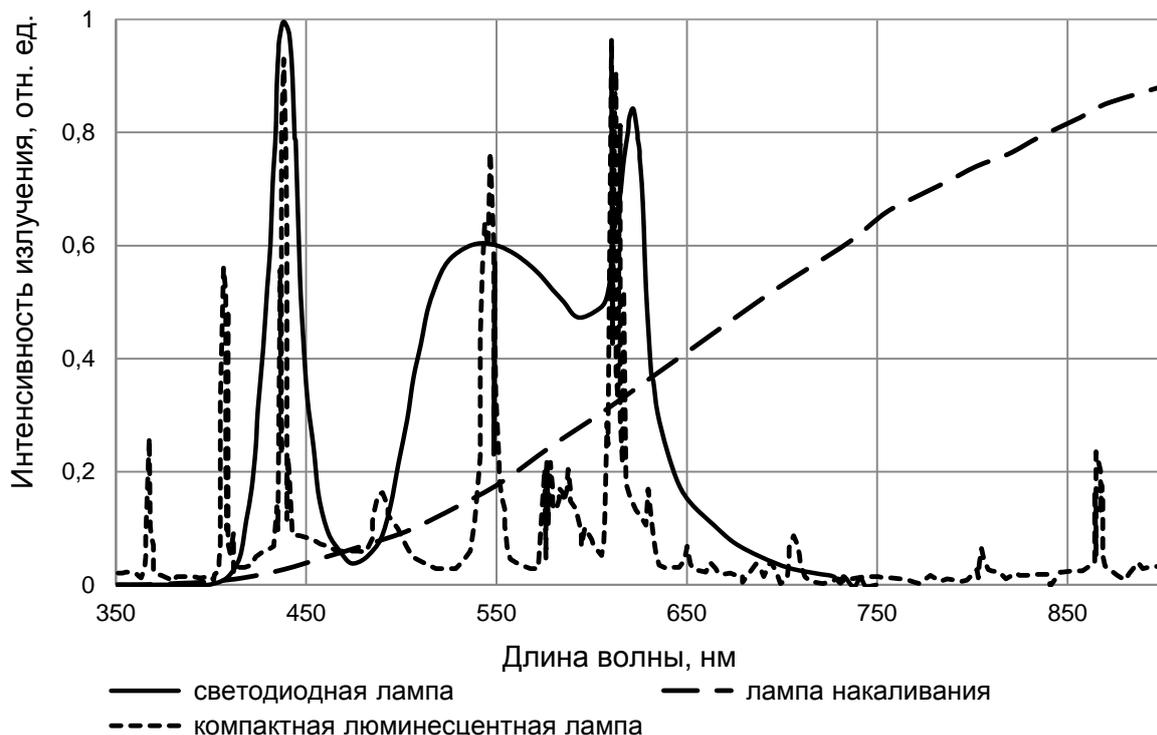


Рис. 89. Спектры излучения светодиодной лампы белого света, лампы накаливания и люминесцентной лампы.

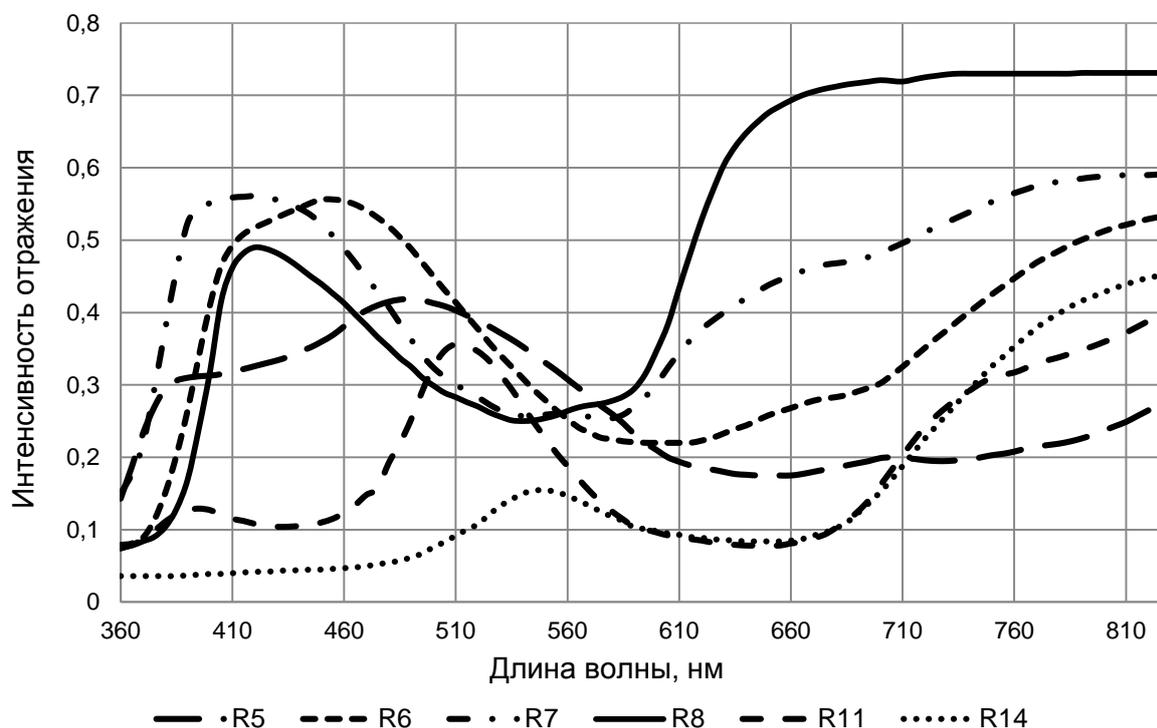


Рис. 90. Спектры нескольких контрольных цветов.

На рис. 89 представлены спектры излучения всем известной лампы накаливания и люминесцентной лампы, а также спектр излучения светодиодной лампы. Как видите, спектр лампы накаливания непрерывный, спектр люминесцентной лампы линейчатый, а спектр

светодиодной лампы также сплошной, но имеет небольшой «провал». Его «заполнение» способствует повышению индекса цветопередачи источника света на основе светодиодов. Напомним, что для люминесцентной лампы CRI не оценивается.

На рис. 90 представлены спектры некоторых контрольных цветов, по которым производится сравнение спектра источника света для определения индекса цветопередачи.

В случае отсутствия красной линии в спектре излучения светодиодного источника света качество света снижается. В таких светодиодах индекс цветопередачи не превышает 70.



Рис. 91. Светодиодная лампа производства компании OSRAM, цвет излучения которой построен на использовании белых и красных светодиодов (а). Светильник CR14, CR22, CR24 производства компании Cree, излучение в котором организовано по той же концепции (б).

Компания Osram OptoSemiconductors предложила концепцию смешивания светодиодов, которая заключается в сочетании белых и красных светодиодов для достижения высокоэффективного тёплого белого света с эффективностью 110 лм/Вт и с высоким (>90) индексом цветопередачи. Производитель называет эту концепцию «Brilliant-Mix». Она используется при изготовлении светильников и ламп, заменяющих традиционные (см. рис. 91 (а)). В этом подходе используется два вида светодиодов — тёплые белые (EQ-White LED) и оранжевые (Amber LED) версии светодиодов Oslon мощностью 1 Вт с размерами 3×3 мм², что делает их удобными для кластеризации, облегчает смешивание излучения и улучшает оптический дизайн на уровне светодиодов. Данный подход реализован в лампах Parathorn Pro Classic 80 и в модуле Preva LED производства компании OSRAM для получения высокого индекса

цветопередачи белого света с цветовой температурой (ССТ) от 2700 до 4000 К.

В светильниках CR24 и CR22 уникального дизайна компании Cree, предназначенные для офисов и школ, также используется технология смешивания белых и красных светодиодов; она называется производителем «True-White». Эффективность этих светильников составляет 90–110 лм/Вт. Устройство светильника CR22 представлено на рис. 78.

Стадии роста растений также зависят от спектра получаемого ими света [44]. В результате процесса фотосинтеза растение поглощает углекислый газ и выделяет кислород. Свет поглощается различными пигментами в растении, в основном, хлорофиллом. Этот пигмент поглощает свет в синем и красном участках спектра.

Помимо фотосинтеза существуют и другие процессы в растениях, на которые свет различных участков спектра оказывает своё влияние (см. рис. 92). Подбором спектра, чередованием длительности светлого и тёмного периодов можно ускорять или замедлять развитие растения, сокращать вегетационный период и другие стадии роста.

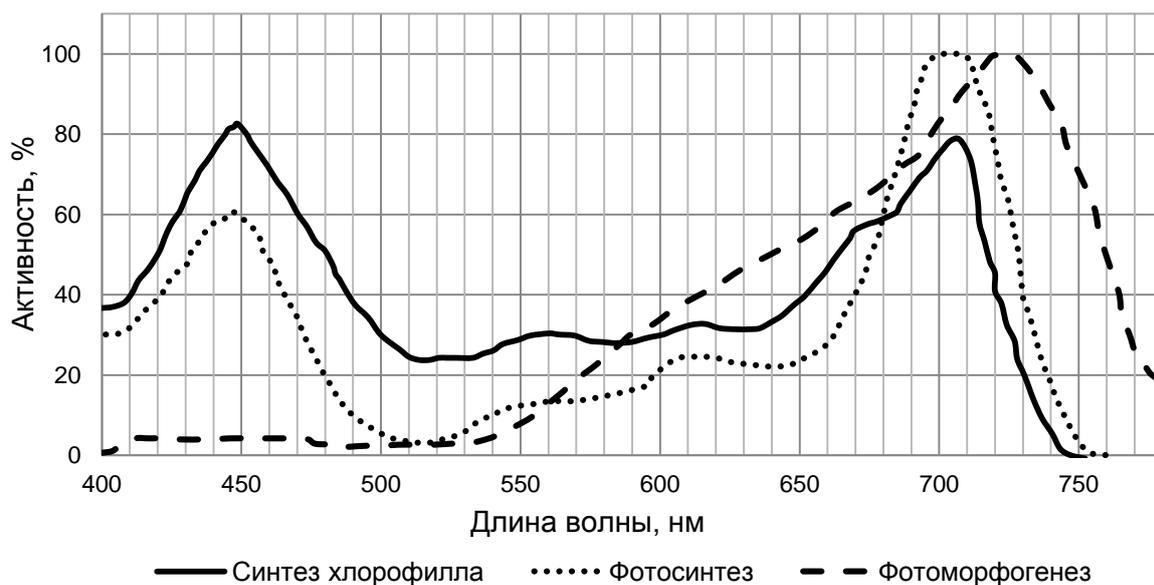


Рис. 92. Спектр поглощения хлорофилла.

Например, пигменты растений с пиком чувствительности в красной области спектра отвечают за развитие корневой системы, созревание плодов, цветение растений. Для воздействия на скорость этих процессов в теплицах используются натриевые лампы, большая часть излучения которых приходится на красную область спектра. Пигменты растений с пиком поглощения в синей области спектра отвечают за развитие листьев и рост растения. Причём наибольшее значение имеют красные (720–600 нм) и оранжевые лучи (620–595 нм). Именно они являются основными

поставщиками энергии для фотосинтеза и влияют на процессы, связанные с изменением скорости развития растения: избыток красной и оранжевой составляющей спектра задерживает переход растения к цветению. Синие и фиолетовые (490–380 нм) лучи, кроме непосредственного участия в фотосинтезе, стимулируют образование белков и регулируют скорость развития растения. У растений, живущих в природе в условиях короткого дня, эти лучи ускоряют наступление периода цветения. Ультрафиолетовые лучи с длиной волны 315–380 нм задерживают «вытягивание» растений и стимулируют синтез некоторых витаминов, а ультрафиолетовые лучи с длиной волны 280–315 нм повышают холодостойкость. Лишь жёлтые (595–565 нм) и зелёные (565–490 нм) длины волн не играют особой роли в жизни растений.

В настоящее время в теплицах, парниках и оранжереях используют светодиодные светильники с специально подобранным спектром излучения. В этих светильниках элементами, излучающими свет, являются синие и красные чипы с пиковой длиной волны излучения 445–450 нм и 645–660 нм. Такие системы позволяют управлять спектром излучения, регулируя его под стадию роста растений. Светодиодные тепличные системы также используют и излучение синих чипов и красного люминофора. На рис. 93 представлен внешний вид светодиодных светильников для освещения растений.



Рис. 93. Внешний вид светодиодных светильников для освещения растений.

3.3. Совершенствование конструкции светильников

Эргономика

Для упрощения сборки светодиодных светильников и удобства их монтажа в домашних условиях производители светильников ищут и разрабатывают эргономичный дизайн устройства. Одним из вариантов на сегодняшний день является модуль Infusion производства компании GE Lighting (рис. 94), выпускаемый в различном исполнении по световому потоку и коррелированной цветовой температуре: 2700, 3000 и 4000 К; 3000 К, 1100 лм, 15 Вт, 7 светодиодов; 3000 К, 3000 лм, 46 Вт, 22 светодиода. Основная идея модуля — это возможность замены светящейся части по желанию потребителя. При этом модуль

подключается к светильнику через механизм поворотного замка (*twist-lock*), обеспечивающий необходимые тепловое, электрическое и механическое соединения. Этот модуль имеет бортовую тепловую защиту, выключающую светодиоды в случае превышения температуры.



Рис. 94. Модуль Infusion производства компании GE Lighting с упрощённой системой фиксации в светильнике

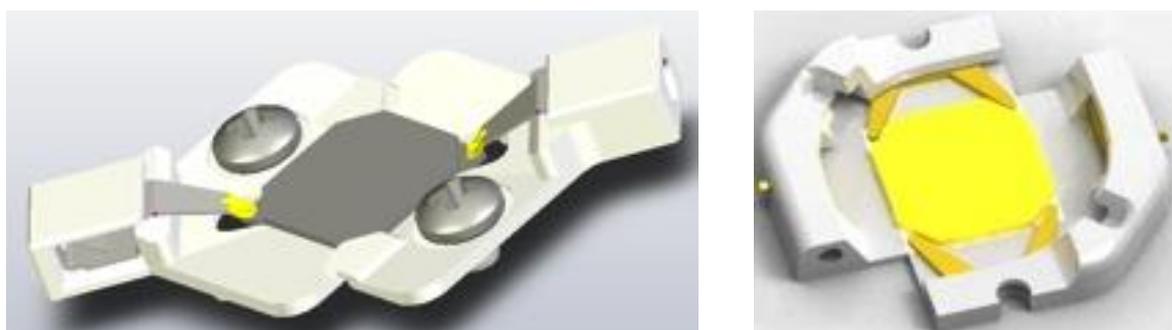


Рис. 95. Монтаж единичного элемента Optogan X10 с помощью прижимных контактов

В светодиодном модуле Optogan X10 также предусмотрен удобный способ крепления светоизлучающего элемента, мощной светодиодной сборки «чип на плате» (COB), к электрическим контактам (рис. 95). Монтаж осуществляется с помощью фиксатора, механически прижимающего контакт к токоведущим путям COB и к радиатору.

Преимущества светодиодных светильников

Преимуществами качественных светодиодных светильников перед другими источниками света являются:

- ✓ низкое энергопотребление и высокая световая отдача;
- ✓ мгновенное включение и выключение;
- ✓ стойкость к вибрациям и ударам;
- ✓ экологичность и безопасность при использовании и утилизации;
- ✓ белый свет высокого качества, при индексе цветопередачи в диапазоне 80–95;
- ✓ отсутствие мерцания света;
- ✓ длительный срок службы, до 50 000 ч при сохранении 80% светового потока от первоначального значения, а значит, простота и удобство в эксплуатации и отсутствие необходимости замены устройства на протяжении всего времени его использования;
- ✓ оптимальная диаграмма направленности излучения в зависимости от цели освещения с возможностью создания направленного или рассеянного света;
- ✓ отсутствие в спектре излучения инфракрасной составляющей и, как следствие, низкое тепловыделение и отсутствие нагрева окружающих поверхностей и предметов;
- ✓ гарантии работоспособности при любой влажности и температуре окружающей среды от -50 до $+50$ °С.

3.4. Обеспечение теплового режима светодиодного светильника

Обеспечение теплового режима светодиодного светильника, или, как ещё часто называют этот процесс, тепловое управление, является определяющим по отношению к характеристикам устройства. Тепло, появляющееся из-за потерь при излучении и переизлучении света чипами и люминофором, должно отводиться от источников излучения самым оптимальным путём.

Генерируемое в светодиоде тепло обусловлено потерями носителей за счет их утечки из активной области, поглощения рождённых фотонов слоями материала полупроводникового чипа, герметизирующего вещества, люминофора, потерями при преобразовании синего света в жёлтый. Снизить количество тепла можно за счет применения высококачественных и высокоэффективных светоизлучающих полупроводниковых структур и других материалов, однако полностью исключить его невозможно. К тому же, электрические и оптические свойства полупроводников, используемых при изготовлении светодиодов, сильно зависят от температуры и при её увеличении начинают деградировать с увеличенной скоростью. При перегреве такие элементы быстро выходят из строя.

Повышенная температура приводит к следующим негативным последствиям:

- изменению коэффициента преломления инкапсулирующего материала светодиода;
- механическим напряжениям в материалах основных компонентов светодиода;
- изменению цвета излучаемого света: сдвигу цветовых координат, изменению пиковой длины волны излучения;
- разрушению материала адгезива, фиксирующего чип в корпусе;
- уменьшению светового потока;
- нарушению целостности паяного соединения между внешними контактными площадками корпуса светодиода и контактными площадками печатной платы;
- деградации люминофора;
- деградации материала чипа;
- уменьшению срока службы светодиода.

3.4.1. Виды радиаторов

Радиатор — это устройство для рассеивания тепла, передаваемое ему за счет тесного механического контакта с генератором тепла. В случае светодиодного светильника таким генератором является светодиодный модуль.

Светодиодный модуль представляет собой печатную плату с припаянными на неё светодиодами. Печатная плата в основном выполняется на металлическом основании. Готовый модуль через теплопроводящую прокладку или теплопроводящую пасту механически фиксируется в корпусе светильника. В достаточно мощных светильниках в состав корпуса входит радиатор, рассчитанный на отвод определённого количества тепла в единицу времени.

Развитая поверхность радиатора, обладающая гораздо большей площадью по сравнению с площадью плоской поверхности светодиодного модуля, обеспечивает увеличенную конвекцию, тем самым охлаждая светодиодный модуль и в конечном итоге приводя к обеспечению и поддержанию теплового режима.

Различают естественные и принудительные системы охлаждения.

Естественные системы охлаждения, такие как радиатор (*heat sink*), не потребляют электрическую мощность при охлаждении источника света. Такие системы являются пассивными.

Силовые или принудительные системы охлаждения, такие как вентилятор (*fan*) или синтетические струи (*synthetic jet*), потребляют электрическую мощность для того, чтобы отводить тепло, охлаждая источник света. Принцип работы синтетических струй основан на создании пульсирующих потоков воздуха, которые направляются точно на область, более всего требующую охлаждения. Он представлен на рис. 96.

На рис. 97–100 представлено несколько моделей пассивных и активных систем охлаждения.

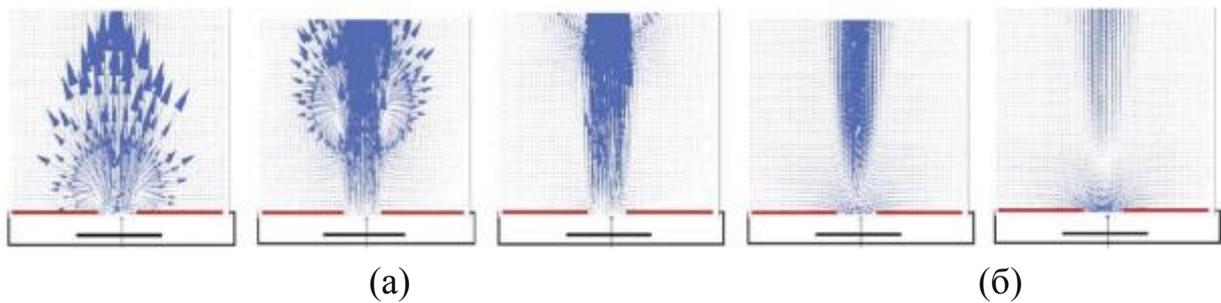


Рис. 96. Векторы скорости потока синтетической жидкости: фазы выпуска (а), фазы всасывания (б).

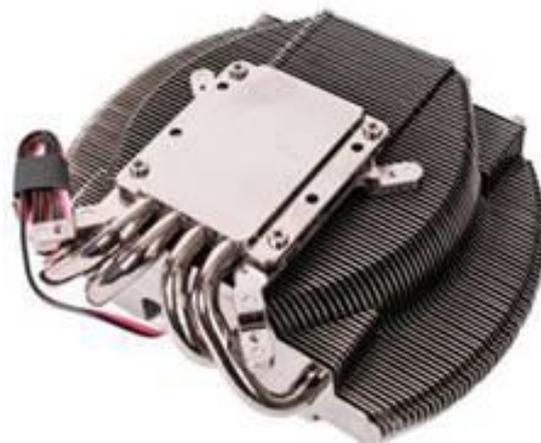
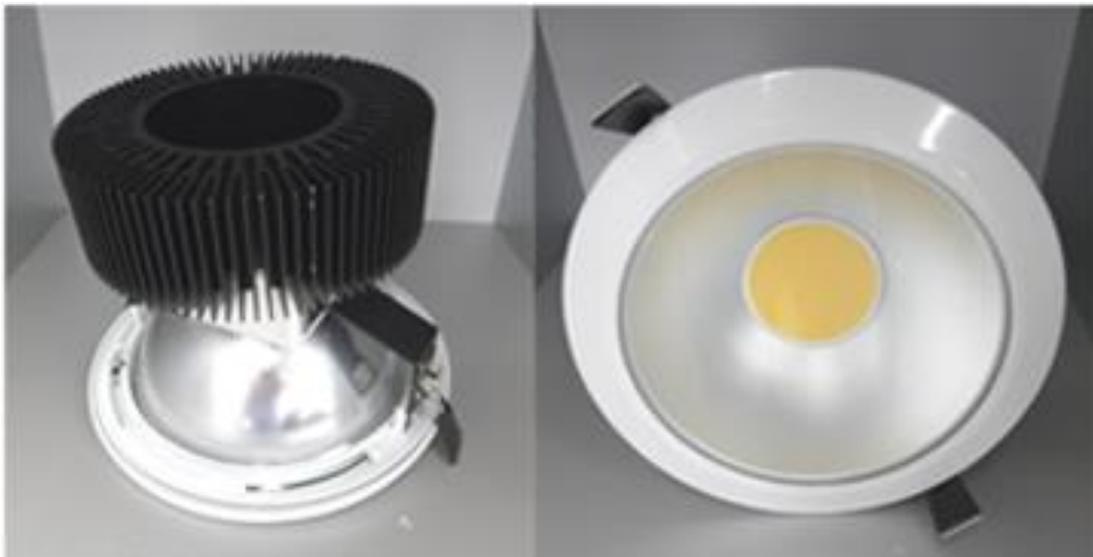


Рис. 97. Светильник с естественной системой охлаждения.

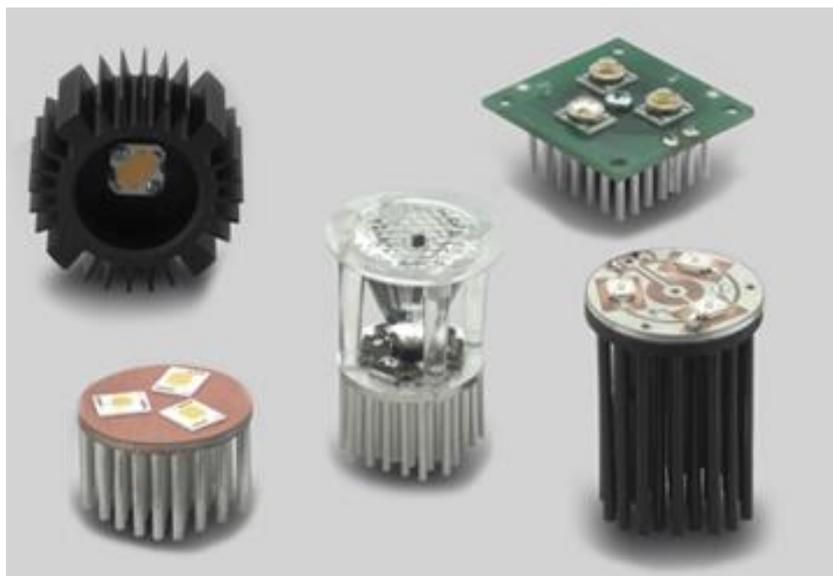


Рис. 98. Светодиодные модули COB и светодиоды на радиаторах.

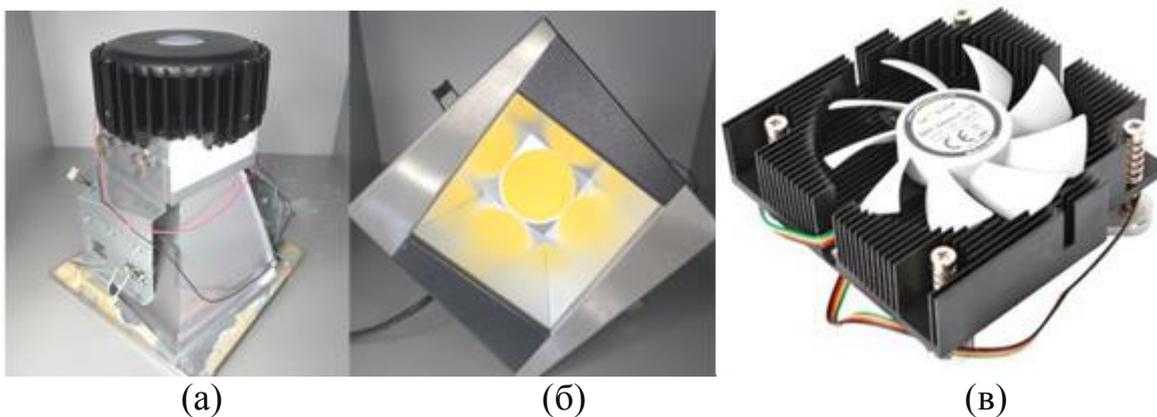


Рис. 99. Светодиодный светильник с принудительным охлаждением системой синтетических струй: охлаждающая система над светодиодным модулем (а), светодиодный модуль в светильнике с отражателем (б); принудительная система охлаждения в виде вентилятора (в).



Рис. 100. Светодиодные светильники с активной охлаждающей системой SynJet.

Активное охлаждение необходимо светильникам, мощность которых превышает 50 Вт. Источники активного охлаждения достаточно массивны, и срок их службы часто значительно меньше 50 000 ч, требуемых для светодиодов и светодиодных модулей.

Светодиоды, охлаждаемые активной охлаждающей системой SynJet производства компании Nuventix (рис. 101 и 102), стали победителями конкурса светильников следующего поколения, проведённого в 2012 г. Министерством энергетики США.

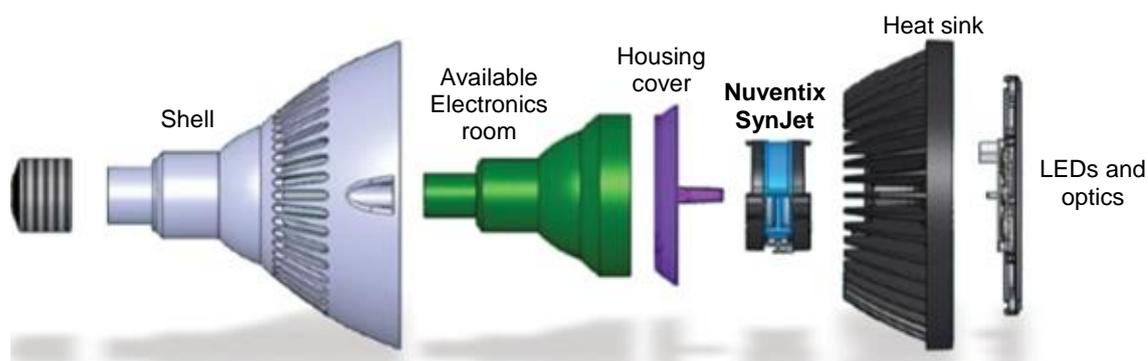


Рис. 101. Пример светодиодного устройства PAR38 с принудительной системой охлаждения SynJet.

Радиатор, в котором применяются охлаждающие струи жидкости, был использован в лампе производства компании Switch Lighting (рис. 102). Эта лампа, заменяющая лампу накаливания мощностью 75 Вт, потребляет всего 16 Вт и состоит из 10 светодиодов, дающих световой поток 1150 лм при 2750 К и CRI = 85. Она рассчитана на 18 лет службы при условии, что будет работать 3 часа в сутки.



Рис. 102. Лампа производства компании Switch Lighting, в которой используется активное охлаждение с помощью синтетических струй.

На рис. 103 представлен радиатор охлаждения высокомоощных светодиодов мощностью 50, 80 и 100 Вт производства компании Derun Lighting Technology с габаритными размерами 15×7.6×9.6 см³.



Рис. 103. Активный радиатор для охлаждения высокомоощных светодиодных источников.

3.4.2. Материалы радиаторов

Основным материалом радиаторов является металл. Однако запас металлов исчерпаем, а их стоимость с каждым годом увеличивается. Для сокращения использования металлов производители ищут новые инновационные решения. В настоящее время разрабатываются следующие материалы и конструкции.

Медь с алмазным порошком. Алмаз проводит тепло в 5 раз лучше, чем медь. Исследователи из немецкого института Fraunhofer Institute нашли способ связывать частицы алмаза с медью с помощью хрома, однако стоимость алмаза может оказаться сдерживающим фактором для использования такого материала в серийном производстве.

Трубки с теплопроводящей жидкостью. Металлические трубки, заполненные жидкостью, более эффективно отводят тепло от устройства к окружающей среде по сравнению с объёмным металлом. Этот подход позволяет оптимизировать охлаждение, делая радиатор менее габаритным и более эффективным. Неудобство заключается в усложнении конструкции — необходимости в «тепловых» трубках помимо наличия радиатора.

Керамические радиаторы могут быть изготовлены любой формы, при этом их теплопроводность сравнима с теплопроводностью меди. Они эффективны по стоимости производства и функциональны в части фиксации компонентов, способны одновременно играть роль радиатора и разъёмов для светодиодов. Главное «неудобство» подобных решений заключается в необходимости вторичных операций и полировки, а также в том, что керамики более хрупки, чем другие материалы.

Дополнительные тепловые прокладки могут размещаться между печатной платой и радиатором для улучшения передачи тепла. Тепловые

прокладки изготавливаются из гибкого графитового композиционного материала, относительно дешёвы в производстве и обладают привлекательными тепловыми характеристиками. Композиционный материал проводит тепло в плоскости (xy) лучше, чем стандартные материалы, такие как медь или алюминий, в то время как в направлении z (по толщине) они показывают сравнимую эффективность. Скорость переноса тепла вдоль оси z ограничена теплопроводностью используемых материалов. Теплопроводность алюминия $\sim 135\text{--}180$ Вт/(м·К), меди — 385 Вт/(м·К). Теплопроводность теплопроводящих прокладок, выпускаемых различными производителями в настоящее время, представлена в Таблице 13.

Таблица 13. Теплопроводящие диэлектрики ведущих мировых производителей

Производитель (торговая марка)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Arlon 92ML	2.0
Bergquist	2.2–3.0
Doosan	2.0
Denka Hit Plate	2.0–8.0
DuPont CoolLam /основа на полиимиде/	0.80
ITEQ- IT859 GTA	2.0
Laird Technology НКА	3.0
Sekisui	2.0
Polytronics	2.7
Ventec— VT 4A1	1.6

Проводящие компаунды. Термопластиковые компаунды благодаря проводящим наполнителям могут обеспечить всеобъемлющее решение для светодиодных радиаторов. Материалы сочетают в себе теплопроводность и свойства диэлектрика, и при должном подборе концентрации и типа наполнителя (керамики, такой как нитрид бора или карбографит) могут быть использованы в качестве материала для радиатора светодиодных модулей. По сравнению с ненаполненными термопластиками, теплопроводность которых составляет около 0.2 Вт/м·К, теплопроводящие пластиковые компаунды имеют теплопроводность $1\text{--}10$ Вт/(м·К), а в некоторых случаях она может достигать до 100 Вт/(м·К). При этом, по сравнению с алюминием и другими металлами, теплопроводящие компаунды имеют более низкий коэффициент термического расширения. Они также значительно легче алюминия.

Многие типы термопластиков, включая кристаллические и аморфные материалы, могут быть использованы в качестве матриц. Этот материал имеет огромную гибкость, позволяя проектировщикам создавать интегрированные изделия сложной формы. Вместо традиционных

штамповки, литья и вторичных финишных обработок, требующихся для металлов, для производства радиаторов из термопластиков применяется литье под давлением. Термопластики открывают возможности для новых конструкторских решений, нацеленных на оптимизацию теплового управления в светодиодном светильнике.



Рис. 104. Применение белого термопластика в качестве радиатора светодиодных ламп мощностью 1.8 Вт производства компании Leedardson Lighting.

Компания SABIC Innovation plastic разработала новый вид специального белого термопластичного компаунда LNPKonduit для применения в светодиодных лампах белого света и в светодиодных конструкциях, пользующихся особым спросом у пользователей. Компания Leedardson Lighting, основанная в г. Сямэнь (Xiamen), Китай, которая является производителем и экспортёром осветительной техники, первой стала применять белый компаунд LNPKonduit для радиаторов в светодиодных лампах (рис. 104).

Теплопроводность компаунда LNPKonduit составляет 10 Вт/(м·К), он выдерживает стандартный промышленный тест на пробой 6 кВ, огнестоек и обладает стабильностью цвета.

В качестве материала радиатора может быть выбран **поликарбонат с соответствующими добавками**, значительно повышающими его теплопроводность. Конструкции такого радиатора могут иметь самую разнообразную форму, отличающуюся от традиционной более сложной геометрией благодаря свойствам пластичности, вязкости и текучести поликарбоната при изготовлении. Поликарбонат значительно превосходит алюминий по множеству технических решений и при этом обладает таким важным для изделий электрики свойством, как стойкость к

воспламенению. Литье под давлением — основной метод изготовления изделий из поликарбоната, предоставляющий широкие возможности для конструктивных решений. В феврале 2012 г. компания Bayer Material Science представила светодиодную лампу, замещающую традиционную лампу PAR30 и оснащённую линзой и радиатором, изготовленным из поликарбоната. Используемый в радиаторе этой лампы поликарбонат TC8060 обладает теплопроводностью 22 Вт/(м·К).

Использование технологий ускоренного отвода тепла (150–385 Вт/(м·К)) от светодиода к окружающей среде позволит значительно понизить температуру активной области, что, в свою очередь, означает увеличение срока службы светодиода и возможность его работы при более высокой мощности. Таким образом, можно увеличить световой поток или уменьшить количество светодиодов в светильнике, получая при этом такое же количество света. Заметим, что меньшее количество компонентов снижает материалоемкость.

Структура печатной платы на металлическом основании представлена на рис. 105. В Таблице 14 приведены основные характеристики материалов, используемых для производства светодиодных модулей.

Таблица 14. Основные характеристики материалов, используемых для производства основы светодиодного модуля

Подложка	Теплопроводность, Вт/(м·К)	КТР, 10^{-6} К ⁻¹	Комментарии
Printed Circuit Board	0.36	13–17	возможно изготовление плат большого размера
Metal Core PCB	1–2.2	17–23	возможно изготовление плат большого размера; температура операций — до 140 °С
Керамика Al ₂ O ₃ /AlN	24–170	4.9–8	подложки малого размера; очень высокие температуры операций; легко выдерживает высокую мощность
Direct Bonded Copper	24–170	5.3–7.5	высокие температуры операций (до 800 °С); легко выдерживает высокие мощность и ток
Медная выводная рамка (<i>lead frame</i>)	170	8	различие в КТР между AlN и Cu: 4.6 против 8

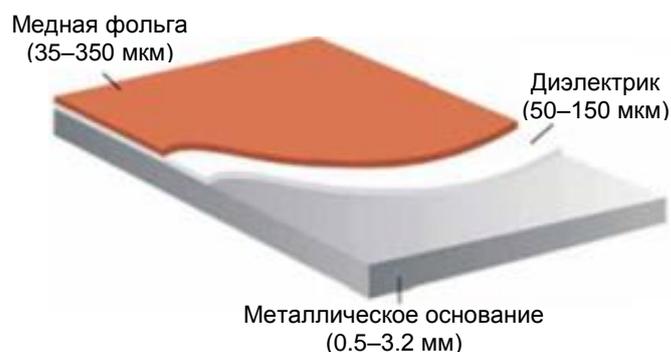


Рис. 105. Структура печатной платы на металлическом основании.

Для светодиодных печатных плат часто применяют следующие толщины слоев:

- * 1–1.5 мм — металлическое основание;
- * 100 мкм — диэлектрик;
- * 35 мкм — медная фольга.

В качестве диэлектрика используются препреги (от англ. pre-preg, сокр. от pre-impregnated — предварительно пропитанный) FR4 на основе стеклоткани и эпоксидной смолы с различными теплопроводящими наполнителями, теплопроводящие композитные материалы, а также полиимид.

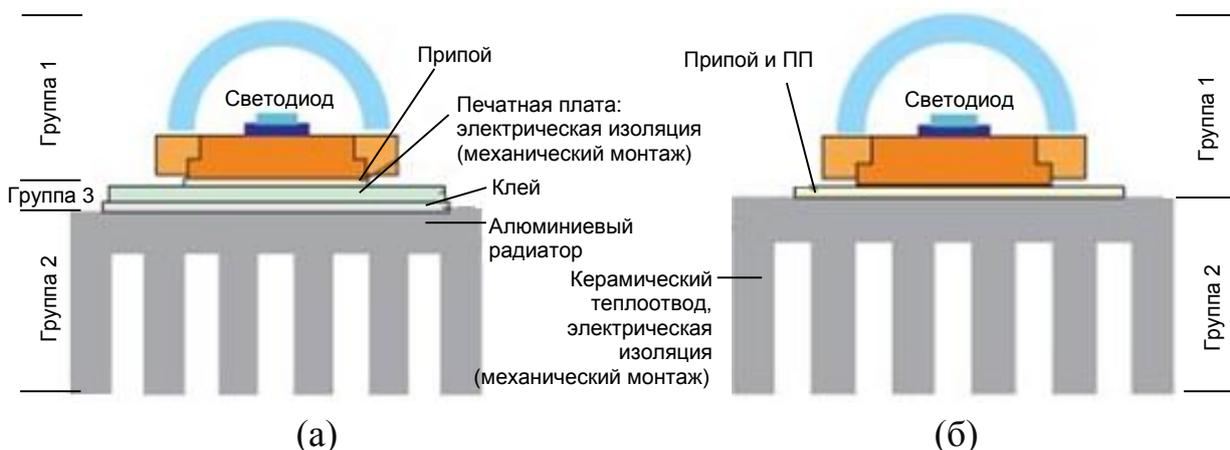


Рис. 106. Слои материалов светодиодного светильника, через которые идёт перенос тепла от светодиода к радиатору: в случае использования радиатора из металла (а) и радиатора из керамики (б) [45].

Чтобы устранить излишний путь для переноса тепла от светодиода к радиатору (группа 3 на рис. 106, стандартное решение), некоторые производители устанавливают светодиоды на керамический радиатор (StramCool), на который нанесены токоведущие дорожки (рис. 107).



Рис. 107. Монтаж светодиодов непосредственно на материал радиатора CeramCool.

Исследование распределения тепла по поверхности чипа, печатной платы и радиатора можно проводить путём моделирования и визуализации в реальном масштабе времени при помощи инфракрасной камеры или тепловизора. На этапе проектирования светотехнического устройства необходимо моделирование распределения тепла по структуре устройства.

3.4.3. Моделирование процессов теплопереноса

На этапе разработки светодиода и, что особенно важно, светодиодного светильника, обязательно проводится моделирование тепловых процессов, учитывающих теплоперенос и конвекцию. Это позволяет:

- ❖ разработать правильную с точки зрения растекания тепла конструкцию;
- ❖ уменьшить стоимость прототипа;
- ❖ увеличить надёжность и качество продукта;
- ❖ определить критические области в конструкции;
- ❖ организовать тепловой режим изделия.

На рис. 108 представлены результаты моделирование процессов теплопереноса в светодиодных светильниках.

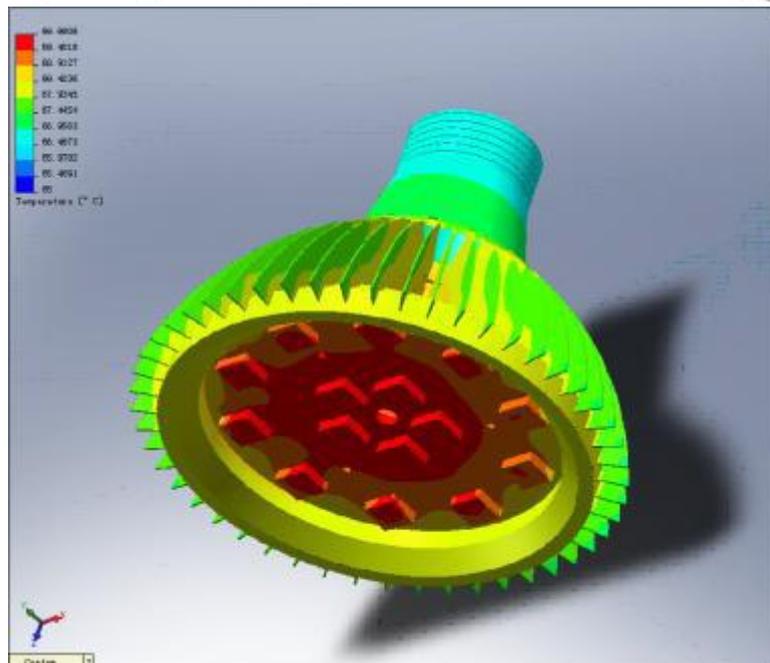
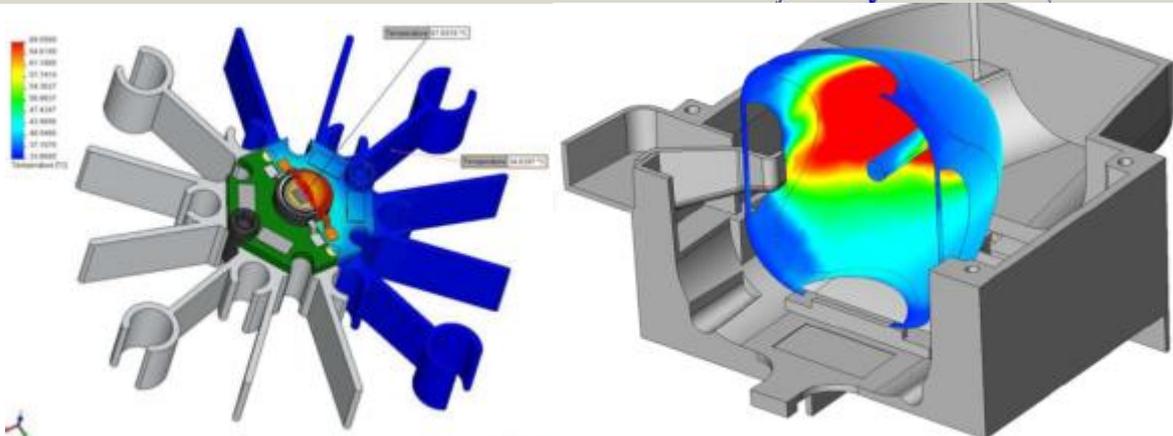
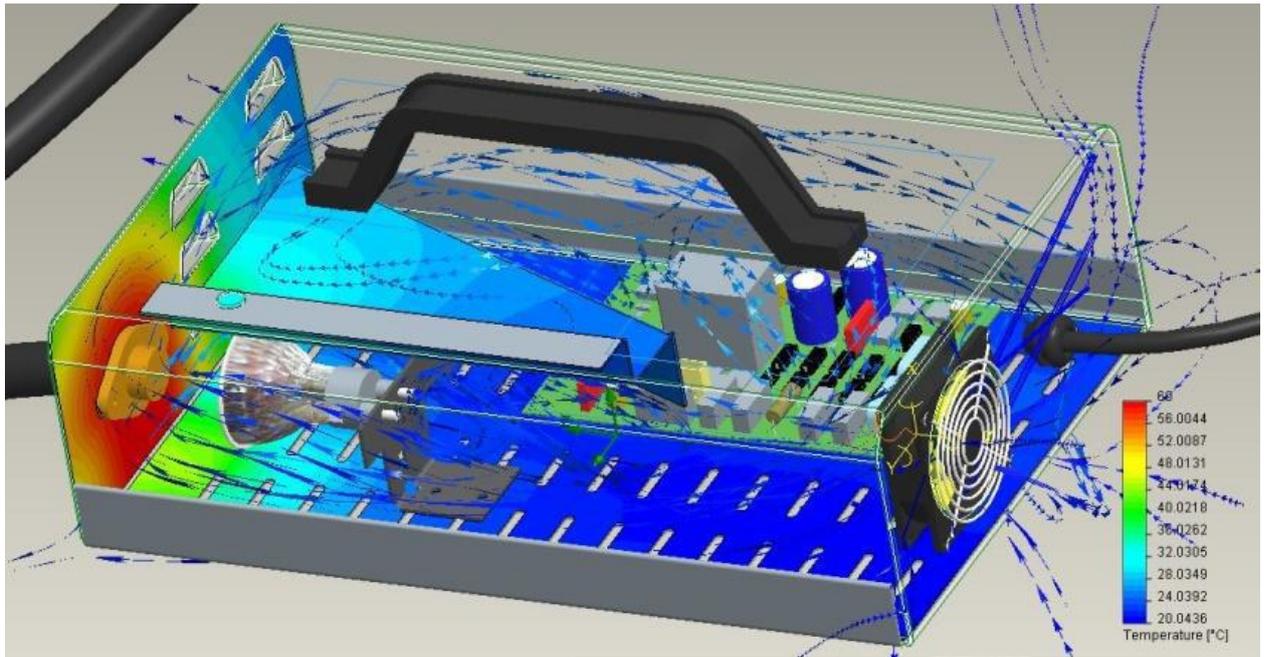


Рис. 108. Моделирование теплопереноса в светодиодных светильниках является неотъемлемой частью их разработки.

3.5. Стандарты для производителей светодиодных светильников и их компонентов

3.5.1. Технические характеристики светильников

Для разработки и производства качественного продукта твердотельного освещения важна достоверная информация о свойствах компонентов будущего светильника. В случае, если измерения характеристик компонентов, составляющих светильник, производились при условиях, близких к адиабатическим, то есть были получены за короткий временной интервал при отсутствии заметного изменения температуры светодиодного чипа в течение процесса измерения, эти данные будут, в общем, слишком оптимистичными и могут значительно отличаться от характеристик устройства в рабочем режиме. Именно поэтому полновесные и достоверные технические данные, включающие сведения об изменениях свойств и характеристик с увеличением температуры и времени эксплуатации, должны быть отражены в спецификациях на светодиодные и другие компоненты. Однако ясно, что этой информации недостаточно для описания свойств конечного продукта. Самым распространённым способом введения в заблуждение пользователя является указание лишь производительности устройства без объяснения влияния драйвера и устройства светильника.

Производителей светодиодных светильников обязуют предоставлять основной минимум технических характеристик, который точно отражает производительность продуктов. Этот минимум содержит следующие показатели:

Световая отдача светильника (*luminaire efficacy*)

Характеризует количество света, измеренное в люменах, полученное с одного Ватта потребляемой мощности. Измеренная световая отдача светильника объединяет *световую отдачу системы источника света и эффективность использования светоизлучающих компонентов в светильнике.*

Эффективность использования в светильнике светодиодов рассчитывается как отношение светового потока со всего светильника к суммарному световому потоку каждого излучающего элемента светильника и выражается в процентах; в лучшем случае она составляет 80–85%.

Световая отдача светильника учитывает потери в драйвере, потери, возникающие за счет тепловых процессов, и потери света в оптической системе светильника.

Световой поток (*light output of the luminaire*)

Определяется как полный световой поток, измеренный с помощью гониофотометра или сферического интегратора со всего светильника с представлением результатов в абсолютных фотометрических единицах.

Характеристика должна измеряться в рабочем режиме светодиодного светильника. Обычно световой поток измеряют через 20 минут от начала работы изделия на постоянном токе. В этом случае полученные результаты учитывают влияние характеристик светодиодов, корпуса, креплений, оптики и организацию теплового управления.

Входная мощность (*input power*)

Является полной мощностью потребления светильником и измеряется в ваттах. Полная мощность определяется в рабочем режиме устройства.

Коррелированная цветовая температура (*correlated color temperature, CCT*)

Определяется сразу для всего светильника в сферическом интеграторе. В случае, если данные о CCT для всего светильника не предоставлены, они обязательно должны быть указаны для единичных светодиодов с пометкой об отношении значения данной величины к составляющим светильник источникам света. Значение CCT отдельных светодиодов и светильника могут отличаться из-за влияния рабочего тока и температуры на коррелированную цветовую температуру светодиодов. Также может сказаться влияние отражающей поверхности светильника, окружающей светодиода, полупрозрачного корпуса, присутствия в массиве светодиодов, отличающихся между собой по цвету.

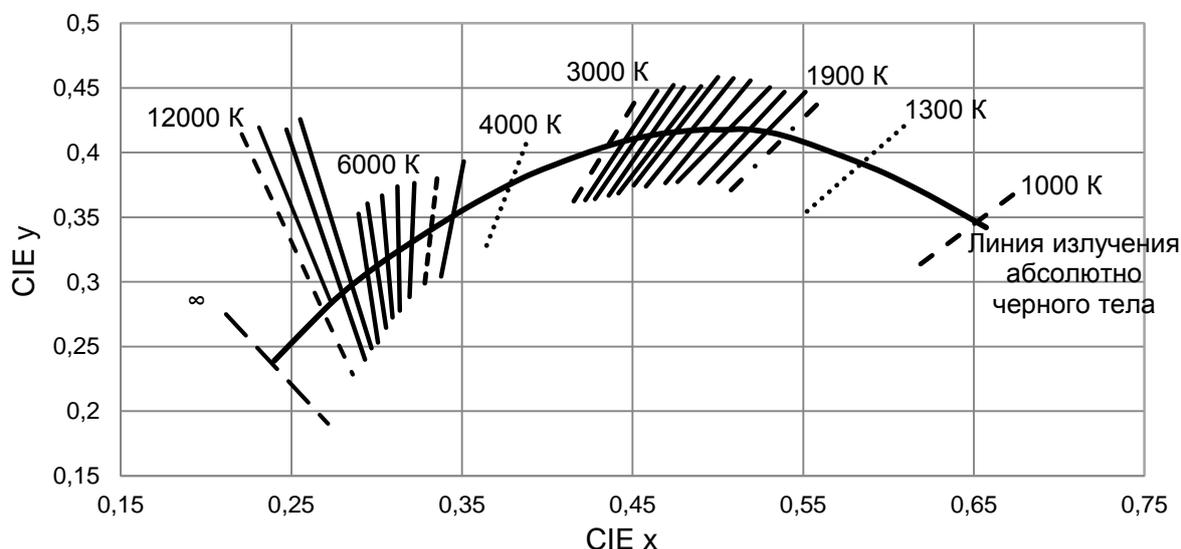


Рис. 109. График для определения цветовой температуры по изотемпературным линиям.

Желательно указывать значения координат цветности x , y по диаграмме цветности CIE, принятой Международной Комиссией по Освещению (International Commission on Illumination) в 1931 г., поскольку указание только CCT представляет достаточно широкий разброс по

координатам цветности и затрудняет сравнение светильников (см. рис. 109).

Индекс цветопередачи (*color rendering index*)

Должен измеряться при помощи стандартного метода измерения индекса цветопередачи, например, методом контрольных цветов, описанном в ГОСТ 23198-94 «Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик». Как и другие характеристики, этот параметр должен измеряться в рабочем режиме светильника, чтобы предсказывать возможное влияние температуры или особенностей монтажа светильника на качество излучения.

Дополнительные характеристики

Данные о надёжности устройства, техническая информация о составляющих устройство компонентах и составе изделия может быть приведена производителем дополнительно. Все эти параметры необходимы для разумного сравнения существующих продуктов твердотельного освещения и оптимального выбора между ними.

3.5.2. Стандарты, действующие на территории Российской Федерации

В Российской Федерации в 2013 г. планируется ввести в действие следующие разработанные стандарты, относящиеся к светодиодам и светодиодным светильникам:

1. Модули светодиодные для общего освещения. Эксплуатационные требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МЭК/PAS 62717(2011).
2. Лампы светодиодные с цоколем без встроенного устройства управления. Часть 1. Требования безопасности. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение проекта 34А/1399/CD (2010-07) МЭК 62663-1.
3. Лампы светодиодные с цоколем без встроенного устройства управления. Часть 2. Эксплуатационные требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение проекта 34/А/1353/NP (2009-06) МЭК 62663-2.
4. Светодиоды. Часть 1. Общие требования к бинированию и сетка координат цветности для белых светодиодов. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение стандарта МЭК/ PAS 62707-1 (2011) изд.2.
5. Источники света электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик (Взамен ГОСТ 23198-94 на территории РФ).
6. Источники света электрические. Методы измерения световых и электрических параметров. (Взамен ГОСТ 17616-82 на территории РФ).

В 2013 г. планируется разработать и ввести в действие следующие стандарты:

1. Светильники. Определение кодов ИК МЭК 62262. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МЭК/TR 62696 (2011). Примечание. Стандарт охватывает вопросы использования энергоэффективных источников света и осветительных приборов, в том числе и на основе светодиодов.

2. Установки аварийного освещения. Светотехнические требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением EN 1838:1999.
3. Установки утилитарного наружного освещения дорог и туннелей. Методы фотометрических измерений. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением МКО 194:2011.
4. Установки аварийного освещения в туннелях. Светотехнические требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением МКО 193:2010.
5. Установки внутреннего освещения. Методы расчёта показателя дискомфорта UGR и представление данных. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением МКО 190:2010.
6. Установки освещения дорог и пешеходных зон. Светотехнические требования. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением МКО 115:2010.
7. Установки осветительные. Термины и определения. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением EN 12665:2011.
8. Источники света и приборы осветительные. Часть 1. Методы светотехнических измерений и формат представления данных. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением EN 13032-1:2004/АС:2005.
9. Источники света и приборы осветительные. Часть 2. Формат представления данных для освещения рабочих мест. Разработка ГОСТ Р. Прямое применение МС с дополнением EN 13032-2:2004/АС:2007.

3.5.3. Организации, занятые разработкой стандартов на твердотельные источники освещения

Департамент энергетики США (*DOE, USA*) выпустил документ, содержащий требования к тестированию выпускаемых на рынок светодиодного освещения продуктов — *Commercial Product Testing Program*. Этот документ был разработан в рамках Проекта по твердотельному освещению (*Solid-State Lighting Project*) [46].

ENERGY STAR является международной организацией, действия которой направлены на разработку стандартов для энергоэффективных электронных компонентов и оборудования. Эта организация была образована Независимым агентством по охране окружающей среды (*Environmental Protection Agency*) в 1992 г. с целью продвижения эффективных устройств, способствующих меньшему производству углекислого газа. На данный момент она признана несколькими странами, включая Канаду, Японию, Тайвань, Австралию, Новую Зеландию, Евросоюз и др. [47].

Светотехническое общество Северной Америки (*IESNA — Illuminating Engineering Society of North America*) занимается разработкой стандартов и образованием в сфере светодиодного освещения совместно с

Американским национальным институтом стандартов (*ANSI — American National Standards Institute*).

Международная комиссия по освещению (*CIE — International Commission On Illumination*) занимается разработкой стандартов по 7 направлениям:

1. Цвет и восприятие цвета (*Vision and Colour*).
2. Измерения света и излучения (*Measurement of Light and Radiation*).
3. Освещение внутри помещений (*Interior Environment and Lighting Design*).
4. Уличное и другие виды освещения (*Exterior Lighting and Other Applications*).
5. Фотобиология и фотохимия (*Photobiology and Photochemistry*).
6. Технология изображения (*Image Technology*).

Приведём некоторые стандарты, принятые для проведения измерений источников твердотельного света. Измерения светильников в США и в других странах проводятся согласно принятому стандарту IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*) Standard LM-79-2008 “Approved Method for the Electrical and Photometric Testing of Solid-State Lighting Devices”. Этот стандарт использует абсолютную фотометрию. IESNA LM-80-2008, “Approved Method for Measuring Lumen Depreciation of LED Light Sources”. Для определения координат цветности и коррелированной цветовой температуры применяется стандарт ANSI (*American National Standards Institute*) C78.377-2008, “Specifications for the Chromaticity of Solid-State Lighting Products”; в ближайшем будущем планируется выпуск уточнений для лучшего понимания производителями светильников результатов измерений характеристик светодиодов применительно к их использованию в устройствах светотехники. Для оценки источника питания одним из стандартов ANSI является C82.SSL1 “Power Supply”, который даёт представление об оцениваемых характеристиках и электрической безопасности источников питания и драйверов к твердотельным источникам света. Стандарт ANSI C82.77-2002 “Harmonic Emission Limits – Related power quality requirements for lighting” ограничивает уровень пульсаций источников света.

РАЗДЕЛ 4. Управляющая электроника. Интеллектуальное освещение

4.1. Управляющая электроника. Требования, предъявляемые к источникам питания

4.2. Электроника светодиода

4.3. Интеллектуальное освещение. Аналоговое и цифровое управление

4.1. Управляющая электроника. Требования, предъявляемые к источникам питания

4.1.1. Источник питания к светодиодному источнику света

На практике падение напряжения на светодиоде синего цвета свечения является небольшим и составляет 3–4 В. При этом работа светодиода обеспечивается постоянным электрическим током в 20–350 мА в зависимости от размера чипа. Это обстоятельство лишает возможности подключить светодиод напрямую к розетке электропитающей сети бытового назначения с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Устройство, при помощи которого можно подсоединять светодиодный излучатель, рассчитанный на потребление постоянного тока, к сети переменного тока, называется источником питания. В литературе источник питания для светодиодного источника света обычно называют «драйвером». Это англицизм от *driver* — *двигатель, задающее устройство*, и в дальнейшем мы будем использовать этот термин для сокращения количества слов. Заметим, что для драйвера существуют и другие названия: электронный балласт (*electronic ballast*), электронный регулятор (*electronic control gear, ECG*), источник питания светодиодов (*LED source*).

При подключении драйвера к сети переменного напряжения он преобразует переменное напряжение в постоянное, уменьшая при этом ток до рабочего уровня. Драйвер может совершать и другую конвертацию сигнала в зависимости от цели его применения.

Современные «умные» светильники (*smart luminary*) представляют собой систему устройств, которые позволяют изменять уровень светового потока, уменьшая или увеличивая его, имеют датчики перегрева, присутствия и освещённости. Такие светильники оснащены пультом управления и дают возможность управлять характеристиками светильника дистанционно. Для изготовления умного светильника помимо драйвера применяются системы управления. Одним из наиболее распространённых каналов коммуникации между управляемыми элементами является цифровой канал DALI — Digital Addressable Lighting Interface.

На рис. 110 для сравнения приведены принципиальные схемы электрической цепи питания лампы накаливания, люминесцентной лампы и светодиодной лампы.

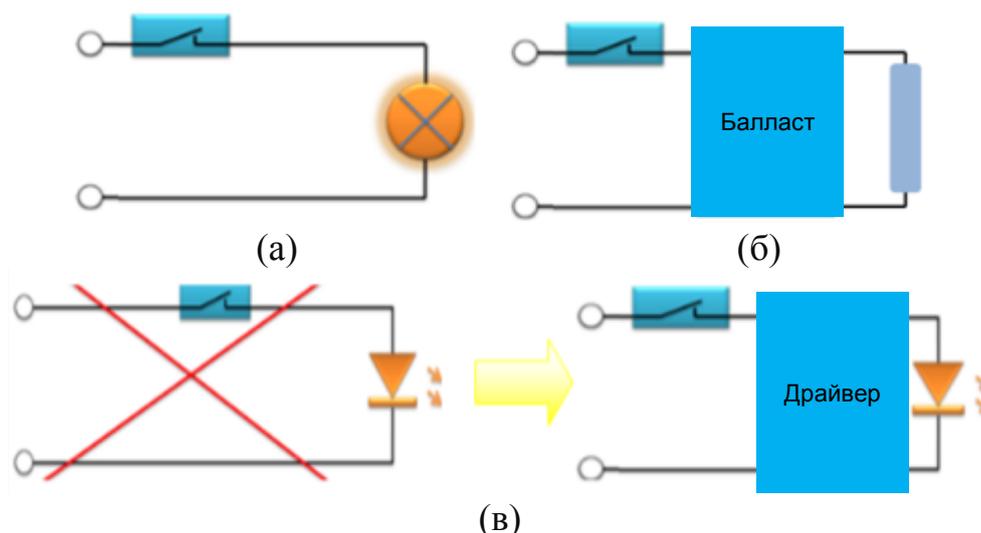


Рис. 110. Принципиальная схема электрической цепи питания для трёх видов ламп: лампы накаливания (а), люминесцентной лампы (б), светодиодной лампы (в).

Лампа накаливания — это электрический источник света, в котором тело накала нагревается до высокой температуры за счёт протекания через него электрического тока. В результате нить накала излучает видимый свет. Такие лампы имеют низкую эффективность преобразования потребляемого излучения в видимый свет, то есть низкую световую эффективность, всего лишь 14 лм/Вт. Дело в том, что большая часть спектра излучения лампы накаливания приходится на инфракрасную область, где глаз человека уже не воспринимает излучение. Этим объясняется и нагрев предметов, подвергающихся облучению лампы накаливания. Однако такие лампы могут использоваться в очень простых цепях, содержащих обычные диммеры, позволяющие регулировать яркость света (например, тиристорный диммер), и не требуют никакого дополнительного преобразователя для получения рабочих электрических характеристик.

Люминесцентные лампы более энергоэффективны, чем лампы накаливания. Принцип работы люминесцентных ламп сложнее, хотя требует источника «зажигания» и драйвера. Важным компонентом люминесцентной лампы является балласт. Конструкция балласта варьируется в зависимости от типа входного напряжения (переменного или постоянного), значения входного напряжения, длины трубки лампы, целевой стоимости и от других факторов. Сложность схемы балласта создаёт определённые трудности для конструирования изделия: снижение коэффициента мощности, слышимый шум. Решения вышеупомянутых проблем достигаются стандартными способами.

Светодиодные лампы эффективнее, чем люминесцентные лампы. Однако для них требуются специальные источники питания, которые должны быть разработаны под конкретную сферу применения

светодиодного светильника. При разработке электроники необходимо учитывать повышенную чувствительность всей цепи к изменениям линейного напряжения, возможные неисправности светодиодов, износ, а также чувствительность светодиодов к изменению температуры. Светодиодные светильники — относительно новый продукт на рынке освещения, и светодиодные изделия сейчас активно стандартизуются. Поскольку для каждой области применения светодиодного источника света требуется определённая конструкция светодиодного модуля, разрабатываются и различные конструкции драйверов.

При приложении к светодиоду достаточного значения прямого напряжения, так называемого порогового напряжения, светодиод начнёт пропускать электрический ток, и в активной области светодиода начнут происходить процессы рекомбинации, приводящие к появлению излучения. Если не ограничивать подаваемые на светодиод напряжение и ток, то через светодиод начнёт проходить достаточно большой ток, но при этом падение напряжения на светодиоде изменится незначительно (см. ВАХ на рис. 14). Неограниченное значение тока, протекающего через светодиод, приведёт в конечном итоге к тепловому пробоему светодиодного чипа, не говоря уже о катастрофических изменениях в других конструктивных элементах корпуса и оптической системы светодиода. Именно поэтому светодиодному источнику света требуется определённое, точно рассчитанное количество электрической энергии, поддерживающее его в рабочем режиме. Схемы управления током, протекающим через светодиод, приведены на рис. 111.

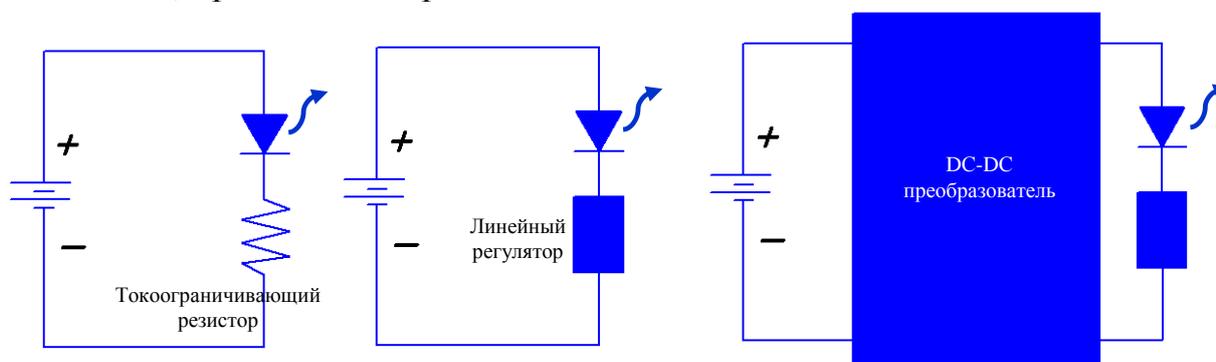


Рис. 111. Схемы подключения простых регуляторов тока к светодиоду.

Светодиод или цепь последовательно соединённых светодиодов могут быть подключены к источнику питания, если токоограничивающий резистор или регулятор линейного тока последовательно подключён к светодиоду. Резистор и регулятор ограничивают прямой ток в цепи до безопасного предела. Резистор представляет собой простейшую форму светодиодного драйвера, применяемого для простых сфер применения, но он малоэффективен и не может контролировать ток с той же точностью, как линейный регулятор или более сложный драйвер.

Токоограничивающий резистор также иногда называют балластным или подтягивающим резистором.

Драйвер светодиода — это электрическая часть светодиодного изделия, за исключением светодиодов, функция которой состоит в создании определённых, необходимых светодиодному модулю, электрических характеристик в (или вне) зависимости от условий подачи электрического питания сторонним источником. От конструктивного исполнения драйвера зависит производительность, в том числе эффективность, срок службы, качество света и общая стоимость светодиодного светильника. В конечном изделии твердотельного освещения светоизлучающие диоды и конструкция драйвера неразделимы.

Тема электроники светодиодных драйверов чрезвычайно сложна. Сложность возникает из-за различных сфер применения светодиодов: требования к изделию, разрабатываемому с конкретной целью, приводят к появлению различных конструкторских решений. В большинстве конструкций светодиодных драйверов используется принцип стабилизации постоянного тока, который относительно плохо знаком большинству конструкторов, потому что в люминесцентных лампах используются стандартизированные электронные балласты, в то время как в лампах накаливания вообще не применяются драйверы. Другими ключевыми принципами для разработки светодиодных драйверов являются:

- осуществление связи между источниками переменного тока и источниками постоянного тока;
- преобразование напряжения в понижающее (*buck*), повышающее (*boost*) или понижающе-повышающие (*buck-boost*);
- наличие регулятора тока (контроллеры с дискретными регуляторами вместо микросхем с интегрированными регуляторами);
- производство высоковольтных интегрированных микросхем (ИМ);
- способ соединения светодиодов: последовательное или параллельное;
- линейный режим работы вместо ключевого (преобразование напряжения и яркости);
- встроенные функции управления и связи;
- новые конструкции, такие как светодиоды, работающие на переменном токе (*AC-LED*) и цифровое управление;
- сфера применения светодиодного светильника.

Интегрированные микросхемы (ИМ) светодиодных драйверов — это ИМ с функциями, включающими в себя преобразование напряжения, регулирование тока или обе названные функции. Некоторые ИМ драйверов светодиодов включают в себя одну или несколько микросхем драйверов, в то время как другие не имеют ни одной. ИМ светодиодных драйверов активно развиваются в соответствии с появлением новых сфер применения светодиодных светильников.

Модуль светодиодного драйвера включает в себя всю электронику драйвера. Модуль выполняется в отдельном корпусе. В него могут быть включены ИМ драйвера, а также компоненты для выпрямления переменного тока и другие элементы. Модуль светодиодного драйвера является эквивалентом балласта в устройстве светильника на основе люминесцентных ламп.

4.1.2. Виды источников питания

Светодиоды эффективно работают в режиме постоянного тока (*direct current, DC*), и почти все светодиодные решения на сегодняшний день используют такой режим. Однако сам источник тока может обеспечить питание в режиме постоянного или переменного тока (*alternative current, AC*). Устройства, рассчитанные на потребление постоянного тока и вынужденные работать с внешним источником питания переменного тока, работают по следующему принципу: первый этап — преобразование переменного тока в постоянный, второй этап — регулирование постоянного тока. В Таблице 15 приведены применения источников питания постоянного и переменного тока в различных применениях.

Таблица 15. Виды источников питания светодиодных устройств

Устройство	Вид источника питания		Комментарии и исключения
	DC	AC	
Мобильные телефоны, портативные дисплеи	X		Обычно источник питания — литиевые элементы
ТВ и мониторы		X	Работают от внешнего источника постоянного тока
Дисплеи больших размеров	X	X	
Светильники общего освещения		X	Источники постоянного тока включают в себя приборы, работающие от солнечных батарей и переносные приборы. Светодиоды AC-LED работают напрямую от приложенного переменного напряжения
Габаритные огни и другие световые приборы для транспортных средств	X		Работают от автомобильного аккумулятора
Информационные знаки		X	Работают от внешнего источника постоянного тока

Устройство	Вид источника питания		Комментарии и исключения
	DC	AC	
Сигнальные приборы		X	Некоторые портативные сигнальные приборы работают на батарейках

При минимальной комплектации драйвер включает в себя токоограничивающий резистор и защитный диод. При максимальной комплектации он может включать в себя многоступенчатый блок питания AC-DC, который должен отвечать строгим требованиям по экологии, эффективности, безопасности и другим в соответствии со стандартами.

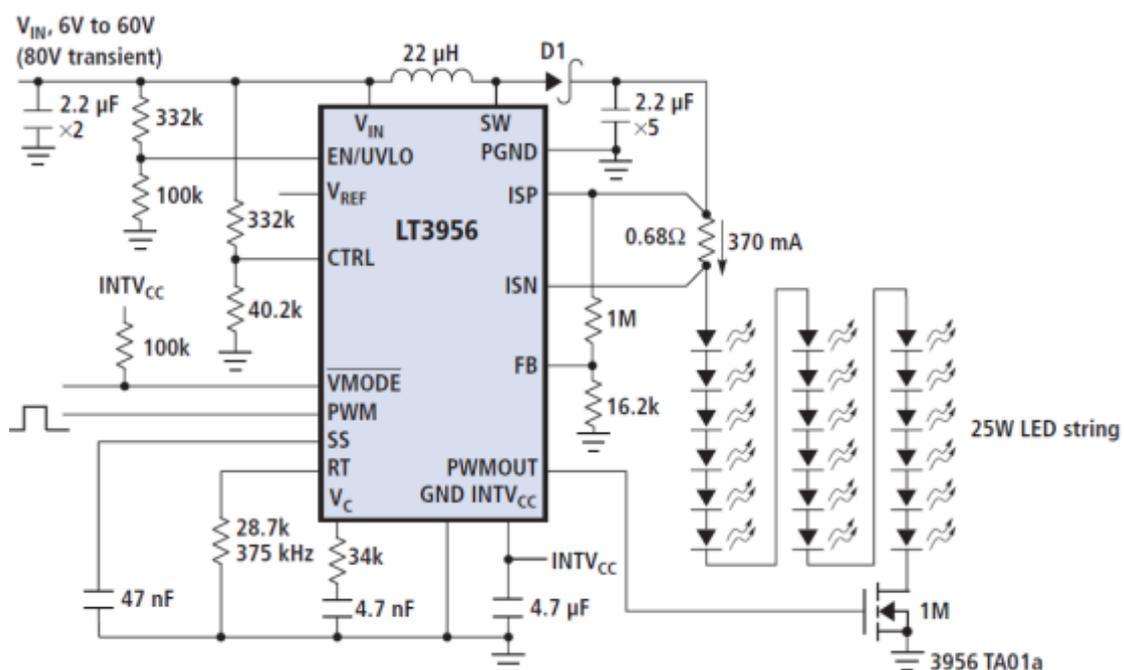


Рис. 112. Схема элементов в светодиодном драйвере с эффективностью 94%, который используется для питания автомобильной фары мощностью 25 Вт [13].

На рис. 112 представлена схема реального источника питания светодиодной автомобильной фары.

В зависимости от типа выходного сигнала драйверы подразделяются на три группы:

- **драйвер постоянного тока** (*constant current, CC*). Используется для питания светодиодов, соединённых последовательно в цепь. Драйвер обеспечивает эту линию точным значением тока. Такой вид драйвера используется для регулирования уровня светового потока, то есть позволяет производить диммирование (*dimming*);

- **драйвер постоянного напряжения** (*constant voltage, CV*). Используется для питания светодиодов, соединённых параллельно. Такая конструкция часто используется в декоративном освещении, когда светодиоды соединены «в линию». При этом можно соединять разное количество светодиодов. Для регулирования светового потока такой вид драйвера не рекомендуется.
- **драйвер смешанного вида** (*special, CC+CV*). Такой драйвер даёт возможность поддерживать рабочие электрические характеристики и в последовательных, и в параллельных системах соединений светодиодов, но представляет собой достаточно дорогое решение.

4.1.3. Требования, предъявляемые к источникам питания

Высокое напряжение пробоя

Данное требование обусловлено высоким значением напряжения электропитающей сети бытового назначения. В России такие сети работают при напряжении 220 или 380 В с частотой 50 Гц, в Европе — при напряжении 230/400В с частотой 50 Гц (в частности, в Италии и Испании — при напряжении 240 или 420 В с частотой 50 Гц), в США — при напряжении 120 В с частотой 60 Гц.

Источник питания прибора может вызвать высоковольтные скачки напряжения, которые превышают средний уровень сигнала в несколько раз. Подобные скачки могут привести к повреждению элементов питания, не говоря уже об остальных элементах устройства. Чтобы источник питания был устойчивым к таким скачкам напряжения, некоторые из компонентов источника питания должны выдерживать напряжение пробоя в 660 или даже в 1200 В.

Требования к электрической прочности изоляции.

Изолированные и неизолированные источники питания

Самый простой, компактный, эффективный и рентабельный источник питания не имеет изоляции между питающей сетью и светодиодами. В высоковольтных конвертерах, однако, это представляет возможную угрозу безопасности при выходе из строя одного из компонентов.

Для устранения подобной угрозы применяется электрическая изоляция с использованием гальванических или оптических изоляторов. Однако выход из строя оптического изолятора является довольно частой проблемой драйверов, которая снижает надёжность светодиодного прибора.

По способу защиты оборудования от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции, электротехническое и электронное оборудование делится на 4 класса. Рассмотрим те из них, которые чаще изготавливаются.

Источники питания 1 класса. Защита от поражения электрическим током в таких устройствах обеспечивается основной изоляцией и

соединением открытых проводящих частей, доступных прикосновению, с защитным проводником стационарной проводки. В этом случае открытые проводящие части, доступные прикосновению, не могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции после срабатывания соответствующей защиты. Подробнее с характеристиками таких устройств можно ознакомиться в соответствующем ГОСТ-е и в стандарте Лаборатории по технике безопасности США (Underwriters Laboratories Inc., UL), специально доработанных для применения драйверов в системах общего освещения.

Источники питания 2 класса. Защита от поражения электрическим током в таких устройствах обеспечивается применением двойной или усиленной изоляции. В оборудовании 2 класса отсутствуют средства защитного заземления, и защитные свойства окружающей среды не используются в качестве меры обеспечения безопасности. Класс 2 источника питания (стандарт UL 1310) означает, что источник питания имеет напряжение разомкнутой цепи менее 42.4 В, максимальный переменный ток 30 А, максимальный постоянный ток 60 А, ограничение тока под нагрузкой или защиту от тока короткого замыкания.

Другие классы источников питания. Другие типы источников питания соответствуют более жёстким требованиям безопасности. Требования к ним описаны в стандарте UL 1012.

Требования регулирования напряжения и тока

Светодиодный драйвер может управлять напряжением и током светодиодной нагрузки. В некоторых случаях напряжение, подключаемое к драйверу, согласовано и не нуждается в специальном регулировании. В других случаях напряжение должно быть увеличено или уменьшено с использованием повышающего, понижающего или повышающе-понижающего преобразователя — конвертера.

В некоторых случаях конвертер обеспечивает только постоянное напряжение для светодиодной нагрузки, независимо от регулятора тока. На рис. 113 показан DC-DC преобразователь, который не зависит от регулятора тока.



Рис. 113. DC-DC преобразователь, который не зависит от регулятора тока.

Требования к электромагнитной совместимости.

Электрический сигнал драйвера не должен вносить помехи в общую цепь питания, а также формировать вокруг себя электрическое поле. Различают требования к электромагнитной совместимости источников питания для медицинских устройств и устройств промышленного и универсального применения. Специальные требования к безопасности медицинских электрических изделий регламентированы международными стандартами. В большинстве стран, включая страны Европы и Северную Америку, действуют стандарты серии IEC 60601. В России действуют ГОСТ Р50267.0-92 «Изделия медицинские электрические. Часть I. Общие требования безопасности» и ГОСТ Р50267.0.2-95 «Изделия медицинские электрические. Часть I. Общие требования безопасности. 2. Электромагнитная совместимость. Требования и методы испытаний».

4.1.4. Основные элементы источника питания

На рис. 114 приведены основные функциональные узлы структуры источника питания для светодиодного источника света. На рисунке показаны выпрямительный мост AC-DC (диодный мост), фильтр электромагнитных помех, корректор коэффициента мощности, изоляция DC-DC и сам драйвер DC-DC, включающий схему управления. Тем не менее, это всего лишь один из способов преобразования, вариантов которых — множество.



Рис. 114. Функциональная диаграмма устройства питания светодиодного источника света.

Во многих конструкциях совмещаются конвертер напряжения и контроллер постоянного тока. При таком конструктивном исполнении ИМ драйвера могут не использоваться (используются только дискретные компоненты), или используется одна ИМ драйвера (для преобразования напряжения, регулирования тока или для обеих целей), или две ИМ драйвера (одна для преобразования напряжения, а вторая для регулирования тока).

4.1.5. Понижающие и повышающие преобразователи

Драйвер светодиодов является связующим элементом между питающей сетью и светодиодной нагрузкой. Одна из задач цепи драйвера состоит в том, чтобы преобразовать постоянное напряжение источника

питания до уровня, предусмотренного конфигурацией светодиодов. В зависимости от конструкции уровень напряжения необходимо повысить или понизить.

Понижающий преобразователь. Преобразует входное напряжение в меньшее стабилизируемое напряжение. Это самая частая ситуация для светодиодов. Простые понижающие конвертеры состоят из балластного резистора, линейного регулятора и импульсного преобразователя. Понижающий конвертер желательно использовать везде, где это возможно. Он обладает высокой эффективностью. Его отличает малое количество компонентов, высокая надёжность и экономичность, а также простота конфигурации. Понижающий преобразователь не может обеспечить *более высокое* напряжение для длинной цепочки последовательно подключённых светодиодов.

Повышающий преобразователь. Преобразует входное напряжение в большее стабилизируемое напряжение. Этот процесс обычно требует использования диода для пополнения заряда в конденсаторе на выходе и ёмкостного или индуктивного ключа. Прекрасно подходит для преобразования низкого напряжения в высокое для длинных цепей последовательно подключённых светодиодов. Высокоэффективен, однако обладает более высокой стоимостью и более сложной конструкцией по сравнению с конструкцией понижающих преобразователей. При отсутствии защиты от повышенного напряжения, когда светодиод открывается, выходное напряжение выходит из-под контроля. Не очень подходит для широтно-импульсного димминга.

Понижающе-повышающий преобразователь. Понижающе-повышающий преобразователь может понижать или повышать выходное напряжение по отношению к входному напряжению. Однако этот вид преобразователя — самый дорогой и наименее эффективный. Для большинства конструкций необходимы один или несколько индукторов и выходных конденсаторов. Для конструкции обратного хода необходим трансформатор. К преимуществам понижающе-повышающего преобразователя относится гибкость входного и выходного напряжения, а замыкание одного светодиода не повреждает преобразователь. К недостаткам — более низкая эффективность и более высокая стоимость, чем у понижающих преобразователей; конструкции подвержены влиянию импульсов высокого напряжения на основных переключающих элементах, транзисторах и диодах; короткое замыкание на выходе может вызвать ряд проблем. Не очень подходит для димминга модуляцией ширины импульса (PWP dimming, *pulse-width modulation dimming*).

Интегральная микросхема светодиодного источника питания

Интегральная микросхема (ИМ) светодиодного драйвера — это чип, который контролирует ток, проходящий через светодиод, используя внешние и внутренние транзисторы. В одних случаях, ИМ может также

преобразовывать напряжение, в других — эту функцию выполняют отдельные ИМ. На рис. 115 приведены примеры конструкций различных светодиодных драйверов при наличии или отсутствии ИМ.

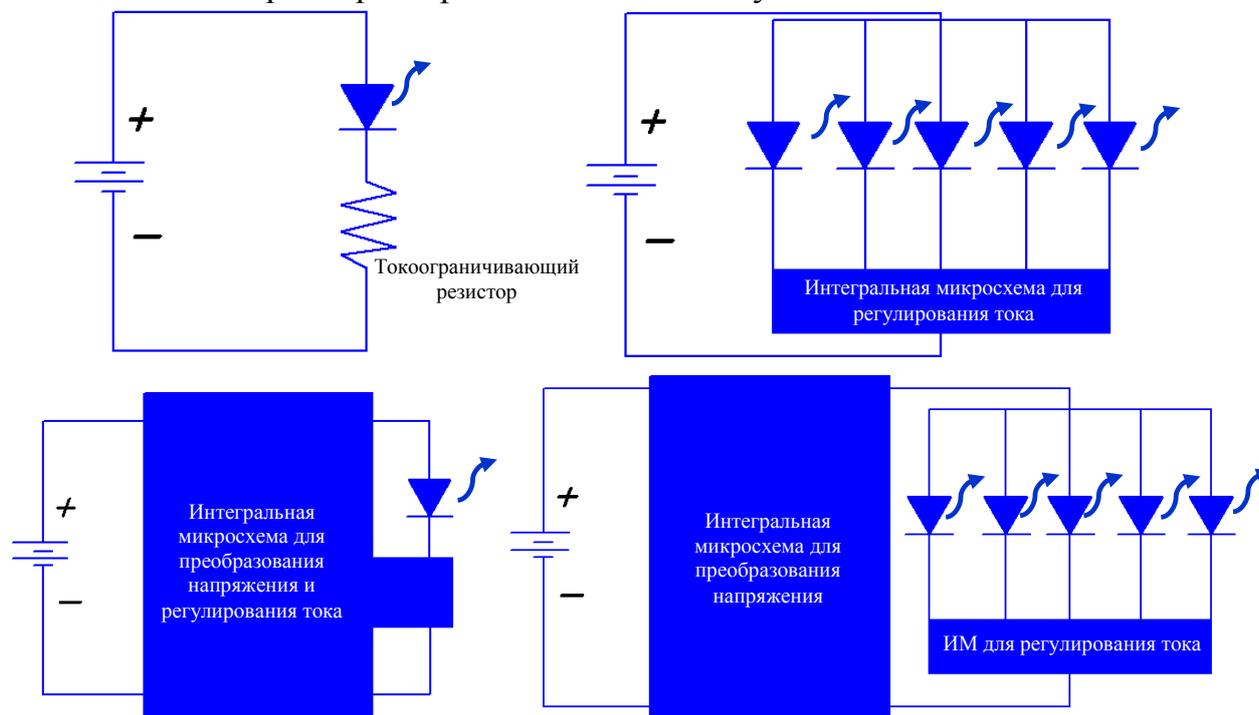


Рис. 115. Схемы источников питания для светодиодов без интегральных микросхем (ИМ), с одной и с двумя ИМ.

Каждому светодиоду необходим драйвер, но не каждому — интегральная микросхема драйвера.

4.1.6. Особенности создания источников питания

Помимо труда разработчиков, выполняющих электрические, тепловые, механические и прочие расчеты, необходимые для конструирования источника питания к светодиодам, его создание осложняется ещё и экономическими факторами.

Драйвер может состоять только из дискретных компонентов, начиная с выпрямительного диода и ограничивающего резистора и заканчивая более сложными линейными цепями. Интегральная микросхема более компактна и может обладать большей экономической эффективностью, чем дискретные компоненты, хотя для большинства драйверов необходимы дискретные компоненты и ИМ.

В то время как схемы могут быть собраны с использованием дискретных элементов, ИМ являются гораздо более компактным и экономически эффективным решением, но только в том случае, если имеется большой объем производства. Конструирование и производство ИМ в малых объёмах может стоить всего 200 000 \$, что является относительно низкой стоимостью для полупроводниковой

промышленности. Производство некоторых ИМ для драйверов может обойтись гораздо дороже из-за большей сложности и меньшего размера чипа.

Более важным фактором, чем прямые расходы на производство, может оказаться время от проектировки прототипа до тестирования и отладки, окончательной разработки чипа, его аттестации и сертификации. Для некоторых применений, например, в автомобильной промышленности, аттестация — процесс трудоёмкий, долгий и дорогостоящий.

На ИМ светодиодного драйвера есть множество других компонентов. Большинство компонентов (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, переключатели и другие) являются товарными продуктами; это означает, что их функции и характеристики относительно стандартизованы, и они продаются в основном по фиксированной цене.

В большинстве случаев покупатели драйверов и ИМ драйверов хотят приобрести недорогие компоненты, чтобы снизить свои расходы на материалы. Это значит, что они стремятся по возможности приобрести стандартную продукцию или продукцию, отвечающую отраслевым стандартам.

Достоинства стандартных компонентов заключаются в следующем:

- ✓ ИМ уже готовы к использованию;
- ✓ ИМ уже проверены на наличие электромагнитных помех, стандартизованы и отвечают правилам техники безопасности;
- ✓ конструкция продаётся вместе с разработанной схемой применения;
- ✓ ИМ продаются по низким ценам из-за больших объёмов производства.

В настоящее время может не оказаться разработанного драйвера, удовлетворяющего требованиям для специфических сфер применения светодиодных источников света. В этом случае разрабатываются либо сами драйверы, либо или ИМ драйверов.

4.1.7. Сферы применения драйверов

Ниже рассмотрены перспективы развития светодиодных драйверов и ИМ светодиодных драйверов для основных сфер их применения.

Дисплеи больших размеров. Светодиоды позволяют изготавливать дисплеи больших размеров, с их помощью можно существенно улучшить обычные экраны, а также создать новые продукты, такие как пико-проекторы. Использование драйверов в таких приборах представляется ограниченным, поскольку остаётся неясным спрос потребителей на такие продукты.

ТВ и мониторы. Данный сегмент значительно увеличился с 2009 г., когда для подсветки стали использовать светодиоды, расположенные по краям дисплея (*edge-lit LED*). На сегодняшний день это один из самых перспективных сегментов для применения ИМ драйверов.

Освещение. Один из самых перспективных сегментов для светодиодных драйверов, в особенности для ламп, заменяющих традиционные, и для устройств офисного, коммерческого и промышленного освещения. Некоторые сферы применения драйверов, которым уделяется большое внимание, например, уличное освещение, не представляют широких возможностей применения для драйверов и ИМ драйверов. Общее освещение должно отвечать целому ряду требований, важнейшим из которых является мощность, компенсация коэффициента мощности и цена. Фрагментация данного сегмента чрезвычайно велика, поэтому сложно сделать общие выводы. Например, для ламп, заменяющих традиционные (*retrofit LED lamp*), необходим компактный и недорогой драйвер. Для устройств уличного освещения требуются энергоэффективные, экономичные и мощные драйверы. В случае, если требуется управление характеристиками источника света, электрическая конструкция драйвера должна иметь функцию регулировки цвета.

Транспортные средства. Сложные конструкции драйверов и ИМ драйверов редко используются в автомобильной промышленности, за исключением случаев, когда требуется реализовать управление электрическим сигналом, например, в задних фонарях и фарах. Разработка драйверов для этой сферы применения требует большего времени, по сравнению с временем, затрачиваемым на разработку драйвера для устройства общего освещения, в силу специфики этого применения и более строгим сертификационным требованиям.

Информационные знаки. Использование светодиодных драйверов в данном сегменте остаётся значительным, так как для каждого пикселя требуется один или более каналов микросхемы светодиодного драйвера.

Сигнальные приборы. В этом сегменте драйверы практически не используются.

4.1.8. Отличительные черты интегральных микросхем источников питания

Развитие драйверов идёт двумя путями, первый из которых — расширение функциональных возможностей источника питания, а второй — увеличение интеграции. Такие драйверы ориентированы на конкретное применение. Ниже представлены некоторые отличительные особенности ИМ драйверов.

Управление световым потоком, компенсация коэффициента мощности. Производители драйверов и ИМ драйверов заявляют о *возможности управления количеством светового потока (dimming)* и компенсации коэффициента мощности. Так ли это на самом деле, остаётся под вопросом. Сравнительный анализ продукции затруднён тем, что производители указывают различные характеристики, исходя из своих

оптимальных проектов, которые могут не подходить для других сфер применения.

Цифровое управление по сравнению с аналоговым. В настоящее время только две компании (iWatt и Marvell) используют цифровое управление драйвером. Такое управление имеет определённые преимущества для некоторых сфер применения.

4.1.9. Характеристики источника питания

Самыми важными параметрами драйвера являются:

- ток и напряжение на выходе — предварительно определённые значения тока или напряжения в зависимости от типа драйвера;
- мощность — выходная электрическая мощность драйвера;
- эффективность — отношение между выходной и входной электрическими мощностями, выраженное в %.

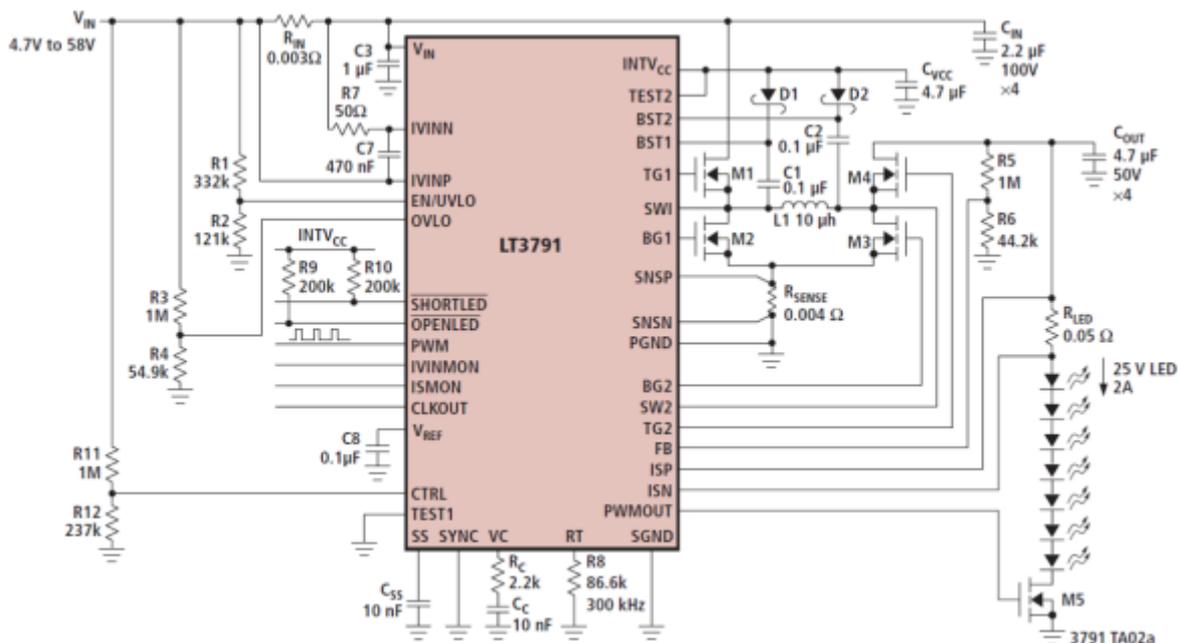


Рис. 116. Драйвер, работающий при входном напряжении от 4.7 до 58 В и подающий ток 2 А к 7-ми последовательно соединённым светодиодам.

Конструкция драйвера должна учитывать специфику применения светодиодного изделия. На рис. 116 приведён ещё один пример реального источника питания светодиодов.

В Таблице 16 обобщены некоторые основные характеристики драйвера для светодиодной продукции. ИМ драйвера в значительной степени влияет на эффективность, надёжность, спектр излучения источника света и на эффективность и характеристики всего продукта в целом.

Таблица 16. Некоторые ограничения значений характеристик светодиодного драйвера

Характеристики	Примеры и пояснения
Напряжение на входе	3 В при постоянном токе (мобильные телефоны), 12 В при постоянном токе (автомобили), 12, 24 и 110 В при переменном токе (освещение)
Напряжение на выходе	Всего 2 В при постоянном токе для отдельного светодиода и до 200 В при постоянном токе для последовательно соединённой цепи светодиодов. Возможны ограничения на изменения напряжения на выходе
Ток на выходе	От 20 мА для отдельного маломощного светодиода или светодиодной гирлянды до 1.5 А и более для высокомощного светодиода или светодиодной гирлянды. Также существуют ограничения в токе на выходе из-за изменения температуры, срока эксплуатации и типа устройства
Наименьшее возможное рассеяние энергии	Минимум рассеяния тепловой энергии в драйвере требуется для минимизации потока стороннего тепла при организации рабочего теплового режима
Энергоэффективность	Чтобы отвечать правительственным стандартам в области энергоэффективности (в том числе, и в выключенном состоянии), а также для переносных устройств (с целью более продолжительной автономной работы) необходима энергетическая эффективность 90%
Компенсация коэффициента мощности (<i>power factor correction, PFC</i>)	Многие продукты требуют, чтобы драйвер поддерживал коэффициент мощности 0.9 или выше. Целью является суммарный коэффициент гармонических искажений (<i>THD</i>) менее 10%
Защита от короткого замыкания	Гарантирует работу драйвера даже в случае обрыва цепи светодиода или при коротком замыкании
Димминг, изменение цвета и другое регулирование световых характеристик	Возможны аналоговый и цифровой димминг. В некоторых продуктах возможен качественный димминг до очень низких значений светового потока. Регулятор изменения цвета поддерживает димминг нескольких цветов одновременно; при таком изменении

Характеристики	Примеры и пояснения
	варьируется индекс цветопередачи и коррелированная цветовая температура
Срок службы	Продукция самого высокого класса имеет 5-ти летнюю гарантию. Срок службы драйверов определяется, в том числе, конструкцией и сроком службы отдельных компонентов, таких как электролитические конденсаторы и оптические изоляторы
Безопасность и электромагнитные помехи (EMI)	Сфера применения драйвера определяет принадлежность устройства к тому или иному классу по электрической безопасности и электромагнитной совместимости
Условия окружающей среды и форм-фактор	Существует ряд механических и температурных ограничений, включая температуру, влажность и вибрацию. Форм-фактор — стандарт, задающий габаритные размеры источника питания, а также описывающий дополнительные совокупности его технических параметров, например форму, типы дополнительных элементов размещаемых в устройстве, их положение и ориентацию.
Число компонентов и спецификация материалов	Число компонентов влияет на стоимость производства и надёжность

Основные стандарты безопасности и требования электромагнитной совместимости:

- UL1310 и UL8750 (Освещение и светодиодный драйвер)
- IEC 61347-2-13 (Светодиодный драйвер)
- FCCClassB (EMI)

4.2. Электроника светодиода

Для управления характеристиками светодиодного источника используется как внешняя, так и встроенная управляющая электроника. На рис. 117 показаны уровни интеграции электроники с источником света. Например, управляющая электроника и источник света могут размещаться в едином корпусе (рис. 117 (а)), что характерно для конструкций светодиодных ламп, заменяющих традиционные (см. рис. 64). Другой вариант — драйвер с двухуровневым преобразованием и светодиодный источник света размещены по разным корпусам (рис. 117 (г)). Такое размещение применяется, например, в конструкциях световых устройств, отображающих информационные знаки.

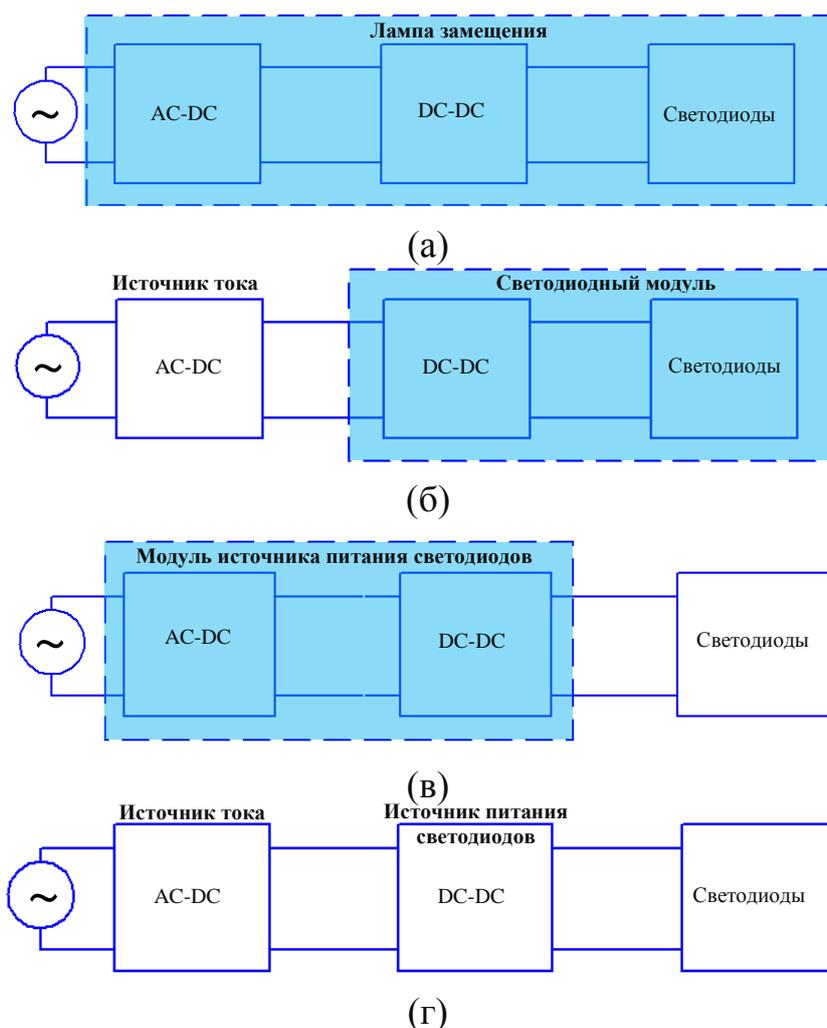


Рис. 117. Уровни интеграции управляющей электроники источника питания светодиодов со светодиодным источником света: полная интеграция (а), частичная интеграция (б, в), отсутствие интеграции (г).

Полная интеграция драйвера со светодиодным светильником характерна для устройств портативного освещения, подсветки дисплеев, сигнальных приборов, панелей видеомониторов. Обусловлено это определённым форм-фактором изделий.

В конструкции других видов осветительных приборов используются стандартные или сделанные под индивидуальный заказ модели драйверов. Драйверы устанавливают в непосредственной близости от источника света или на удалении от него. Место расположения драйвера зависит от сферы применения. Источник дистанционного питания, устройство AC-DC, может быть расположен отдельно от драйвера (рис. 117 (в)), чтобы обеспечить компактность и соответствующий внешний вид. Такая конструкция применяется, например, для освещения торгового пространства, бытового освещения, или там, где источник может быть размещён в надёжном и защищённом месте, например, в устройстве машинного зрения. Для некоторых сегментов освещения источник питания

часто продаётся отдельно, как, например, преобразователи AC-DC для ноутбуков и других приборов.

4.3. Интеллектуальное освещение. Аналоговое и цифровое управление

4.3.1. Интеллектуальное освещение

Интеллектуальным называется освещение, характеристиками которого можно управлять. Система интеллектуального освещения содержит, помимо группы светодиодных светильников, различного рода датчики (освещённости, присутствия) и управляющую электронику. Такие системы приобретают все большую популярность в освещении квартир жилых домов за счет возможности изменения спектра излучения, подсветки определённых зон в доме в зависимости от дня недели, времени суток и других пожеланий. Наибольшее распространение такие системы получили в промышленном и офисном освещении.

Одной из функций «умного» освещения является возможность плавно управлять световым потоком источника света, то есть осуществлять диммирование (от англ. *dim* — *затемнять*). Димминг становится крайне важной функцией, несмотря на то, что на сегодняшний день он не всегда широко используется. В области освещения димминг:

1. позволяет изменять цвет освещения, что активно применяется, например, в архитектурной подсветке и в освещении развлекательных центров;
2. позволяет экономить энергию (особенно важно для освещения территорий промышленных предприятий);
3. способствует долгому сроку службы (например, для уличного освещения, продукции высшего ценного сегмента);
4. допускает гибкость светового дизайна (например, для подсветки архитектурных сооружений или освещения торговых точек).

4.3.2. Аналоговое управление

Аналоговое управление является самым простым способом контроля яркости светильника (рис. 118).

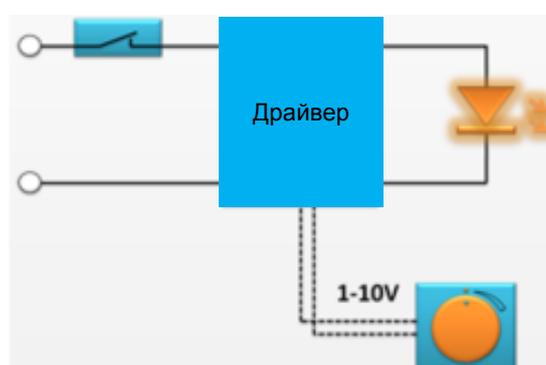


Рис. 118. Схема аналогового управления источником твердотельного освещения.

Оно осуществляется тиристорным регулированием по заднему или переднему фронту, что подходит только для одного контролируемого светильника. Наибольшее количество таких систем применяется в розничной торговле. Однако такая система не позволяет выключить светильник полностью.

4.3.3. Цифровой управление

Цифровое управление является сложным способом организации управления, однако оно позволяет соединять и независимо управлять драйверами с помощью цифрового интерфейса. Такой способ управления позволяет контролировать характеристики светильника в конкретный момент времени и плавно регулировать световой поток при интегрировании в систему датчиков. Проще организуется настройка цветовой температуры белого света и другие колориметрические характеристики изделия.

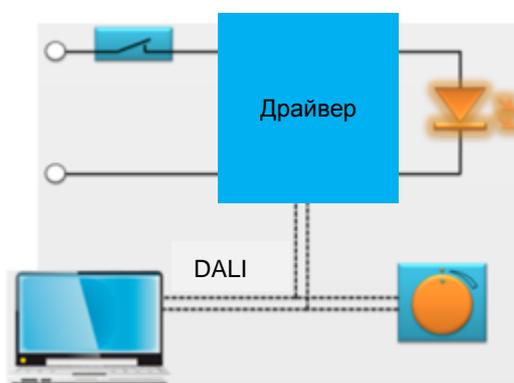


Рис. 119. Один из примеров устройства интеллектуального управления с помощью цифрового интерфейса.

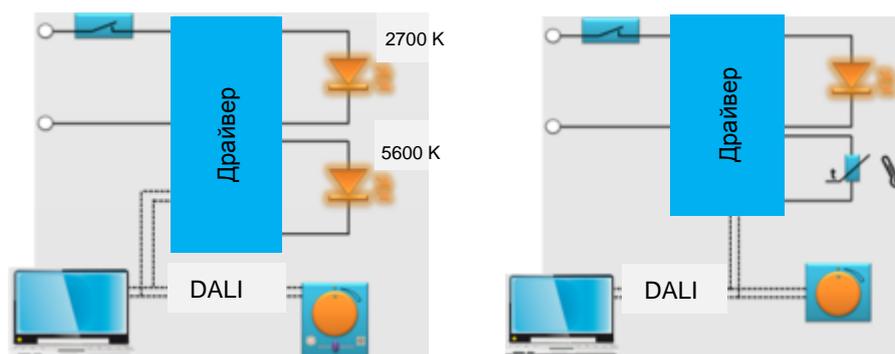


Рис. 120. Примеры организации умного освещения на основе цифровой электроники.

- В настоящее время используются следующие цифровые интерфейсы:
- ❖ DALI *Digital Addressable Lighting Interface* — цифровой адресуемый интерфейс освещения;
 - ❖ DSI *Digital Signal Interface* — цифровой сигнальный интерфейс;
 - ❖ DMX *Digital MultipleX* — цифровой коммутируемый интерфейс;

❖ KNX — известный по всему миру стандарт, используемый для многих устройств в домах и в системах управления зданий.

Схемы совмещения светодиодного устройства с модулем DALI и примеров «умных» светильников представлены на рис. 119, 120.

Примером использования интеллектуального освещения является светильник для промышленных применений Intelligent Light Engine производства компании Digital Lumens, в котором свет может быть отрегулирован до очень низкого уровня и поддерживаться на нем в течение длительного времени. Такие светильники нужны для зон производства и складов. Интеллектуальная система обеспечивает снижение потребления электроэнергии до 13% от первоначального уровня за счет выключения света во время отсутствия рабочих в зоне освещения. На рис. 121, 122 представлено сетевое размещение светильников и их модификации.

Intelligent Light Engine состоит из светильника, интегрирующего три заменяемых, собранных из светодиодов, световые полосы, изготовленного на заказ преобразователя AC-DC, входящего в источник питания, микропроцессора и беспроводного контроллера Zigbee для соединения с сетью, а также датчика движения.

Светильник легко заменяет существующие светильники, работающие на переменном токе, и предназначен для замены одной высокоразрядной или натриевой лампы высокого давления или флуоресцентной лампы T5 или T8 мощностью 400 Вт. Для управления и введения в эксплуатацию сети светильников Intelligent Light Engine, а также для максимизации эффективности использования электроэнергии используется программное обеспечение Light Rules. Оно имеет удобный интерфейс и позволяет получать информативные ежедневные отчёты, на основе которых корректируется программа освещения, что оптимизирует расходы электроэнергии. Light Rules является основным методом контроля (оно позволяет в реальном времени считывать значения протекающего тока, энергопотребления, кВт/час, рабочей температуры) и управления: на экране компьютера можно задать настройки яркости, изменить настройки датчика движения. Уже нет необходимости подниматься к светильнику и вручную задавать его характеристики.

Программное обеспечение позволяет осуществлять управление каждым светильником. Набор светильников Intelligent Light Engine объединён в единую сеть Smart Light Grid. Smart Light Grid представляет собой сеть освещения, которая позволяет интеллектуально оптимизировать энергоэффективность на общесистемной основе. Такая сеть обеспечивает двунаправленное соединение между светильником и системой управления. Так как светильники способны обмениваться информацией друг с другом посредством Light Rules, они могут реагировать на состояние соседних

светильников и/или всей системы, и обеспечивать в ответ заданные характеристики.

Связь светильников в сеть основана на беспроводной технологии Zigbee. Пространство, освещаемое светильниками, делится на отсеки, каждый из которых имеет свой шлюз Zigbee. Шлюзы Zigbee подключаются к компьютерной сети через сетевую плату Ethernet, что даёт возможность контролировать освещённость и управлять характеристиками освещения.



Рис. 121. Связь светильников Intelligent Light Engine в беспроводную сеть.



Рис. 122. Светильник Intelligent Light Engine рассеянного света (а) и направленного света (б).

Выпускается два вида светильников Intelligent Light Engine:

- Highbay Intelligent Light Engine — этот светильник предназначен для складов, создаёт высоко концентрированный, направленный свет, который максимизирует уровень освещённости на целевых поверхностях в проходах между стеллажами и сводит до минимума потребление электроэнергии; обычно уровень освещённости вырастает на 50–100% по сравнению с предыдущим поколением светильников;

- Midbay Intelligent Light Engine — этот светильник распределяет свет равномерно среди открытых пространств окружающей среды с высоты потолка 50–100 м. Он спроектирован для производства, складов без перегородок и складских доков. Изготавливается для двух цветовых температур: нейтральной и холодной белой.

Преимущество таких светильников перед традиционными состоит в возможности работать в системе адаптивного управления: малое время включения/выключения. Система позволяет полностью погасить светильники через заданное время после прекращения движения в зоне мониторинга (30–60 с). Для безопасности сотрудников в определённых местах освещение работает постоянно на уровне 10% от максимального уровня и при необходимости доводится до 100%.

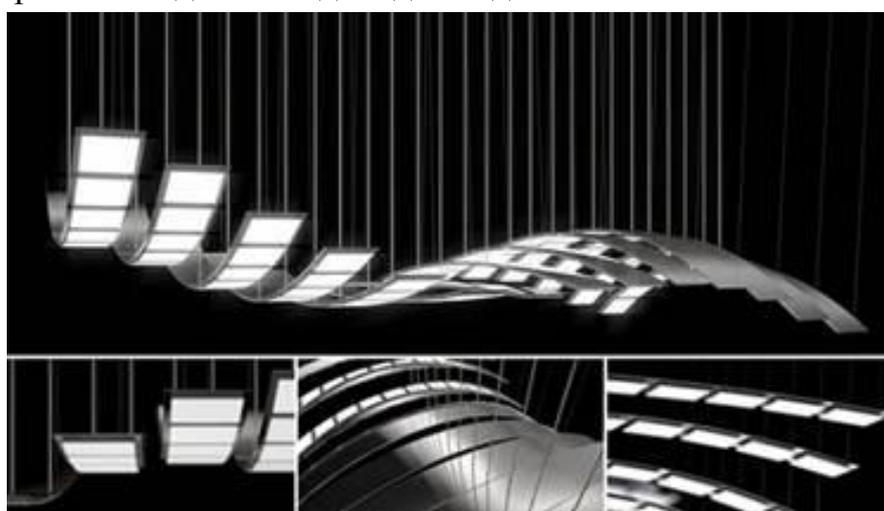


Рис. 123. Интеллектуальный светильник с подвижными элементами. Световые элементы сделаны на основе органических панелей.

Светодиодные светильники компании Digital Lumens появились на рынке в 2010 г. На 16 марта 2010 г. светильник стоил 1250 \$. Заявленная оценка окупаемости, основанная на сохранении энергии,

профилактическом осмотре и мониторинге рабочих характеристик каждого светильника, осуществляемом с помощью программного обеспечения, составляет 2 года. Именно благодаря показателю «срок окупаемости» компания получила значительное финансирование для промышленного выпуска светильников. К 2011 г. светильники были установлены на промышленных площадях компаний Americold, United State Cold Storage, Maines Paper и Food Service. Компания заявила, что освещает уже более 10 млн. квадратных метров промышленных площадей.

Другим примером интеллектуальной системы освещения является светильник MantaRhei. Светильник имеет подвижные части, положение которых программируется при помощи компьютера, и регулируемый уровень освещённости. Светильник состоит из нескольких сотен элементов, свободно плавающих в пространстве (рис. 123). При этом инновацией стало использование OLED-модулей, по толщине сопоставимых с листом бумаги — всего 1.8 мм.

Ещё один пример: система ROAMview производства компании Acuity Brands, одного из лидеров на рынке инновационного энергосберегающего освещения и решений интеллектуального управления. Эта система позволяет эффективно эксплуатировать системы освещения: при помощи компьютера задаются все необходимые параметры: время включения/выключения и яркость света в зависимости от показателей датчиков освещённости. Управление системой осуществляется беспроводным способом, что облегчает её монтаж и удобство в обслуживании.

РАЗДЕЛ 5. Динамика развития технологии светодиодных устройств

- 5.1. Необходимость массового производства светодиодных устройств
- 5.2. Снижение стоимости светодиодных устройств — основная движущая сила развития их технологии
- 5.3. Государственная поддержка развития технологии светодиодных устройств
- 5.4. Образование и стандарты в сфере светодиодных технологий
- 5.5. Прогнозы развития светодиодных устройств

5.1. Необходимость массового производства светодиодных устройств

Рынок светотехнических изделий на основе светодиодов ежегодно увеличивается, и этот процесс легко объясним. Успехи в технологии и конструировании светодиодных светильников и огромные преимущества новых источников света открывают большие возможности для производства самых разных осветительных устройств: от светильников, заменяющих малоэффективные традиционные источники света для бытовых нужд, до интеллектуальных систем освещения и функциональных устройств для специализированных областей промышленности — медицинской, пищевой и других.

Потребители находят в светодиодных изделиях то, что невозможно найти в светильниках предыдущего поколения. Светодиодные устройства ценятся за высокую эффективность, долговечность в работе, высокое качество излучаемого света, экологичность, превосходные потребительские свойства, возможность создания светотехнического изделия любой формы, размера и спектра излучения. Кроме того, на основе светодиодов можно создавать устройства, спектром излучения которых можно управлять в зависимости от погодных условий, наличия движения в освещаемой зоне, настроения, времени суток и других факторов.

Все это стало возможным благодаря ускоренным темпам развития светодиодных технологий и постоянному улучшению характеристик светодиодов и светодиодных чипов. Световая эффективность светодиодов, достигнув в 2009 г. высшего уровня эффективности для существовавших тогда источников света, в последующие годы только увеличивалась. В 2013 г. уровень эффективности серийных светодиодов белого света системы «синий чип — жёлтый люминофор» с индексом цветопередачи CRI = 80 составил 160 лм/Вт. Уровень эффективности лабораторных образцов светодиодов достигает гораздо более высоких отметок — до 260 лм/Вт.

Развитие светодиодных технологий идёт в направлении совершенствования светоизлучающих чипов: при выращивании используются гомоэпитаксиальные подложки, уменьшаются толщина и количество слоев материалов, повышается качество материалов, разрабатываются конструкции, обеспечивающие лучшее растекание тока, снижение генерации тепла и ускорение его отвода из рабочей зоны прибора. Совершенствуются и светодиоды белого света — основные элементы осветительных систем общего освещения: разрабатываются светодиоды с высоким индексом цветопередачи, термостойкие люминофоры и люминофоры с повышенным коэффициентом преобразования света; внедряются новые технологические процессы и конструкции для уменьшения временных, материальных и трудовых затрат. Развитие светодиодных технологий ведётся и во многих других приложениях.

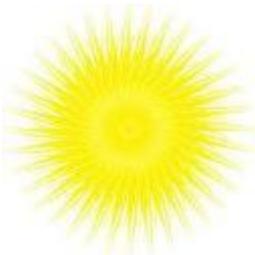
Рассмотрим основные факторы, определяющие необходимость массового промышленного производства светодиодных осветительных устройств.

5.1.1. Высокая эффективность светодиодных источников света

В Таблице 17 представлены данные о мощности потребления и световом потоке таких источников белого света, как лампа накаливания, галогеновая лампа, компактная флуоресцентная лампа (КФЛ) и светодиодная лампа. Из приведенных данных можно сделать вывод об экономии электроэнергии при замене традиционного источника света на светодиодный. Например, при использовании вместо лампы накаливания мощностью 60 Вт светодиодной лампы с тем же световым потоком потребление электроэнергии снижается в 6 раз. По сравнению с КФЛ, светодиодная лампа выигрывает по мощности потребления не так много: при световом потоке в 700 лм мощность потребления КФЛ в 1.5 раза выше мощности потребления светодиодной лампы. Однако качество света КФЛ по индексу цветопередачи невозможно определить из-за линейчатости спектра, который, к тому же, в большинстве случаев вызывает усталость и раздражение глаз. При этом вопрос о сравнении экологических последствий от разрушения КФЛ и светодиодных ламп снимается сам собой, поскольку КФЛ содержат ртуть, а в светодиодных лампах она отсутствует.

Доминирующими продуктами на рынке освещения в 2011 г. были компактные люминесцентные лампы. Количество светодиодных осветительных устройств составляло тогда лишь 1% от общей доли рынка, но при этом на доходы от их продаж пришлось 14%. Светодиодные устройства — это высокотехнологичные изделия, и их стоимость высока, однако эти затраты не сравнимы с теми преимуществами, которые даёт светодиодная продукция по срокам окупаемости за счет сэкономленной электроэнергии.

Таблица 17. Преимущество энергопотребления светодиодных ламп перед другими источниками белого света

Световой поток, лм	Мощность, Вт			
	Лампа накаливания	Галогеновая лампа	Компактная флуоресцентная лампа	Светодиодная лампа
				
1500	100	до 72	до 26	не определена
1000	75	до 53	до 23	17
700	60	до 43	до 15	10–13
430	40	до 29	до 11	5–9

В настоящее время наиболее перспективным для распространения продукции светодиодных технологий является рынок общего освещения. По прогнозам маркетологов, к 2016 г. рынок светодиодных осветительных устройств обгонит рынок светодиодной подсветки. При этом большая часть выпускаемых светодиодных чипов будет использоваться именно в светодиодных светильниках общего освещения. Для сравнения: в 2011 г. только четвертая часть светодиодных чипов была задействована в осветительных устройствах [48].

Планируется, что к 2018 г. будет продано 6.3 миллиарда светодиодных ламп, а количество выпущенных ламп накаливания составит лишь 14% от общего объёма осветительных устройств. Эти показатели будут достигнуты в том случае, если значительно снизится стоимость светодиодной лампы. Доступность её цены определяет сегодня тенденцию развития рынка. Тем не менее, высокая стоимость светодиодных ламп приведёт в 2013 г. к получению большего, по сравнению с другими технологиями освещения, дохода. По прогнозам специалистов, совокупный среднегодовой прирост на рынке освещения к 2016 г. составит 85%. С 2009 г. по 2020 г. поставки светодиодов для освещения и доходы, полученные от их реализации, вырастут соответственно на 53 и 26%, но к концу этого периода прогнозируется застой рынка. Маркетинговое агентство IMS Research предсказывает начало спада общего объёма поставок на рынке светодиодного освещения в 2017 г. В 2018 г. тенденция

спада охватит и доходы, полученные от продажи светодиодных ламп, из-за долгого срока службы таких изделий. На рис. 124 представлена тенденция развития рынка светодиодных ламп до 2020 г., выраженная в доходах от продаж новых источников света и в относительном изменении поведения рынка по сравнению с уровнем 2009 г.

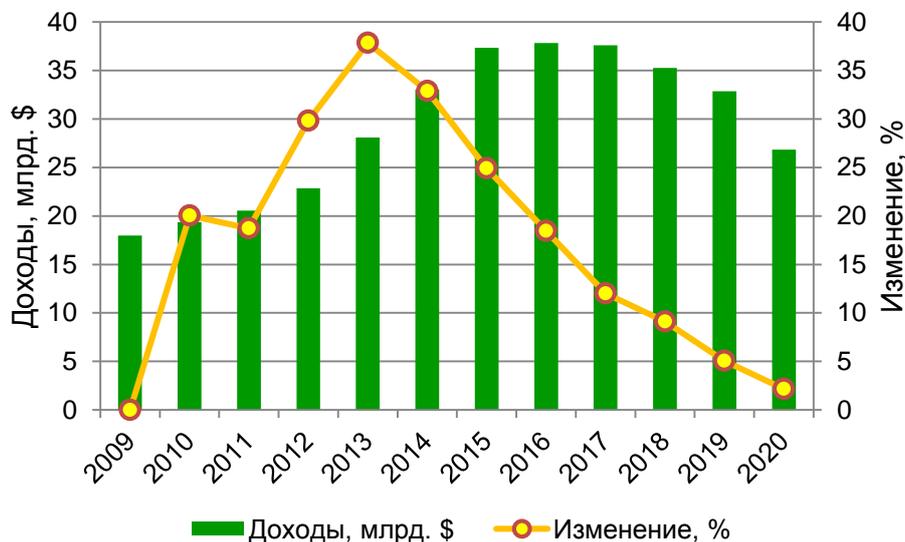


Рис. 124. Изменение рынка светодиодных ламп в период 2009–2020 гг.



Рис. 125. Средняя стоимость ламп за период 2009–2020 гг.

В ближайшие годы ожидается снижение цен на светодиодные лампы. На рис. 125 показано прогнозируемое изменение средней стоимости светодиодной, флуоресцентной и компактной флуоресцентной лампы, а также ламп накаливания и газоразрядных ламп высокой интенсивности. Как ожидается, в 2014 г. средняя цена светодиодной лампы

упадёт ниже 10 \$ за штуку [49], что позволит бóльшему числу потребителей оценить достоинства нового твердотельного источника света. В 2017 г. средняя розничная цена устройства окажется ниже 5 \$ и к 2020 г. составит 3.59 \$.

5.1.2. Длительный срок службы светодиодных источников света

Повсеместная замена традиционных источников света на светодиодные была бы невозможной при низком значении такого важного показателя, как срок службы светодиодного устройства. Поскольку скорость деградации (ухудшения свойств с течением времени работы) светодиодных чипов на основе GaN является достаточно низкой, срок службы светодиодов и светотехнических устройств на их основе оценивается как достаточно высокий. Под сроком службы светодиодного источника света понимают время, за которое световой поток от источника снизится на 30% от первоначального значения.

По заявлениям производителей, лучшие светодиодные устройства имеют срок службы 50 000 ч, что соответствует пяти годам и восьми месяцам. Перед выпуском нового изделия на рынок оно проходит ряд тестов и испытаний, в том числе и для гарантии заявленного срока службы. По тенденции изменения характеристик светодиодных устройств в течение 1000 ч их работы на постоянном токе в условиях, максимально приближенных к реальным рабочим, делают вывод о сроке службы светодиодного изделия [49]. Подробнее со способами оценки срока службы светодиодных источников света можно ознакомиться по работе [50]. Напомним, что срок службы лампы накаливания равен 1000 ч. За это время нить накала истончается за счет испарения металла и перегорает.

Отметим, что долгий срок службы изделия означает и отсутствие необходимости в эксплуатационном обслуживании, связанном с заменой источников света.

5.1.3. Высокое качество света

Спектр светодиодного источника света отличается от наиболее привычного человеческому глазу спектра излучения солнца. Однако спектр светодиода непрерывный, что позволяет оценить качество белого света по существующему стандарту [22] и хорошо воспринимается человеком. Хотя стандарт [22] и пересматривали на предмет его использования применительно к светодиодным источникам света, но до сих пор именно он применяется для расчёта CRI.

На рис. 126 приведены фотографии внутренней территории бассейнов, освещённые галогеновыми лампами и светодиодными.

С помощью техники получения белого света на основе системы «синий светодиодный чип — жёлтый люминофор» можно создавать источники белого света с различной коррелированной цветовой

температурой. В настоящее время выпускаются светильники с цветовыми температурами 2700, 3000, 3500, 4000, 5000 и 6500 К.

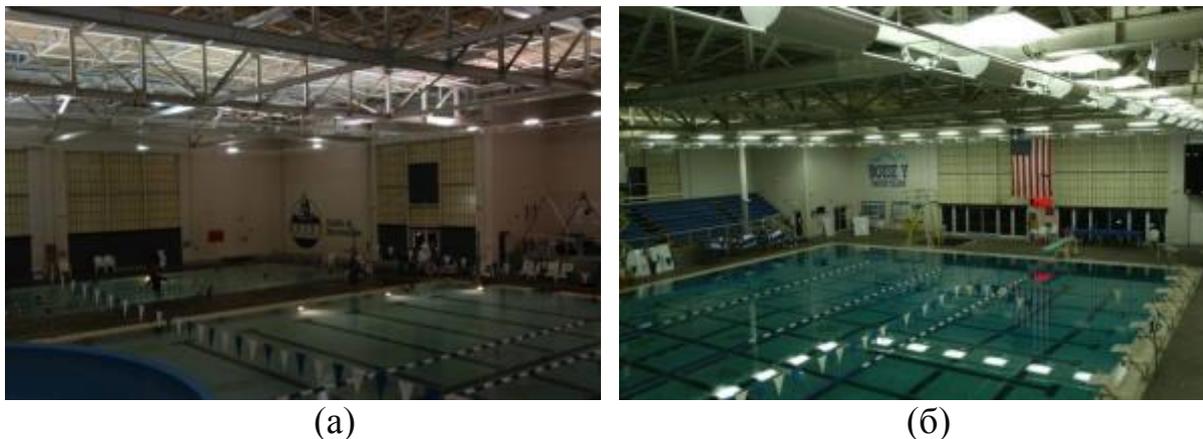


Рис. 126. Уровень и качество света при замене галогеновых ламп (а) на светодиодные светильники от Symply LED на основе модуля Piazza Series (б) в водном центре YMCA, Бойс, Айдахо. Использование светодиодных светильников позволило сэкономить 770 Вт или 80% электроэнергии со светильника.

Индекс цветопередачи лучших светодиодных продуктов достигает значения 95. С 2012 г. в России законодательно качественным источником белого света на основе светодиодов принято считать источник, обладающий CRI не менее 80. Стоит отметить, что люминесцентные источники света не оцениваются по данному показателю, так как имеют линейчатый спектр (см. рис. 89).

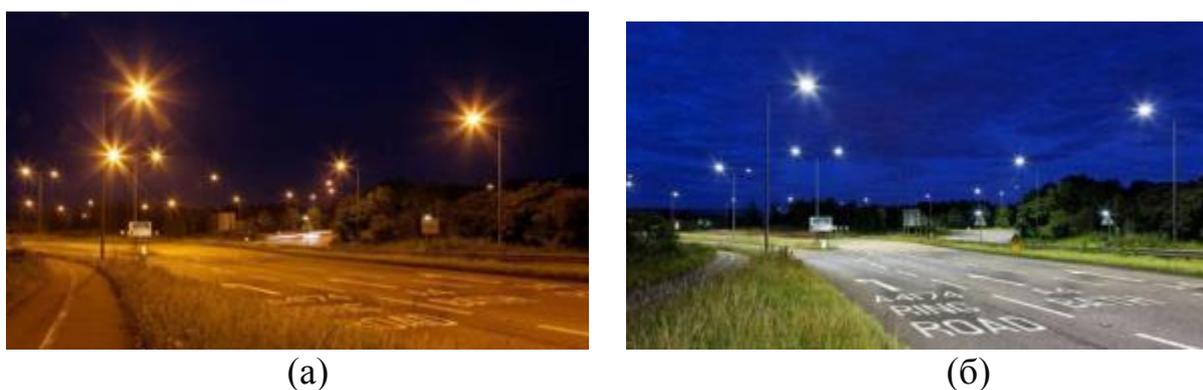


Рис. 127. Традиционное освещение на основе ламп высокого давления (а) и установленное в июне 2011 г. светодиодное освещение (б) кольцевой развязки в Бристоле, Великобритания.

Рис. 127 демонстрирует качественное изменение воспринимаемых цветов при замене натриевых ламп высокого давления на светодиодные источники света над автомобильной магистралью: в случае использования

последних чётко различается белый цвет дорожной разметки, асфальтового покрытия, придорожных территорий.



Рис. 128. Светодиодная лампа для замены традиционной лампы накаливания мощностью 60 Вт производства компании Philips (910 лм, 9.7 Вт, 93.4 лм/Вт, CRI = 93), удостоенная премии Департамента энергетики США в августе 2011 г.

Светодиодная лампа производства компании Philips (рис. 128), разработанная для замены традиционной лампы накаливания мощностью 60 Вт, перед тем, как поступить в продажу, 18 месяцев подвергалась испытаниям: 1300 образцов таких ламп эксплуатировались на более чем 40 объектах по всей Северной Америке. В течение 6000 часов были испытаны 200 ламп для оценки светового потока. В этих лампах использовалась технология удалённого люминофора (см. рис. 65 (а)). Они обладают следующими характеристиками: световым потоком 910 лм, эффективностью 93.4 лм/Вт, индексом цветопередачи 93 и потребляет 9.7 Вт (вместо 60 Вт как лампы накаливания). В августе 2011 г. этот светодиодный продукт был удостоен премии Департамента энергетики США.

5.2. Снижение стоимости светодиодных устройств — основная движущая сила развития технологии их производства

Как уже говорилось, уменьшение стоимости светодиодного изделия приводит к его большей доступности для широкого круга потребителей. Это означает, что получают развитие низкоценовые сегменты рынка освещения для массового потребления.

Снижению стоимости светодиодных светильников способствуют: развитие светодиодных технологий, увеличение производительности процессов изготовления светодиодных изделий и повышение светового потока с единицы их площади (рис. 129–133).

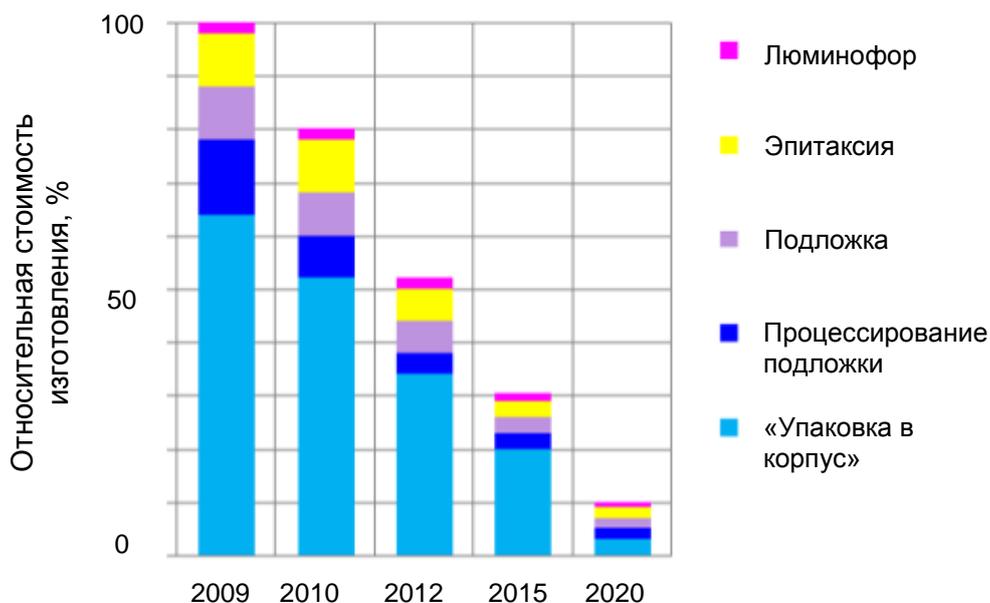


Рис. 129. Прогноз снижения стоимости изготовления единичного светодиода.

Все ещё дорогой остаётся управляющая электроника, хотя её развитие, по прогнозам, должно ускоряться, так что её вклад в стоимость светильников будет постепенно снижаться. С другой стороны, ожидается подорожание систем теплоотвода, поскольку имеется тенденция к увеличению плотности излучения светодиодных устройств. Это означает, что с меньшей площади придётся отводить больше тепла, а это потребует применения новых нестандартных решений.

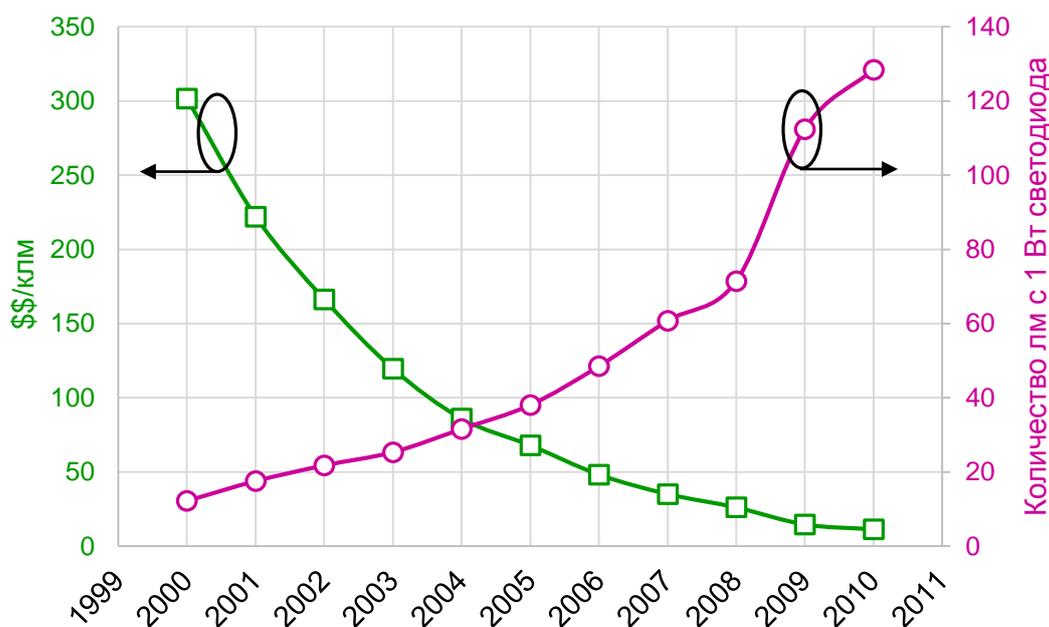


Рис. 130. Тенденция развития светодиодов по количеству светового потока с 1 Вт источника и стоимости за 1000 лм.

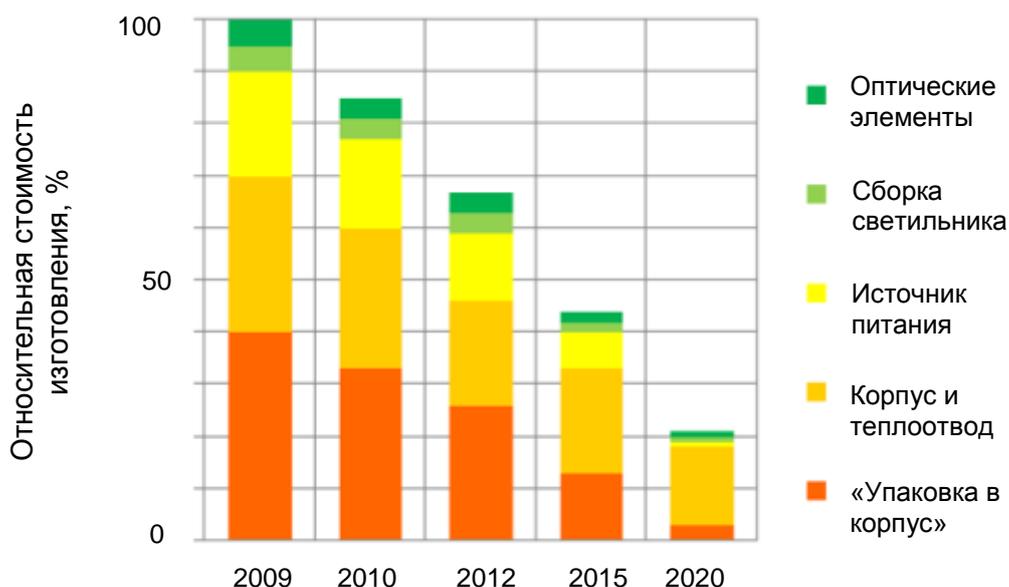


Рис. 131. Покомпонентная стоимость светодиодного светильника и прогноз её развития до 2020 г.

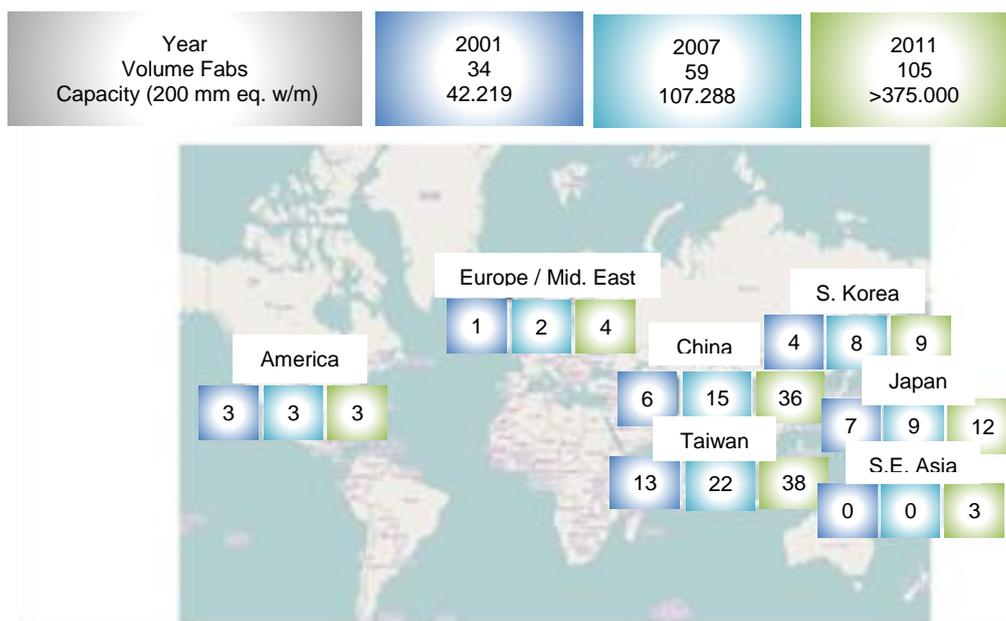


Рис. 132. Появление новых предприятий по изготовлению светодиодов в Море.

Появление новых компаний на рынке светодиодных технологий (рис. 132) также создаёт условия для постоянного снижения стоимости изготовления светодиодов.

Чтобы светодиодное освещение использовалось повсеместно, все компоненты светильника должны быть дешёвы и иметь превосходные характеристики. Снижение стоимости светодиодного устройства достигается за счет применения более производительных процессов с меньшим числом технологических операций, увеличения

производительности оборудования и экономии материалов, причём на каждом этапе создания светодиодов. Одним из перспективных направлений развития рынка светодиодов и светодиодных чипов являются светодиоды, созданные на уровне подложки. Рассмотрим перечисленные факторы более подробно.

5.2.1. Совершенствование и замена технологических процессов

Обсудим способы оптимизации и совершенствования некоторых технологических процессов изготовления светодиодных чипов.

Рассмотрим, например, процесс скрайбирования и разделения светодиодных чипов. Здесь имеется возможность усовершенствования технологии за счет применения единого процесса разделения лазерным лучом или механически лезвием, прорезающими полностью гетероструктуру светодиодов, вместо используемых двух процессов, один из которых, скрайбирование, — это прорезание светодиодной структуры на определённую глубину, а второй — разделение, осуществляемое механически путём надавливания на область, примыкающую к разрезу. На рис. 133 наглядно представлены оба варианта проведения указанных операций.

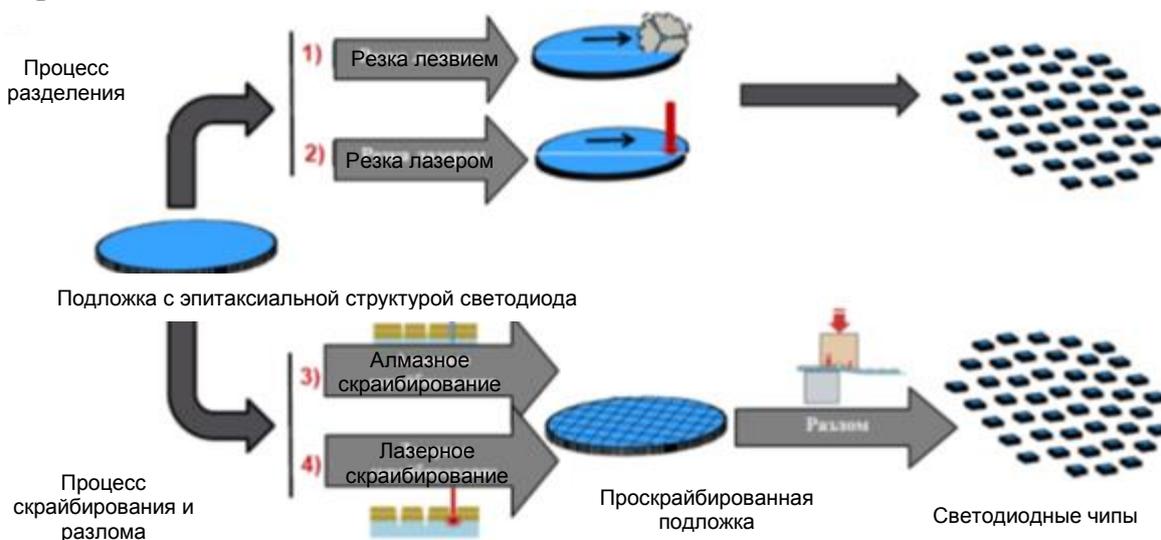


Рис. 133. Варианты получения одиночных чипов из пластины: процесс разделения или процессы скрайбирования и разлома [10].

Основными параметрами этих процессов являются:

- уменьшение толщины линии разреза или скрайбирования для получения большего количества чипов с пластины;
- скорость разрезания для увеличения производительности оборудования;
- выход годных чипов после разрезания пластины;
- характеристики чипов (некоторые процессы уменьшают яркость, а значит, снижают качество чипов).

На рис. 134 показаны некоторые из этих параметров.

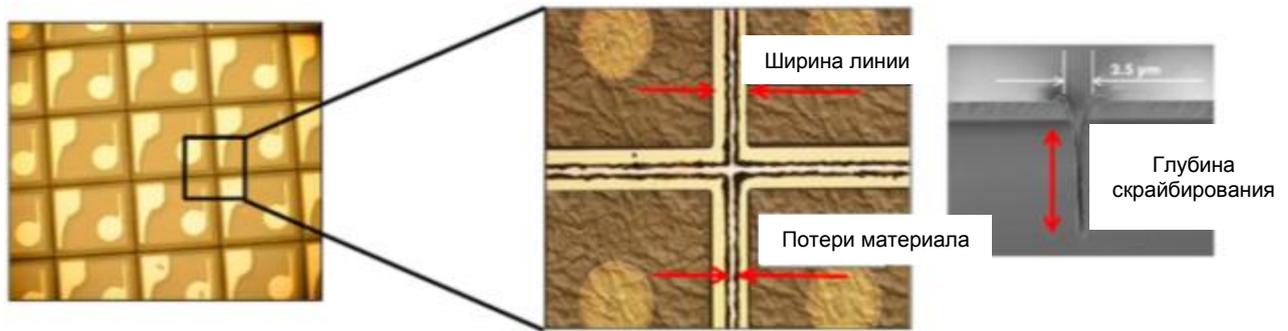


Рис. 134. Основные параметры процесса разрезания чипов.

Основные факторы, влияющие на скорость разрезания:

1. *Разрезаемый материал: GaN, сапфир, GaAs, SiC, Si, Ge, Cu, CuW, Mo.*

На рис. 135 (б) представлена фотография оплавления металла после лазерного скрайбирования.

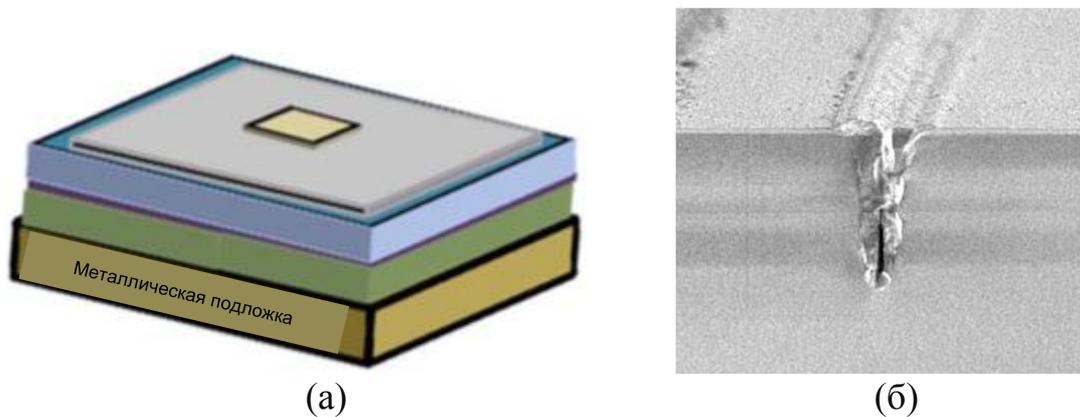


Рис. 135. Схема вертикального чипа, зафиксированного на металлической подложке (а), и эффект оплавления металла после лазерного скрайбирования (б).

2. Глубина скрайбирования

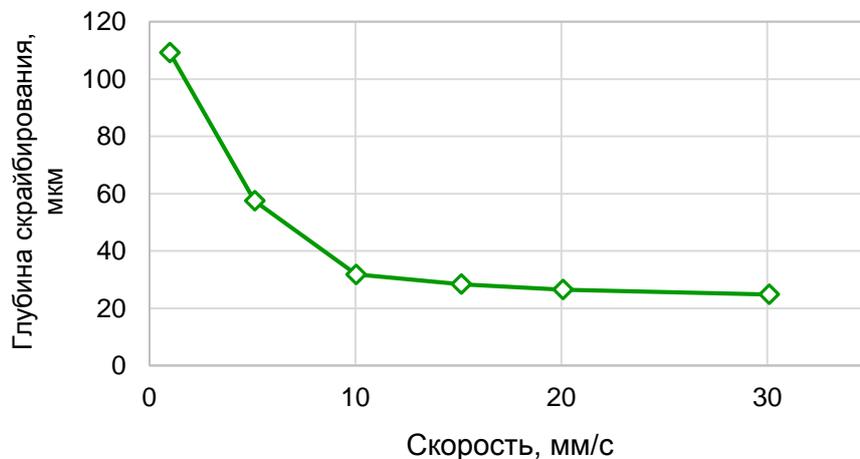


Рис. 136. Зависимость глубины скрайбирования от его скорости при использовании лазера с длиной волны излучения 266 нм, частотой 30 кГц и средней мощностью 1 Вт.

На рис. 136 приведена зависимость глубины скрайбирования от скорости скрайбирования материала: чем выше скорость скрайбирования, тем на меньшую глубину удаётся углубиться в материал не оказывая необратимых последствий на его свойства.

3. Скорость перехода на следующую линию разреза

На рис. 137 приведены способы перехода скрайбирующего инструмента на следующий путь. Производительность установки будет определять в том числе длина пути.

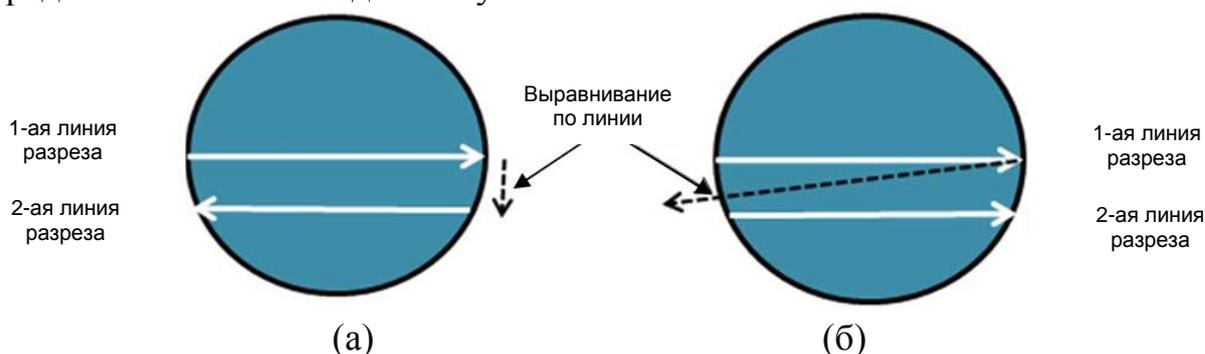


Рис. 137. Путь перехода на следующую линию разреза: при лазерном разделении чипов (а) и при разделении лезвием (б).

Для увеличения скорости скрайбирования лучше одновременно задействовать несколько лазерных лучей, чем увеличивать мощность лазера, так как можно повредить полупроводниковые компоненты.

Для уменьшения потерь материала и толщины линии резки следует использовать короткоимпульсный высокомогущный лазерный пучок, действие которого заключается в направлении лазерного излучения под поверхность разрезаемого материала. В этом случае размягчение материала происходит под его поверхностью, что приводит к разрезанию подложки как бы изнутри.

Преимуществами такого подхода являются:

- значительное снижение потери материала из-за малой ширины линии;
- отсутствие загрязнений подложки или оптических элементов;
- чистые края чипов, что приводит к отсутствию потерь или к небольшим потерям в яркости.

К его недостаткам относятся:

- более высокая стоимость оборудования;
- необходимость этапа разлома пластины на единичные чипы из-за их малого размера;
- отсутствие универсальности: он подходит не для всех материалов.

Метод освоен для подложек из сапфира и кремния.

Альтернативным методом получения единичных чипов из пластины является травление. Его можно провести лишь после удаления сапфировой подложки. Этот процесс хорош тем, что позволяет одновременно обрабатывать нескольких подложек.

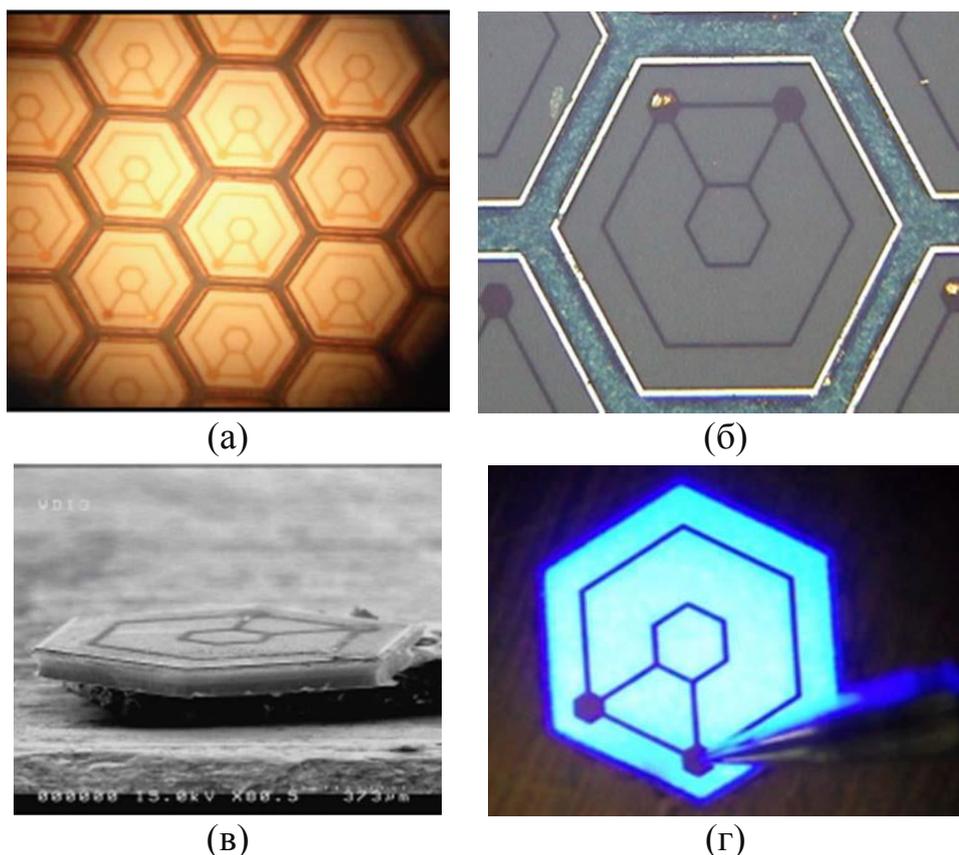


Рис. 138. Чипы Vertical с продольным сечением гексагональной формы, разделённые с помощью травления: набор чипов до разделения (а); светодиодный чип, закреплённый на липком носителе (б); изображение светодиодного чипа, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (в); светодиодный чип в процессе излучения света (г).

Примером могут служить чипы Verticle, гексагональные в продольном сечении. К достоинствам этих чипов относятся улучшенное растекание тока, практически круговое распределение света с поверхности и большее количество чипов с одной подложки. На рис. 140 представлены оптические фотографии кластера таких чипов на подложке до разделения на отдельные чипы (а), отделённый чип, перенесённый на липкий носитель (б), изображение чипа в сканирующем электронном микроскопе (в) и светодиодный чип в процессе излучения света (г).

5.2.2. Автоматизация анализа дефектов

Для повышения выхода годных чипов с пластины необходимы анализ и устранение причин возникновения дефектов — нарушений целостности эпитаксиального слоя, загрязнений на поверхности пластины, сколов и трещин. Процедура поиска дефектов и причин их появления содержит много трудоёмких операций, выполняемых человеком. В частности, сортировка и просмотр данных о дефектах, получаемых на контрольно-измерительном оборудовании, занимает несколько часов в день.

Когда инженер-технолог находит подложку с дефектом, он должен понять, в каком ростовом слое и на каком этапе появился данный дефект, какой процесс при этом осуществлялся, и какой модуль технологического оборудования при этом использовался. Принимая во внимание количество процессов и сложность процедур эпитаксиального роста и постростовых обработок, естественно ожидать, что решение проблемы может потребовать несколько дней анализа и оптимизации процесса. Альтернативой является автоматическая линия, которая позволяет проводить мониторинг поверхности ростовой подложки, анализ пространственных данных и источников дефектов и выдавать отчёт, в котором будут представлены предполагаемые причины их образования.

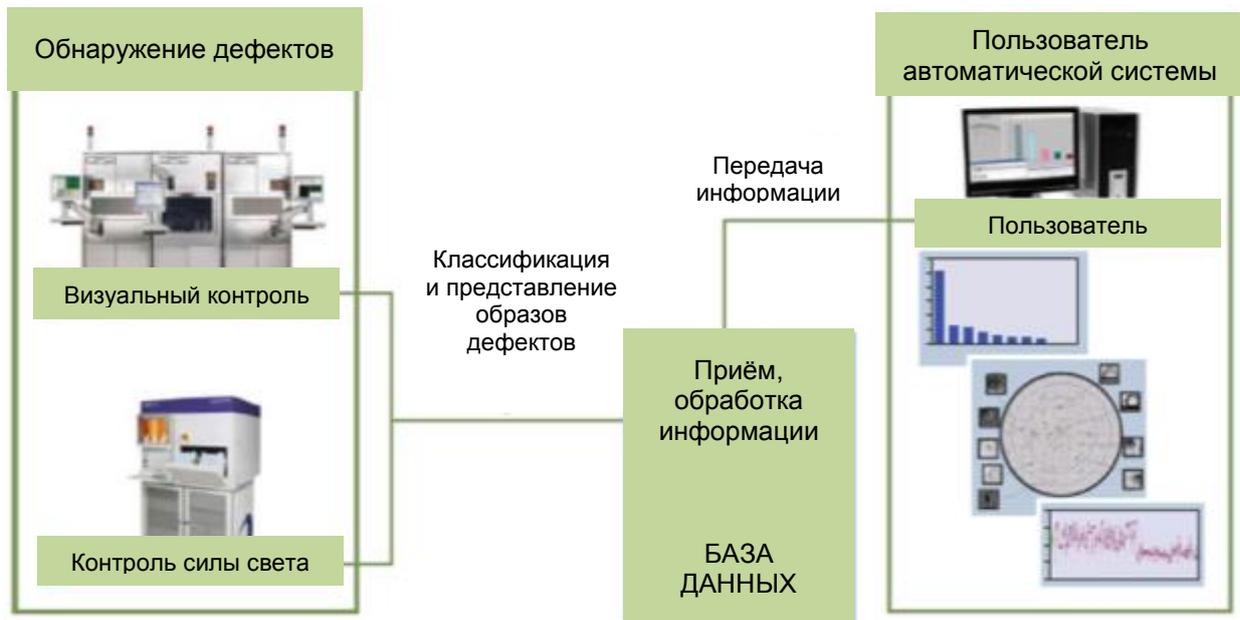


Рис. 139. Передача данных в автоматической системе анализа причин возникновения дефектов.

На рис. 139 приведена схема передачи данных между основными промышленными установками, которые используются в процессе детектирования дефектов на линии производства чипов. Результаты, полученные на измерительном оборудовании, поступают в базу данных. Обращаясь к базе данных, пользователь получает доступ к информации о виде, размере и месте нахождения дефектов, а с помощью программного обеспечения может запросить карту полупроводниковой пластины, контрольные графики, график Парето, изображения дефектов и другие данные, необходимые для проведения анализа.

Осуществление сбора данных при помощи автоматической линии существенно увеличивает скорость приёма, обработки и передачи информации, снижает человеческий фактор. На рис. 140 приведён сценарий осуществления работы при определении источника дефектов, а на рис. 141 — алгоритм обнаружения типа дефекта среди заложенных в программу. На рис. 142, в частности, показано видоизменение одного и

того же дефекта при проведении последующих операций технологического процесса.

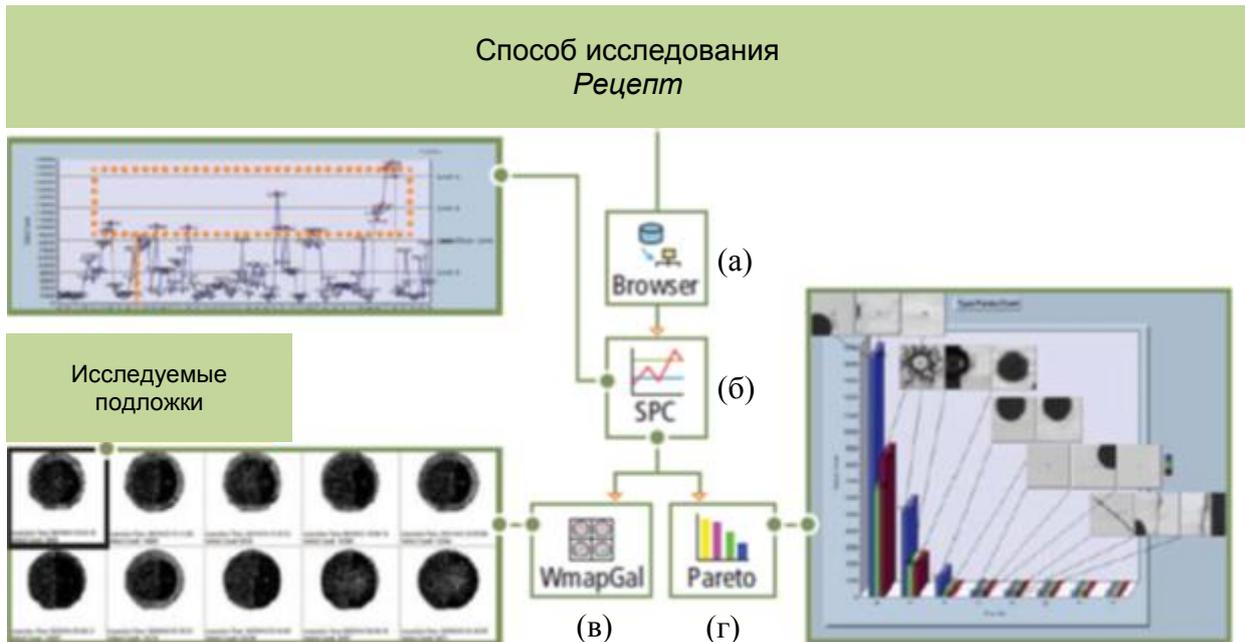


Рис. 140. Сценарий работы функционального узла обнаружения дефектов при передвижении системы машинного зрения над поверхностью пластины: ввод алгоритма исследования (а), итоговые графики статистического анализа дефектов контроля процессов (б), набор карт полупроводниковых пластин (в), типы дефектов по Парето (г).

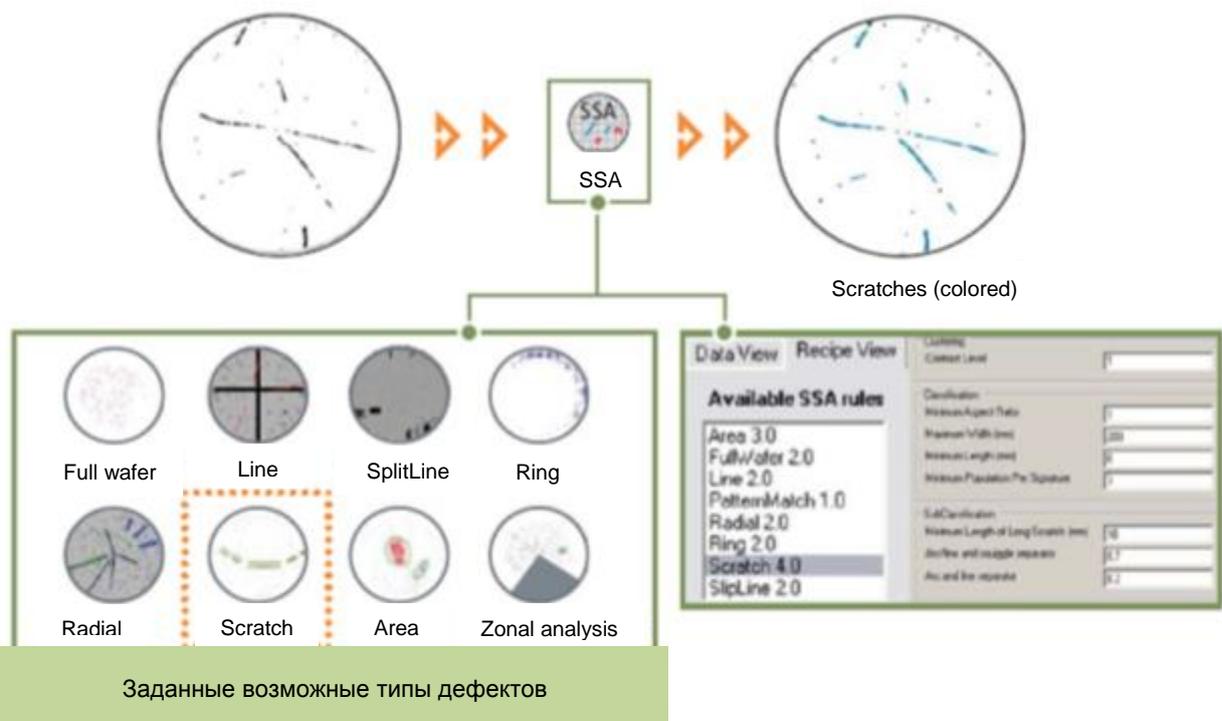


Рис. 141. Процесс передачи данных в программном пакете случае анализа пространственных данных (*spatial signature analysis*).

Видоизменение дефектов в процессе проведения процессов формирования приборной структуры

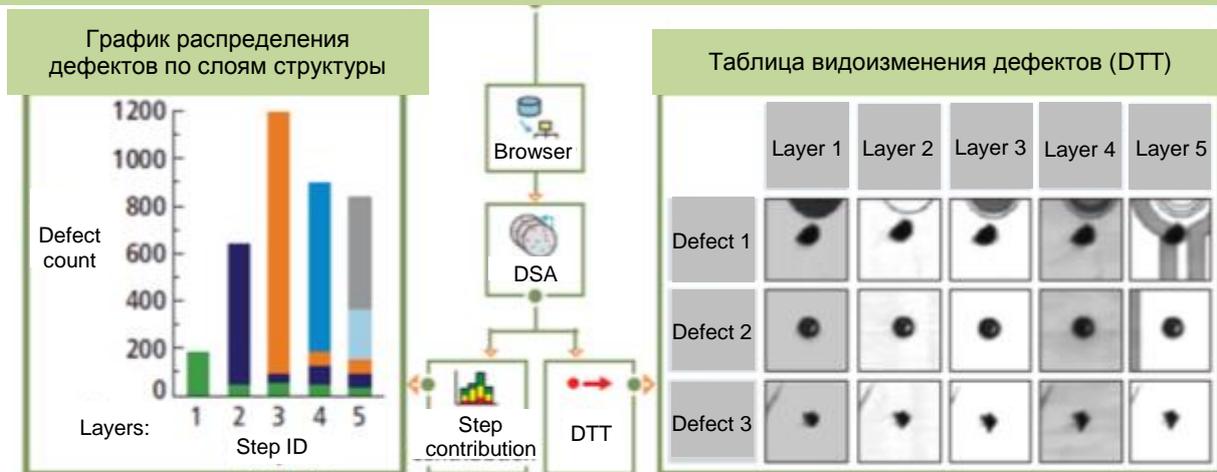


Рис. 142. Пример проведения типового анализа источников дефектов (*defect source analysis*) и формирование структурированных данных о видоизменении дефектов (*defect transition table*) в процессе формирования очередного слоя прибора.

Проведение трех видов анализа позволяет значительно повысить эффективность систематического анализа дефектов для улучшения условий серийного производства светодиодов. Подобная линия (KLA-Tencor Klarity LED) установлена на заводе компании Philips Lumileds в 2012 г.

5.2.3. Создание светодиода на уровне подложки

Для уменьшения количества технологических процессов и расхода материалов, а также для увеличения производительности светодиода можно создавать на уровне подложки. Эта технология заключается в следующем: в сформированные на кремниевой пластине полости, играющие роль корпуса, вставляются светодиодные чипы; внутри полости монтируются выводы; в случае необходимости чипы покрываются люминофором и закрываются линзой (рис. 143). В дальнейшем полученная пластина с готовыми, связанными между собой светодиодами, разделяется на отдельные светодиоды.

Данный процесс в английской литературе получил название «*wafer level packaging*».

Преимуществами технологии являются:

- ❖ высокая теплопроводность за счет кремниевой подложки, которую в дальнейшем можно улучшить путём заполнения дополнительно созданных отверстий медью;
- ❖ уменьшенное количество соединений за счет проведения сборки «на одном уровне», то есть на одной подложке;

- ❖ хорошее согласование коэффициентов теплового расширения Si и GaN и, как следствие, высокая надёжность получаемых устройств;
- ❖ проведение тестирования и сортировки на уровне подложки.

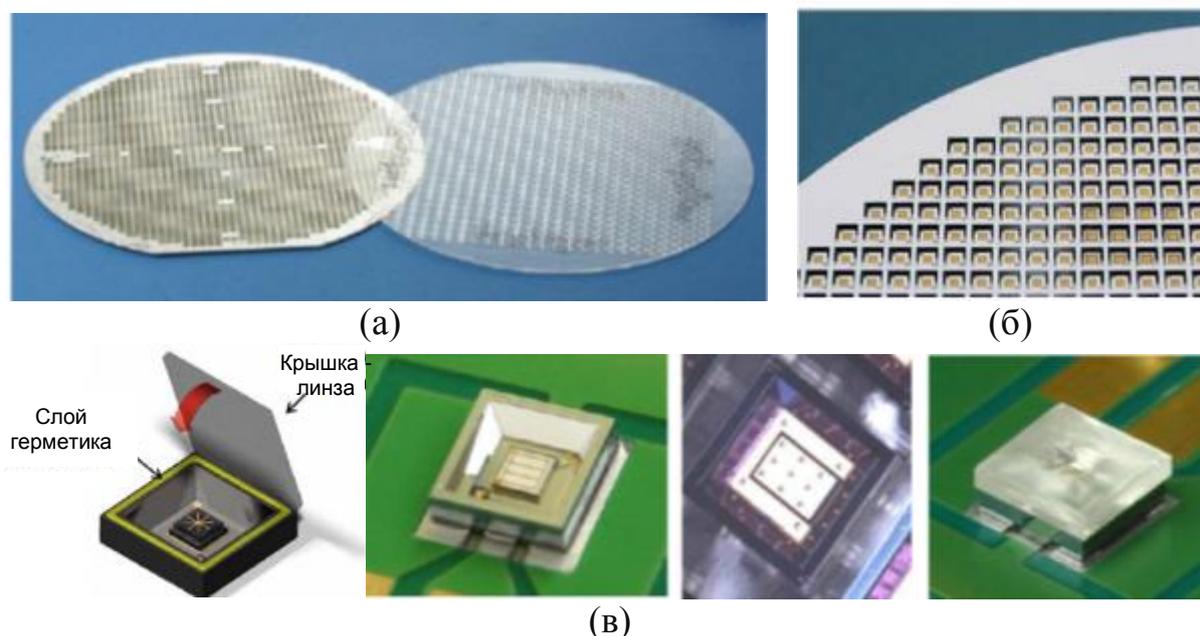


Рис. 143. Продукты производства светодиодов по технологии «на уровне подложки» от компании Numite (в 2010 г. приобретена компанией Touch Microsystem Technology): пластины со сформированными полостями для переноса в них полупроводниковых чипов (а); светодиодные чипы, размещённые в полостях подложки (б); внешний вид светодиодов (в).

Стоимость таких устройств можно оптимизировать за счет снижения затрат на заполнение медью созданных отверстий в кремнии, которые в заполненном виде обеспечивают электрическое и тепловое соединения. Такая технология успешно применяется в производстве светодиодов с высокими характеристиками. При этом ставится задача по её дальнейшему развитию и распространению на подложки из других материалов, в частности, на керамические.

Специалисты считают возможным понизить стоимость изготовления таких светодиодов в 10 раз за счет комбинации:

- ✓ улучшения технологии для достижения большей эффективности и увеличения светового потока с единичного чипа;
- ✓ совершенствования производства в части используемого оборудования, автоматизации и тестирования продукции в едином цикле;
- ✓ экономии от серийного выпуска изделий;
- ✓ большей интеграции;
- ✓ стандартизации изделий.

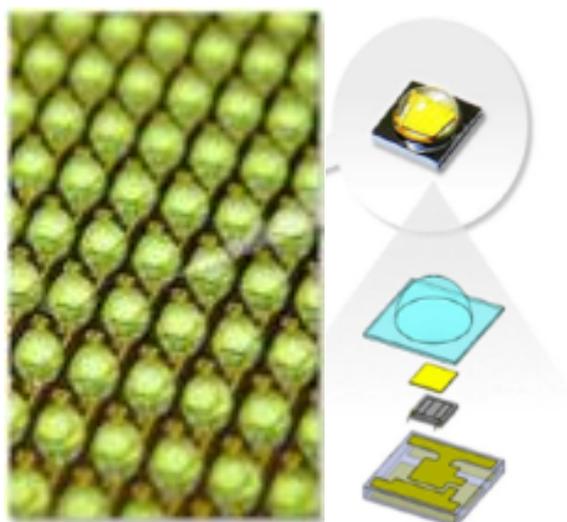


Рис. 144. «Упаковка светодиодов» на уровне подложки от компании VisEra Technology.

Сейчас светодиодная промышленность находится на пике своих производительных сил, так что имеются все возможности для разработки и совершенствования производства высокотехнологичных и высокоэффективных светодиодных изделий.

На рис. 144 представлены светодиоды компании VisEra Technology, созданные с помощью технологии «*wafer level packaging*» и схема создания таких устройств.

5.3. Государственная поддержка развития технологии светодиодных устройств

Важным фактором, влияющим на скорость принятия массовым потребителем продуктов светодиодного освещения, является поддержка государства. Каждая из развитых стран мира выделяет субсидии, направленные на реализацию программ по сокращению использования ресурсов, в том числе, электрической энергии. Граждане этих стран получают информацию о необходимости перехода на более высокоэффективные источники света из средств массовой информации. Запрет на производство и продажу низкоэффективных устройств также вынуждает покупателей искать альтернативные продукты.

Государственная поддержка нужна не только для стимулирования продаж светодиодных изделий, пришедших на замену традиционных источников света. Для повышения энергоэффективности отраслей промышленности, в которых вместо традиционных и, в большинстве случаев, низкоэффективных источников света или излучения есть возможность произвести замену такового на светодиодный источник, который позволит сэкономить электрическую энергию, при этом увеличит функционал разрабатываемого устройства, снизит нагрузку на окружающую среду, затраты на обслуживание, государством выделяются субсидии организациям и научным центрам.

Государство содействует предприятиям светодиодной промышленности, привлекая ведущих специалистов в области твердотельного освещения к разработке стандартов на проведение измерений, тестирование, производство светодиодов и источников твердотельного освещения. Оно поощряет создание альянсов

производителей для обмена опытом, совершенствования технологий и устройств, разработки и передачи будущим потребителям доступной информации о преимуществах светодиодного освещения.

Правительство Российской Федерации 9 апреля 2010 г. утвердило постановление № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Целью государственной поддержки было:

- развитие кооперации российских вузов и производственных предприятий,
- развитие научной и образовательной деятельности в российских вузах,
- стимулирование использования производственными предприятиями потенциала российских вузов для развития наукоёмкого производства и стимулирования инновационной деятельности в российской экономике.

27 декабря 2010 г. в Российской Федерации была утверждена Государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», нацеленная на высокоэффективное использование электроэнергии во всех отраслях экономики России и на методическое, информационное и кадровое обеспечение мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. В рамках мероприятий Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» государством активно поддерживались научно-исследовательские, опытно-технологические и опытно-конструкторские работы, направленные на сохранение электроэнергии.

Для скорейшего принятия потребителями новых продуктов высокоэффективной светодиодной технологии во многих странах введён запрет на производство и продажу низкоэффективных ламп накаливания. В Таблице 18 отражены ограничения и запреты на использование этих ламп в ближайшие годы.

Сейчас светодиодные источники света активно вытесняют источники света предыдущего поколения. Заменяются офисные светильники, светильники для промышленных предприятий, муниципалитетов, светильники уличного освещения. Замена ламп накаливания в бытовой сфере происходит гораздо медленнее из-за относительно высокой стоимости светодиодного источника света для обывателя. Поэтому так важна государственная поддержка, которая выражается в информировании населения о пользе и выгоде продуктов новой технологии.

Для примера рассмотрим ситуацию в Японии. В следующие несколько лет в Японии задействуют самое большое количество светодиодных ламп и светильников. Это ситуация обусловлена высокой стоимостью электроэнергии: после разрушения в результате цунами в

марте 2011 г. ядерного реактора в Фукусиме в стране в целях безопасности были отключены все ядерные реакторы (5 мая 2012 г. был отключён последний работающий ядерный реактор).

Таблица 18. Начало действия запрета на использование ламп накаливания в зависимости от потребляемой мощности в разных странах

Страна	2010	2011	2012	2013	2014
США			100 Вт	75 Вт	40; 60 Вт
Канада			100 Вт	75 Вт	40; 60 Вт
Китай			100 Вт		75; 60 Вт
Мексика			100 Вт	75 Вт	40; 60 Вт
Россия					Запрещено
Куба	Запрещено				
Аргентина		Запрещено			
Евросоюз	100; 75 Вт	60 Вт	15–40 Вт	Запрещено	
Великобритания	100; 75 Вт	60 Вт	15–40 Вт	Запрещено	
Южная Корея			Запрещено		
Япония			Запрещено		
Филиппины					
Малазия	100 Вт	75 Вт	60 Вт	40 Вт	Запрещено
Австралия	Запрещено				

Таблица 19. Потребление электроэнергии потребителями освещения в Японии на июль 2011 г.

Потребители	Количество источников света, шт.	Годовое потребление энергии лампами накаливания и люминесцентными лампами, млрд. кВт·ч	Годовое потребление энергии светодиодными источниками, млрд. кВт·ч	Экономия, млрд. кВт·ч
Дома	870 000 000	38.2	14.1	24.1
Офисы и коммерческие здания	580 000 000	89.1	34.6	54.5
Производства	160 000 000	23.3	9.7	13.6
Общий итог	1 610 000 000	151	58	92

Исследование, проведённое Институтом экономики энергетики Японии в июне 2011 г., показало, что при замене всех ламп на светодиодные можно будет уменьшить годовое потребления энергии в Японии на 9%. Однако замена всех люминесцентных ламп и ламп накаливания окажется дорогостоящим мероприятием и составит 194 млрд. \$. Замена только всех ламп накаливания более целесообразна, поскольку потребует всего 10.5 млрд. \$ и при этом позволит сэкономить 27.3 млрд. кВт·ч. Результаты исследования приведены в Таблице 19.

5.4. Образование и стандарты в сфере светодиодных технологий

5.4.1. Образование в сфере светодиодных технологий

На данный момент у основных потребителей ламп накаливания и люминесцентных ламп, используемых для освещения жилых домов, отсутствует чёткое понимание преимуществ светодиодных технологий. Связано это с нехваткой доступной и ясной информации. Поэтому образование в сфере светодиодных технологий становится неотъемлемой частью экономики и будущего светодиодных источников света.

В Российской Федерации в 2012 г. началась разработка образовательной программы по подготовке магистров по направлению 200400.68 «Светодиодные технологии». Магистры, получившие образование в рамках этой программы, будут обладать знаниями в области разработки и производства светоизлучающих наногетероструктур, технологий изготовления светодиодов и приборов на их основе. Программа реализуется при поддержке фонда инфраструктурных и образовательных программ ОАО «РОСНАНО». В дальнейшем при поддержке фонда ОАО «РОСНАНО» эта программа будет помещена в реестр электронных образовательных программ и будет транслироваться в другие вузы России.

Получение базового образования, в частности, о характеристиках светодиодных устройств, требуется и обычным пользователям устройств освещения для того, чтобы сделать правильный выбор в пользу качественного высокоэффективного источника света среди множества твердотельных источников света.

Быстрый рост твердотельного освещения привёл появлению на рынке устройств для самых разных приложений. Если некоторые продукты действительно являются превосходными новинками и способны экономить энергию при использовании твердотельных источников, то появляется и довольно много продуктов низкого качества. Последние становятся препятствием на пути к использованию твердотельных источников излучения, поскольку создают неверное представление о реальных возможностях подобных источников, задерживают принятие продукта рынком и неблагоприятно представляют всю промышленность твердотельных источников освещения. Подобная же ситуация возникла в начале формирования рынка освещения на основе компактных флуоресцентных ламп, задержала принятие рынком КФЛ-продуктов и лишила потребителей возможности экономить энергию в последующие годы.

Чтобы избежать или, по крайней мере, снизить остроту этой проблемы на растущем рынке твердотельного освещения, Министерство энергетики США призывает действующих на этом рынке производителей составить в качестве эталона качества твердотельных осветительных

продуктов базу данных на основе постоянно появляющихся в открытом доступе информационных сообщений, содержащих точные и полные технические характеристики продуктов. Информация должна быть представлена как на маркировке продукта и на его упаковке, так и в литературе, описывающей изделие в общем открытом доступе, в прессе, а также в сопроводительном листе технических данных на изделие, подготовленных производителем.

Для повышения открытости информации о появляющихся твердотельных источниках света на основе светодиодов Комитет департамента энергии США (Department of Energy USA, DOE) совместно с Промышленным альянсом нового поколения освещения создали официальные представительства, сотрудники которых могут проводить и отслеживать тестирование новых продуктов, от светодиодного чипа до светодиодного светильника, и до самой технологии изготовления светодиодных изделий.

5.4.2. Разработка стандартов в сфере светодиодных технологий

Разработка стандартов — это основа успеха новой технологии, поскольку сравнивая устройства, выпущенные различными производителями, но характеристики которых были измерены по одинаковым методикам и стандартам, легко сделать выбор в пользу лучшего образца. Если же измерения проведены не по стандарту, а способ и условия измерений не описаны, то провести достоверное сравнение устройств просто невозможно.

Несмотря на наличие значительного количества стандартов, распространяющихся на источники света и их источники питания, для светодиодных технологий нужны специальные стандарты, посвящённых светодиодным продуктам, способам измерения их характеристик и технологиям твердотельных источников освещения. Такие особенности светодиодов, как сильная зависимость оптических и электрических свойств от температуры, необходимость в определённых источниках питания, биннинг и другие требуют разработки новых специализированных нормативных документов.

Стандарты, действующие на территории Российской Федерации, можно найти в п. 3.5.2., а также в [51].

5.4.3. Экологическая безопасность светодиодной продукции

Замена существующих систем освещения на светодиодные позволит существенно сократить выбросы углекислого газа в атмосферу. По имеющимся оценкам, если заменить все существующие металлогалогенные, галогенные и флуоресцентные лампы на светодиодные, то удастся сократить выбросы CO₂ ровно в половину (рис. 145). Кроме того, в отличие от люминесцентных ламп, светодиодные

источники света не содержат ртути, безопасны при использовании и утилизации.

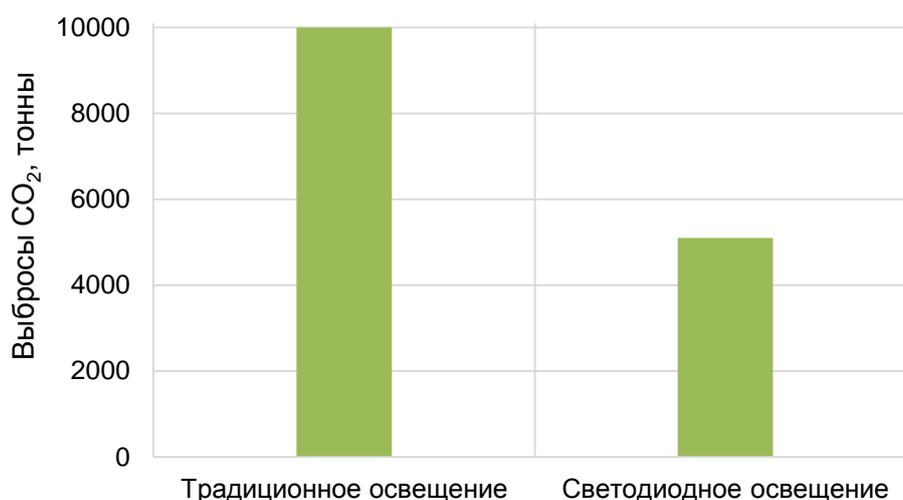


Рис. 145. Уменьшение выбросов углекислого газа за 10 лет при замене традиционных ламп (металлогалогенных, галогенных и флуоресцентных) светодиодным.

5.4.4. Трудности принятия твердотельного освещения

Ниже перечислены некоторые факторы, которые мешают или сдерживают быстрое принятие осветительных устройств на основе светодиодов.

Высокая стоимость. Стоимость светодиодных источников света обусловлена стоимостью самих светодиодов, разработкой и изготовлением светодиодных светильников, в том числе разработкой системы теплового управления, источника питания, корпуса и оптической системы.

Отсутствие высокоэффективных светильников. Сохранить уровень достигнутой световой эффективности единичных источников света при изготовлении светильника — это непростая задача, поскольку кластеризация светодиодов или использование систем «чип на плате» несколько теряют в эффективности, а наличие дополнительных элементов в оптике (в частности, рассеивателей) поглощает часть светового потока, также понижая эффективность светодиодного светильника. При этом использование активных систем охлаждения, так же как и специализированного, созданного под светильник, источника питания, может её повысить. Правда, это все непростые способы, требующие дополнительных временных, умственных и материальных затрат.

Недостаточная надёжность светодиодных светильников. В настоящее время на рынке светодиодного освещения можно встретить продукты плохого качества. Значения характеристик таких устройств, полученные по результатам тестирования, оказываются значительно ниже заявленных. Отсутствие принятых по всему миру единых стандартов по

методам тестирования светодиодных источников и отсутствие обучения расчётам светодиодных светильников формируют отрицательное мнение о светодиодных источниках. Стоит отметить важность участия конструкторских отделов в разработке светотехнических изделий на основе светодиодов.

Трудность изготовления светодиодного источника высококачественного белого света с высокой световой эффективностью. На данный момент существует проблема сочетания высокого индекса цветопередачи с высокой эффективностью светодиодного источника света, поскольку добавка красного излучения в спектр светильника повышает его CRI, но снижает при этом его эффективность. Получение более эффективных чипов синего света и люминофоров с увеличенным коэффициентом преобразования света способствовало бы повышению эффективности таких устройств. Другим решением является использование системы RGB, но здесь есть свои трудности, требующие учёта и решения, в частности, сильная зависимость характеристик чипов разных цветов излучения от рабочей температуры.

5.4.5. Конкурирующие технологии

Основным конкурентом светодиодных ламп на сегодня являются компактные флуоресцентные лампы, которые обладают схожей или более высокой эффективностью в составе светильников, но имеют и существенные недостатки, в первую очередь — более низкое качество света и наличие ртути.

В сфере уличного освещения серьёзную конкуренцию светодиодным светильникам по показателю эффективности составляют светильники на основе газоразрядных натриевых ламп. Их эффективность пока превосходит эффективность светодиодных источников света, однако это временное превосходство. Другая особенность светильников на основе натриевых ламп — жёлтый спектр излучения. В большинстве случаев он является менее комфортным для восприятия на дороге.

5.4.6. Основные компании-изготовители полупроводниковых источников света

Основными компаниями-лидерами на рынке полупроводниковых источников света являются: Nichia Corporation, Samsung LED, Osram Opto Semiconductors, LG Innotek, Seoul Semiconductor, Cree Incorporation, Philips Lumileds Lighting Company, Sharp, TG-Light Optoelectronic, Everlight Electronics, Cree, Bridgelux, General Electric, SemiLEDs, Epistar, Оптоган, Световые технологии, Фокус и многие другие.

5.5. Прогнозы развития светодиодных устройств

Прогнозирование является важным этапом для развития рынка, поскольку задаёт динамику развития и стимулирует компании, занятые в

сфере светодиодных технологий по всему миру, совершенствоваться ускоренными темпами.

5.5.1. Прогнозы развития светодиодов

Совершенствование светодиодов возможно при условии решения ряда задач, основными из которых являются кардинальное снижение световых и тепловых потерь в материалах чипа, люминофора и корпуса.

Эффективность светодиодов, максимальное значение которой, как предполагалось ранее, лежит в интервале 320–360 лм/Вт, по данным [52], может составить 408 лм/Вт при использовании системы RGBA (*red–green–blue–amber*). При этом качество света — показатель индекса цветопередачи — будет находиться на высоком уровне 90. На рис. 146 (а) показаны теоретически возможная эффективность светодиода системы RGBA и спектры излучения 4-х видов светодиодов этой системы. На рис. 146 (б) представлена диаграмма цветности с координатами источника излучения, имеющего CCT = 3000 К, CRI = 90 и эффективность 408 лм/Вт.

Чтобы достичь такого высокого показателя эффективности, красные светодиоды должны обладать гораздо более узкими линиями излучения с FWHM < 5 нм для устранения потерь энергии, вызванных излучением в красной области спектра, где чувствительность человеческого глаза незначительна. Для синих светодиодов ширина пика менее значима, так как тёплый белый свет получают за счет большей интенсивности линии красного света, чем синего. Для зелёных и жёлтых светодиодов узость спектральных линий не принципиальна, поскольку чувствительность глаза при излучении волн длиной 555 нм максимальна и равна 1.

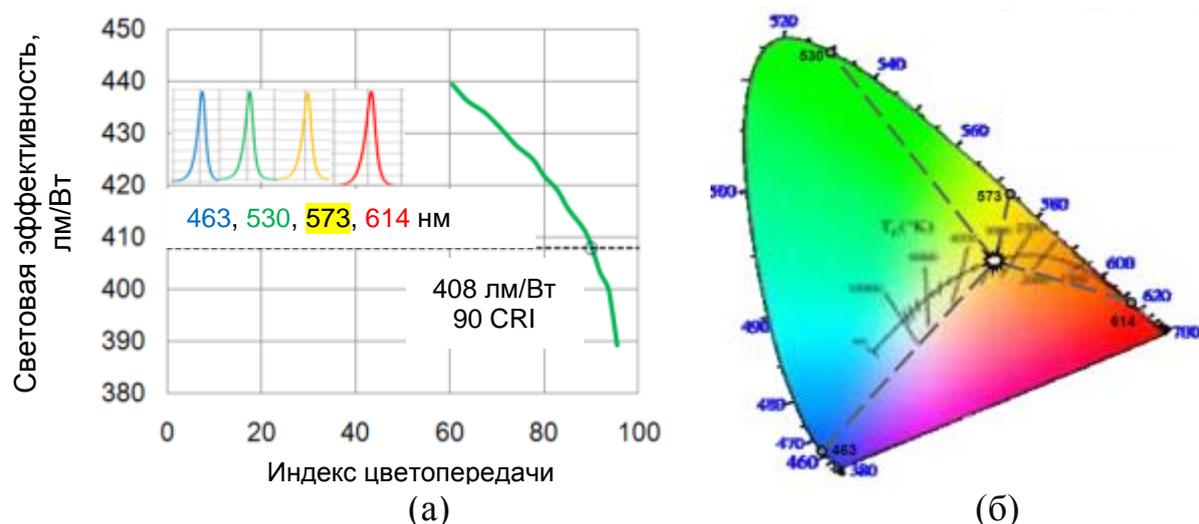


Рис. 146. Теоретически возможная световая эффективность светодиода системы RGBA, спектры излучения 4-х видов светодиодов (а) и диаграмма цветности с координатами источника излучения, имеющего CCT = 3000 К, CRI = 90 и эффективность 408 лм/Вт (б).

Однако для получения высокого индекса цветопередачи диапазон видимого спектра должен быть полностью перекрыт источниками излучения. Чем короче при этом длина волны красного света, тем эффективнее устройство, и при оптимальном значении в 614 нм достигается эффективность в 286 лм/Вт. В Таблице 20 приведены рекордные достигнутые показатели эффективности светодиодных источников света на основе светодиодов.

Таблица 20. Лучшие показатели эффективности светодиодных источников

Литературный источник	ССТ, К	CRI	$\Delta\lambda$, нм	Количество цветов, шт.	Эффективность, лм/Вт
Zukauskas, Applied Physics Letter, 2002	4870	80	30	3	320
Ohno, SPIE 2004	3300	80	20–30	3	359
Ohno, SPIE 2004	3300	91	20–30	4	347
Phillips/Ohno, Las Phot Rev 2007	3000	90	1	4	408

Для получения эффективности 286 лм/Вт со светодиодного устройства на основе системы RGBА необходимы:

- высокая внутренняя квантовая эффективность светодиодов начальных длин волн красного диапазона (615–625 нм);
- высокая внутренняя квантовая эффективность светодиодов жёлто-зелёной области спектра (530–570 нм);
- высокий внутренний квантовый выход синих светодиодов (460–465 нм).

Для достижения этого на материале оптоэлектроники InGaN необходимо изучить и устранить, или ослабить действие:

- ✓ пространственных дефектов;
- ✓ точечных дефектов;
- ✓ поляризационных полей;
- ✓ неоднородности состава;
- ✓ спада эффективности с ростом тока.

Помимо этого необходимо искать способы получения качественных полупроводников на основе AlInGaP и искать альтернативные материалы, например, на основе полупроводниковых соединений элементов II-VI группы таблицы Менделеева.

Для получения узкого пика излучения (< 20 нм) в начальной области красного света за счет использования люминофора с пиком поглощения при 460–465 нм развиваются:

- люминофоры с характерным размером частиц порядка микрометров;
- наноразмерные люминофоры (*nanophosphors*), в которых используется активность поверхности. Такие люминофоры разрабатываются и

совершенствуются путём подбора состава металлических компонентов и концентрации примесей;

- люминофоры на квантовых точках (*quantum dots phosphors*), которые наименее токсичны при производстве коллоидным методом, монодисперсны и допускают повторную адсорбцию;
- полупроводники с многократным использованием фотонов (*photon recycling semiconductors*);
- светоизлучающие структуры с прямым преобразованием энергии.

Высокая эффективность (> 90%) и направленное извлечение света возможны за счет использования:

- фотонных кристаллов для управления выводом излучения и внутренним квантовым выходом;
- стимулированного излучения светодиодов с резонатором RCLED (*resonant cavity light emitting diodes*) и лазерных диодов LD (*laser diode*);
- работы в режиме сильной связи;
- плазмонных эффектов, включая метаматериалы.

В Таблицах 21 и 22 даны прогнозы развития светодиодов белого света [52, 53].

Таблица 21. Прогноз развития тёплых белых светодиодов, действующих на основе преобразования излучения люминофора [52]

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Электрическая эффективность	90%	95%
Внутренний квантовый выход синих светодиодов	80%	90%
Вывод излучения	80%	90%
Спад внешнего квантового выхода от пикового значения до значения при 35 А/см ²	8%	0%
Эффективность преобразования люминофора	58%	72%
Рассеяние и поглощение при смешивании цветов	20%	10%
Спектральная эффективность	77-80%	95%

Поскольку спад внешней квантовой эффективности от пикового значения до значения при плотности тока в 35 А/см² в 2009 г. составил 15%, а в 2010 г. — 8%, эксперты прогнозируют, что к 2020 г. развитие технологии обеспечит нулевое снижение эффективности при тех же условиях.

Эффективность преобразования люминофора должна оцениваться после его нанесения на чип. Ожидается усовершенствование существующих или появление новых технологий нанесения люминофора на источник света.

Таблица 22. Прогноз развития белых светодиодов, действующих на основе преобразования излучения системы RGBA

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Электрическая эффективность	90%	95%
Внутренний квантовый выход синих светодиодов (IQE, blue)	80%	90%
Внутренний квантовый выход зелёных светодиодов (IQE, green)	40%	90%
Внутренний квантовый выход красных светодиодов (IQE, red)	75%	90%
Внутренний квантовый выход янтарных светодиодов (IQE, amber)	20%	90%
Вывод излучения	80%	90%
Спад внешнего квантового выхода от пикового значения до значения при 35 А/см ²	92%	100%
Рассеяние и поглощение при смешивании цветов	20%	10%
Спектральная эффективность	< 75%	95%

Четырёхкомпонентные системы RGBA, которые часто применяются в экранах большой площади, призваны обеспечить эффективность внутреннего преобразования энергии в светодиодах янтарного цвета в 90%, в то время как на данный момент она составляет всего 20%. При улучшении этого показателя повысится также спектральная эффективность.

5.5.2. Прогнозы развития светодиодных систем, работающих на переменном токе

Светотехнические устройства, работающие на переменном токе, не требуют драйвера, что позволяет уменьшить их габариты. Хотя производительность таких систем оказывается ниже из-за неполного использования мощности излучения светодиодов, их развитие связано с отсутствием необходимости в разработке драйвера и с применением высоковольтных чипов, на которых значительно проще изготавливать светодиоды.

Одной из компаний, нацеленных на разработку и внедрение светодиодных систем, работающих на переменном токе, является Lunk Labs, которая совместно со стратегическими партнёрами Citizen, Epistar,

Everlight и UnityOpto развивает это направление для различных приложений.

На рис. 147 представлены схемы и сигналы светодиодных устройств, построенных на высоковольтных светодиодах, традиционных светодиодах (невысоковольтных), светодиодах, объединённых по схеме для работы на переменном токе.

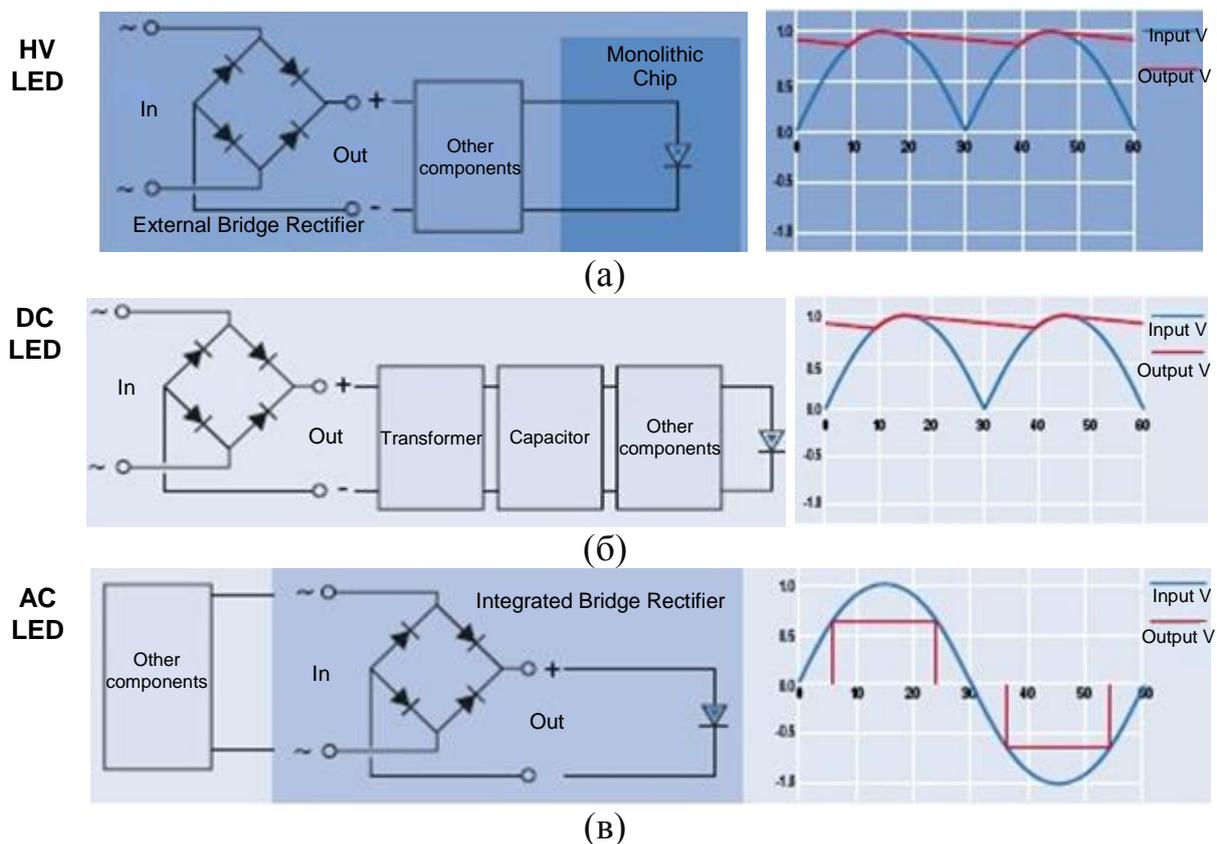


Рис. 147. Необходимые компоненты светодиодных источников света на высоковольтных светодиодах *HV LED* (а), светодиодах, работающих на постоянном токе *DC LED* (б), и светодиодах, работающих на переменном токе *AC LED* (в).

В серии светодиодных изделий Everlight HV Series производства компании Everlight сочетаются эффективность светодиодов постоянного тока и простота изготовления светодиодных систем, работающих на переменном токе. Для неё характерны миниатюрный дизайн, яркость без мерцания и долговечность. Серия представлена светодиодами мощностью 1, 2 и 4 Вт со следующими параметрами:

1 Вт – 90 лм/Вт, 5700 К, 20 мА, CRI = 70;

2 Вт – 67 лм/Вт, 2700 К, 20 мА, CRI = 80;

4 Вт – 60 лм/Вт, 3000 К, 20 мА, CRI = 80.

Преимуществом этих устройств является возможность увеличения эффективности за счет отсутствия потерь электроэнергии при преобразованиях AC-DC и DC-AC в драйвере.

Другой пример — светодиодный модуль AirglowOne (рис. 148) производства компании GTBiomeScilt, построенный по схеме АС-АС, которая не требует использования драйвера. Характеристики этого модуля приведены в Таблице 23.



Рис. 148. Светодиодный модуль AirglowOne, работающий на переменном токе без использования драйвера.

Таблица 23. Характеристики модуля AirglowOne производства компании GTBiomeScilt, работающего на переменном токе без использования драйвера

Характеристика	Значение
Продолжительность эксплуатации, ч	50 000
Входное напряжение при частоте 50/60 Гц, В	220–240
Световой поток, лм	1500, 2500, 3500
Коррелированная цветовая температура, К	2800, 4000
Индекс цветопередачи	> 80
Угол излучения	120°
Мощность, Вт	16, 28, 39
Эффективность модуля, лм/Вт	90
Размеры модуля, мм - круглой внутренней части - габаритные размеры	Ø 80×12 80×80×12.4
Рабочая температура, °С	< 65
Необходимость в радиаторе	есть

Светодиодные источники света, работающие на переменном токе, обладают достаточно простой и компактной конструкцией, малым числом компонентов и низкой стоимостью. Однако светодиодная нагрузка не получает постоянного тока. Ток может меняться в течение времени и при переходе от одного светодиода к другому. Из-за этой и других особенностей срок службы таких изделий может уменьшаться, а при работе светодиодного источника будет заметно некоторое мерцание.

Следовательно, этот подход можно использовать для продукции нижнего ценового сегмента для решения определённых задач по освещению. Хотя такое конструктивное решение также предлагается и в лампах, выпускаемых для замещения ламп накаливания, чтобы ускорить проникновение светодиодных ламп на рынок осветительных устройств.

В конструкциях высоковольтных светодиодов для выпрямления переменного тока используются обычные диоды, а для контроля тока — простейшие элементы микросхемы драйвера, такие, как сопротивления и конденсаторы. Такой подход годится для многих типов ламп, заменяющих традиционные, и для компактных светильников, где предпочтение часто отдаётся низкой цене и компактному размеру, а не сроку службы и эффективности. Однако такие решения не подходят для более дорогих и менее компактных приложений.

В настоящее время светодиодные устройства, в которых используется преобразование АС-АС, не получили широкого распространения по следующим причинам:

1. Слишком рано. На сегодняшний день невозможно определить, насколько успешны существующие подходы для производства высоковольтных светодиодов (HV-LED) и светодиодов переменного тока (AC-LED).
2. Слишком узкий спектр влияния. Новые подходы относятся только к определённым видам продукции.
3. Уровень стоимости источника питания. Возможно, что более дешёвые конструкции высоковольтных светодиодов и светодиодов переменного тока приведут к снижению цен на источники питания. Например, из-за таких инноваций стоимость источника питания может упасть до 1 \$, в то время как сама лампа, заменяющая традиционную, будет стоить всего 10 \$.
4. Управление уровнем освещённости и цветом светодиодного источника освещения. В светодиодных системах и в компактных флуоресцентных источниках света для управления яркостью требуются специально сконструированные источники питания, предусматривающие функцию диммирования — плавного управления световым потоком. Разные производители диммеров используют различные конструкции, поэтому светодиодные источники с функцией диммирования могут работать по-разному в зависимости от типа диммера. Некоторые производители источников питания предлагают возможности так называемого «умного» димминга (*smart dimming*), который позволяет управлять питанием светодиода в соответствии с выбранным типом диммирования.

5.5.3. Прогнозы развития светодиодных светильников

В Таблицах 24 и 25 приведены достигнутые по состоянию на 2010 г. показатели качества светодиодных изделий и прогнозы их изменения к 2020 г. [52, 54].

Предполагается, что включение янтарных светодиодов в светильник систему RGB существенно снизит тепловую стабильность светильника. Эффективность источника питания для светильника системы RGBA, которая должна была достичь 92%, по состоянию на 2010 г. оказалась ниже, всего 80–82%. С учётом этого целевой показатель 2020 г. — только 85%.

Таблица 24. Прогнозы развития светильников, созданных на базе тёплых белых светодиодов, в которых используется преобразование излучения люминофора [52]

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Дополнительный спад внешнего квантового выхода между 100 А/см ² и 35 А/см ²	23%	0%
Стабильность светового потока при изменении рабочей температуры	80%	90%
Термическая стабильность преобразования люминофора	85%	90%
Эффективность драйвера (источника питания и управляющей электроники)	85%	88–90%
Эффективность корпуса и оптической системы	84–90%	90%

Таблица 25. Прогнозы развития светильников на светодиодах системы RGBA

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Дополнительный спад внешнего квантового выхода между 100 А/см ² и 35 А/см ²	77%	100%
Стабильность светового потока при изменении рабочей температуры от 25 °С до 100 °С	85% (синий, зелёный) 50% (красный) 25% (янтарный)	95% (синий, зелёный) 75% (красный, янтарный)
Эффективность драйвера (источника питания и управляющей электроники)	80–82%	85%

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Эффективность корпуса и оптической системы	84–90%	90%

Изменения в температуре окружающей среды сказываются на характеристиках светильника. В настоящее время в интервале рабочих температур, заявленном изготовителем, лучшая стабильность светового потока составляет 80%. Ожидается, что к 2020 г. она достигнет 90%. Эффективность источника питания с учётом управляющей электроники в светодиодном светильнике составит 90% по сравнению с существующими на сегодня 85% (для источника питания, рассчитанного на подачу 40 Вт).

Основные этапы совершенствования характеристик светодиодов и светодиодных светильников приведены в Таблице 26 (характеристики светодиодов даны для плотности тока 35 А/см^2).

Ранее ожидалось, что к 2012 г. удастся достичь светового потока в 1700 лм со светильника, излучающего нейтральный белый свет. Однако запланированный для мощности 75 Вт, этот показатель оказался завышен, поэтому целью стало получение коммерчески привлекательного светильника со стоимостью менее 100 \$ за 100 лм/Вт при коррелированной цветовой температуре 3500 К, индексе цветопередачи 80, световом потоке 1000 лм и времени эксплуатации 50 000 ч. Основанием прогноза на 2015 г. является существующая себестоимость светодиода — 15–20 \$/кЛм. Ожидается, что в 2015 г. эффективность светодиода преодолеет барьер в 200 лм/Вт при цене 0.4 \$. К 2017 г. качество света всех светодиодных светильников станет высоким, а индекс цветопередачи будет не менее 80. Поскольку светильники интеллектуального освещения в зависимости от цели их применения и местонахождения могут сильно отличаться друг от друга, этот прогноз сделан на стоимость устройства, которое предназначено для освещения жилых помещений и содержит лишь некоторые интеллектуальные функции.

Таблица 26. Основные этапы развития белых светодиодов и светодиодных светильников

Год	Основные показатели и их значения
2008	Светодиод: эффективность 80 лм/Вт, стоимость < 25 \$/кЛм, 50 000 ч работы
2010	Светодиод: > 140 лм/Вт для холодного белого света и > 90 лм/Вт для тёплого белого света; < 13 \$/кЛм для холодного белого света
2012	Светильник: 100 лм/Вт; ~1000 лм; 3500 К; 80 CRI; 50 000 ч
2015	Светодиод: < 2 \$/кЛм для холодного белого света

Год	Основные показатели и их значения
2017	Светильник: > 3500 лм для нейтрального белого света; < 100 \$; >140 лм/Вт
2020	Светильник интеллектуального освещения: < 85 \$

В Таблицах 27 и 28 представлены данные об основных элементах и характеристиках светильников на основе органических светодиодов (OLED). Указанные значения приведены для устройства на базе органического светодиода с индексом цветопередачи больше 85 и коррелированной цветовой температурой в диапазоне 2580–3710 К при площади панели OLED больше 200 см². Ожидаемая к 2015 г. эффективность органических панелей будет ниже ожидаемой эффективности для светодиодов на основе GaN, уже сейчас равной 165 лм/Вт. Таким образом, чтобы устройства на основе органических светодиодов заняли достойное место на рынке осветительной техники, придётся ещё приложить значительные усилия по развития их технологии.

Таблица 27. Эффективность основных элементов светильника на базе органических светодиодов

Характеристики	2010 г.	Прогноз на 2020 г.
Светодиодная панель	20%	54%
Источник питания, драйвер, управление светодиодом	80%	90%
Корпус и оптическая система	70%	90%

Таблица 28. Основные показатели развития устройств на органических светодиодах

Год	Основные показатели и их значения
2008	> 25 лм/Вт, < 100 \$/кЛМ, 5000 ч (для одного пикселя)
2010	> 60 лм/Вт (панель)
2012	< 45 \$/кЛМ (панель)
2015	> 110 лм/Вт для панели при 10 000 лм/м ²
2018	50 000 ч; 10 000 лм/м ²

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Светодиодные технологии смело шагают в нашу повседневную жизнь в виде инновационных источников света, которые предлагают массу преимуществ по сравнению с традиционными.

На высокотехнологичном оборудовании благодаря разработкам научных сотрудников, инженеров и технологов из прекурсоров материалов электронной техники создаются светодиодные чипы, а на основе них — мощные светодиодные светильники.

Оптоэлектроника светодиодов лишь открывает перед Вами богатство и значимость наукоёмкого направления светодиодных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] А.Н. Пихтин. Квантовая и оптическая электроника. Санкт-Петербург: Абрис. 2012. 656 с.
- [2] Ф. Шуберт. Светодиоды. Перевод с английского под редакцией А.Э. Юновича. Москва: Физматлит, 2-е издание. 2008. 496 с.
- [3] Сайт компании «Оптоган» [Электронный ресурс]: www.optogan.ru. Режим доступа — открытый. Дата обращения 01.06.2013.
- [4] С.С. Суслов, К.А. Виноградова, В.Е. Бугров, М.А. Одноблюдов, А.Е. Романов. «Параметрическое моделирование светоизлучающих структур на основе III-нитридов» *Materials Physics and Mechanics*. **14** (1). 2012. p. 78–86.
- [5] J. Mickevičius, G. Tamulaitis, M. Shur, M. Shatalov, J. Yang et al. «Correlation between carrier localization and efficiency droop in AlGaIn epilayers» *Applied Physics Letters*. **103**. 2013. 011906.
- [6] С.Н. Wang, С.С. Ke, С.У. Lee, S.P. Chang, W.T. Chang, J.C. Li, Z.Y. Li, H.C. Yang, H.C. Kuo, T.C. Lu, S.C. Wang. «Hole injection and efficiency droop improvement in InGaIn/GaN lightemitting diodes by band-engineered electron blocking layer» *Applied Physics Letters*. **97**. 2010. 261103.
- [7] В.Е. Бугров. Физические основы оптимизации нитридных полупроводниковых гетероструктур для их применения в высокоэффективных светодиодных устройствах. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2013, 309 с.).
- [8] Флип-чип [Электронный ресурс]: http://en.wikipedia.org/wiki/Flip_chip. Режим доступа — открытый. Дата обращения 01.05.2013.
- [9] V.E. Bougrov, S.L. Rumyantsev, M.E. Levinshtein, A.S. Zubrilov. Chapter 1 «Gallium Nitride» in «Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe» edited by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur, New York: John Wiley & Sons. 2002. 216 p.
- [10] Samples of Market & Technology reports from Yole Development: [Electronic source]: <http://www.yole.fr/Reports.aspx>. Access mode: open. Period of enquiries: 2011–2013.
- [11] P.T. Törmä, O. Svensk, M. Ali, S. Suihkonen, M. Sopanen, M.A. Odnoblyudov, V.E. Bougrov. «Maskless roughening of sapphire substrates for enhanced light extraction of nitride based blue LEDs» *Solid-State Electronics*, **53** (2). 2009. p. 166–169.
- [12] Сайт компании «Cree» [Электронный ресурс]: www.cree.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения 02.06.2013.
- [13] Журнал Compound Semiconductors [Электронный ресурс]: <http://compoundsemiconductor.net/>. Режим доступа — открытый. Период обращения: 2008–2013.
- [14] O. Shchekin, D. Sun. «Evolutionary new chip design targets lighting system» *Compound Semiconductor*. **13** (2). 2007.
- [15] Спецификации на светодиоды Osram LED LT_CP7P, LB_CP7P, LR_CP7P [Электронный ресурс]: www.osram.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения: 11.2011.

- [16] Журнал LED Magazine [Электронный ресурс]: www.ledsmagazine.com. Режим доступа — открытый. Период обращения: 2008–2013.
- [17] С.Н. Липницкая, К.Д. Мынбаев, Л.А. Никулина, В.Е. Бугров, А.Р. Ковш, М.А. Одноблюдов, А.Е. Романов, Повышение эффективности вывода света из светодиодных модулей «chip-on-board» Оптический журнал. **12**. 2013.
- [18] О.Н. Казанкин, Л.Я. Марковский, И.А. Миронов. Неограниченные люминофоры. Москва: Химия. 1975. 192 с.
- [19] Сайт компании «Intematix» [Электронный ресурс]: www.intematix.com Режим доступа — открытый. Дата обращения 02.03.2013.
- [20] Сайт компании «Philips» [Электронный ресурс]: www.philips.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения 27.12.2012.
- [21] Сайт компании «GE lighting» [Электронный ресурс]: www.gelighting.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения 20.12.2012.
- [22] ГОСТ 23198-94. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик.
- [23] Сайт компании «Оптоган. Новые технологии света» [Электронный ресурс]: www.nts.optogan.ru. Режим доступа — открытый. Дата обращения 05.05.2013.
- [24] Органические светодиоды [Электронный ресурс]: www.nts.optogan.ru/ru/nauchno-issledovatelskaya_deyatelnost/new_technologies/organicheskie_svetodiodyi. Режим доступа — открытый. Дата обращения 07.05.2013.
- [25] Сайт компании «Osram» [Электронный ресурс]: www.osram.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения 25.03.2013.
- [26] S. Nakamura, G. Fasol. The Blue Laser Diode. Berlin–Heidelberg–New York: Springer–Verlag. 1997. 343 p.
- [27] T. Lang, M. Odnoblyudov, V. Bougrov, M. Sopanen. «MOCVD growth of GaN islands by multistep nucleation layer technique» Journal of Crystal Growth. **277** (1–4). 2005. p. 64–71.
- [28] P.J. Wang, V.E. Bougrov, Y.T. Rebane, Y.G. Shreter, S.I. Stepanov, L. Tseng, B.S. Yavich, W.N. Wang «III-nitride efficient LEDs» Proceedings of SPIE. **4445**. 2001. p. 99–110.
- [29] B. Sun, L. Zhao, T. Wei, X. Yi, Z. Liu, G. Wang, J. Li, F. Yi. «Light extraction enhancement of bulk GaN light emitting diode with hemisphere-cones-hybrid surface» Optics Express. **20** (17). 2012. 18537.
- [30] В.И. Николаев, А.А. Головатенко, М.Г. Мынбаева, И.П. Никитина, Н.В. Середова, А.И. Печников, В.Е. Бугров, М.А. Одноблюдов. «Рост толстых слоев GaN на наноструктурированных темплэйтх и оптимизация их самоотделения» Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия, алюминия — структуры и приборы». 2013. с. 225–226.
- [31] M.G. Mynbaeva, K.D. Mynbaev, A. Sarua, M. Kuball. «Porous GaN/SiC templates for homoepitaxial growth: effect of the built-in stress on the formation of porous structures» Semiconductor Science and Technology. **20** (1). 2005. p. 50–55.
- [32] M. Mynbaeva, A. Sitnikova, A. Tregubova, K. Mynbaev. «HVPE GaN growth on porous SiC with closed surface porosity» Journal of Crystal Growth. **303** (2). 2007. p. 472–479.

- [33] R. Dwilinski, R. Doradzinski, J. Garczynski, L. Sierzputowski, R. Kucharski, M. Zajac, M. Rudzinski, R. Kudrawiec, J. Serafinczuk, W. Strupinski. «Recent achievements in AMMONO-bulk method» *Journal of Crystal Growth*. **312** (18). 2010. p. 2499–2502.
- [34] A.E. Nikolaev, I. Nikitina, A. Zubrilov, M. Mynbaeva, Y. Melnik, V. Dmitriev. «AlN Wafers Fabricated by Hydride Vapor Phase Epitaxy» *MRS Internet Journal Nitride Semiconductors*. Res. 5S1, W6.5. 2000.
- [35] S. Pearton, ed. GaN and ZnO-based Materials and Devices. Springer Series in Materials Science. V. 156. Ed by R. Hull, S. Jagadish, R.M. Osgood, J. Parisi Jr., Z. Wang. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2012. 485 p.
- [36] R. Lenk, C. Lenk. Practical lighting design with LEDs. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2011. 240 p.
- [37] Типы цоколей ламп [Электронный ресурс]: http://www.domosti.ru/journal/Gid/Tipy_cokolei_lamp/. Режим доступа — открытый. Дата обращения 02.04.2013.
- [38] Рассеиватель и отражатель светильника [Электронный ресурс]: www.4living.ru/items/article/lampshades. Режим доступа — открытый. Дата обращения 09.06.2013.
- [39] С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. Физическая оптика. Москва: Наука. 2004. 654 с.
- [40] Световые отражатели для прожекторов, светильников [Электронный ресурс]: www.svetpro.ru/htm/informations/info_54.html. Режим доступа — открытый. Дата обращения 20.12.2013.
- [41] Сайт компании «Xicato» [Электронный ресурс]: www.xicato.com. Режим доступа — открытый. Дата обращения 10.11.2012.
- [42] Спецификация на изделие «ChromaLit» [Электронный ресурс]: www.intematix.com/products/chromalit. Режим доступа — открытый. Дата обращения 06.07.2012.
- [43] А.Я. Потапенко. «Действие света на человека и животных» *Соровский образовательный журнал*. 10. 1996. с. 13–21.
- [44] Влияние света [Электронный ресурс]: www.floralworld.ru/care/light.html. Режим доступа — открытый. Дата обращения 04.03.2012.
- [45] Журнал «Полупроводниковая светотехника» [Электронный ресурс]: <http://led-e.ru/>. Режим доступа — открытый. Период обращения 2008–2012.
- [46] Solid-State Lighting [Электронный ресурс]: www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/. Режим доступа — открытый. Период обращения 2010–2013.
- [47] Energy Star Government [Электронный ресурс]: www.energystar.gov. Режим доступа — открытый. Период обращения 2008–2013.
- [48] LED Cost and Technology Trends: How to enable massive adoption in general lighting [Электронный ресурс]: http://semiconwest.org/sites/semiconwest.org/files/Eric%20Virey_Yole.pdf. Режим доступа — открытый. Дата обращения 07.02.2012.
- [49] LED Price Expectation [Электронный ресурс]: www.omslighting.com/ledacademy/337/7-leds-strategy/73-led-price-expectation-. Режим доступа — открытый. Дата обращения 07.07.2012.

- [50] Evaluating the lifetime behavior of LED systems. White paper. Philips lumileds [Электронный ресурс]: www.greenstarled.com.mx/descargas/Datos_tecnicos/Mantenimiento_lumen.pdf. Дата обращения 14.01.2012.
- [51] К.А. Виноградова, В.Е. Бугров, А.А. Ковш, М.А. Одноблюдов, В.И. Николаев, А.Е. Романов. «Падение напряжения в белых и синих светодиодах при длительном времени работы на номинальном и повышенном постоянном токе» Известия вузов. Приборостроение. 2013. с. 93–101.
- [52] Roundtable Discussions of the Solid-State Lighting R&D Task Priorities. United States Department of Energy. 2010 [Электронный ресурс]: http://o.b5z.net/i/u/10069179/f/DOE_Roundtable_Discussions_of_the_Solid_State_Lighting_R_D_Task_Priorities.pdf. Режим доступа — открытый. Дата обращения 02.03.2011.
- [53] Roundtable Discussions of the Solid State, Lighting R&D Task Structure, United States Department of Energy. 2009 [Электронный ресурс]: apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl-rd-roundtable-report_jan09.pdf. Режим доступа — открытый. Дата обращения 05.05.2010.
- [54] Reporting LED luminaire product performance. An initiative for better solid-state lighting [Электронный ресурс]: www.lightingfacts.com/downloads/LED_Product_Performance_Guide.pdf. Режим доступа — открытый. Дата обращения 05.12.2010.





В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Базовая магистерская кафедра светодиодных технологий была основана 4 октября 2011 года в рамках осуществления программы стратегического партнёрства между федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (НИУ ИТМО) и российской компанией «Оптоган», обладающей уникальными технологиями производства светодиодов и светодиодной техники. Кафедра организована в составе факультета оптико-информационных систем и технологий НИУ ИТМО.

С момента основания кафедры её заведующим является Владислав Евгеньевич Бугров, исполнительный вице-президент компании «Оптоган», курирующий направления научных исследований и разработок компании. Сотрудники кафедры — ведущие специалисты в области физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур и приборов, физического материаловедения, а также производства светодиодов и светодиодных устройств. На сегодняшний день кафедра светодиодных технологий и компания «Оптоган» успешно реализуют ряд совместных научно-исследовательских проектов.

На кафедре проводится обучение магистров по направлению 200400 «Оптотехника» по программе 200400.68 «Светодиодные технологии» и аспирантов по специальностям 01.04.05 — «Оптика», 05.11.07 — «Оптические и оптоэлектронные приборы и комплексы», 01.04.14 —

«Теплофизика и теоретическая теплотехника», 01.02.04 — «Механика деформируемого твердого тела». Целью обучения является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих компетенциями и навыками для работы в инновационной сфере светодиодных технологий.

Светодиодные технологии — это наукоёмкое постоянно развивающееся направление в современной технике, основанное на последних разработках физики полупроводников, оптики и науки о материалах. Освоение программы по профилю «Светодиодные технологии» выводит студентов на высокий научный и познавательный уровень, предоставляя широкие возможности выбора и получения высокооплачиваемой и увлекательной работы в ведущих высокотехнологичных компаниях.

Более подробную информацию о кафедре светодиодных технологий вы можете получить на сайте кафедры <http://led.ifmo.ru/>. Ознакомиться с инновационной деятельностью компании «Оптоган» и выпускаемой продукцией можно на сайте <http://www.optogan.ru/>. Современные научные исследования, разработки и достижения компании, а также актуальные научно-исследовательские проекты представлены на сайте <http://www.nts.optogan.ru/>.

Владислав Евгеньевич Бугров
Ксения Анатольевна Виноградова

Оптоэлектроника светодиодов

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики
и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

