

УДК 644.36

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОДИОДОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ (обзор)

**А. О. ДОБРОДЕЙ, Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ,
А. А. БОЙКО, Л. И. ЕВМИНОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Постоянно растущие потребности человечества в использовании искусственного освещения требуют увеличения производства электроэнергии. Для этого необходимы дополнительные капиталовложения на строительство электростанций, выработку месторождений энергоносителей и последующую утилизацию растущих отходов производства. Вопрос об альтернативных высокоэффективных источниках освещения, способных удовлетворить спрос на освещение, не наращивая при этом производства и затрат на электроэнергию, стоит очень остро.

На долю освещения приходится около 12 % всей производимой электроэнергии [1]. Можно выделить три основных сектора потребления электроэнергии – промышленный, коммерческий (общественный) и жилой сектор. Расход электроэнергии, потребляемой на освещение, для каждого из секторов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Потребление электроэнергии на освещение

Сектор потребления	Доля электроэнергии, потребляемой на освещение, %	Ежегодное увеличение потребления электроэнергии на освещение, %
Промышленный	6,3	0,9
Коммерческий	28,6	0,1
Жилой	40	1,5

Увеличение световой эффективности существующих источников света позволит производить необходимое количество света, уменьшая при этом потребность в электроэнергии.

Преимущества и недостатки светодиодов

В последние годы стремительное развитие получила оптоэлектроника. Прежде всего это проявилось в революционном совершенствовании светодиодов – полупроводниковых источников света. Еще недавно светодиоды были маломощными устройствами индикации и не могли светиться синим и белым цветом, а сегодня это уже высокоэффективные источники света, которые прочно заняли свое место в секторе монохромного освещения, найдя свое применение в автомобилях, светофорах, вывесках и указателях. Развитие светодиодов [2] представлено в табл. 2, конструкция – на рис. 1.

Процесс вторжения светодиодных технологий в системы традиционного освещения начался с установок, где не требуется высокий уровень освещенности: дежурное и аварийное освещение, ночное интерьерное освещение, знаки и таблички. С ростом

световой отдаче и удешевлением приборов применение светодиодных источников света распространится не только на локальное, но и на общее освещение, в котором лидирующее положение пока занимают традиционные источники света.

Светодиод (СИД – светоизлучающий диод, от англ. LED – light-emitting diode) – полупроводниковый источник света, содержащий один или несколько испускающих свет кристаллов, расположенных в одном корпусе с линзой, формирующей световой поток. Принцип его работы основан на явлении электролюминесценции – холодного свечения, возникающего при протекании тока. Состав материалов, образующих p-n-переход, определяет тип излучения.

Таблица 2

Развитие светодиодов

Материалы кристаллов	Годы	Комментарий
GaAsP (фосфид арсенида галлия)	1960-е	Обычные малоэффективные красные светодиоды, полученные по жидкофазной эпитаксии
GaP (фосфид галлия)	1970-е	Высокоэффективные красные светодиоды
GaAlAs (арсенид галлия-алюминия)	1980-е	На основе одинарных и двойных гетероструктур с эпитаксией из паровой фазы
InGaAlP (фосфид индия-галлия-алюминия)	1990-е	Металлоорганическая эпитаксия из паровой фазы
InGaN (нитрид индия-галлия)	2000-е	Сверхъяркие зеленые и синие светодиоды

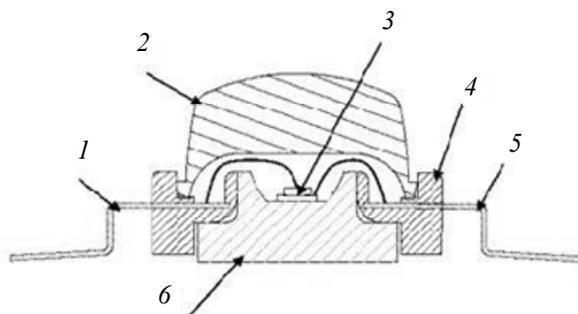


Рис. 1. Конструкция светодиода: 1 – анод; 2 – пластиковая линза; 3 – кристалл; 4 – корпус; 5 – катод; 6 – алюминиевая (медная) основа

Последние достижения полупроводниковой технологии позволяют СИД в скором времени составить серьезную конкуренцию существующим источникам белого света.

Рассмотрим преимущества и недостатки светодиодов в сравнении с широко используемыми источниками света [1]–[6].

Для систем искусственного освещения применяются два основных вида источников света – лампы накаливания (ЛН) и газоразрядные лампы, среди которых особо стоит выделить люминесцентные лампы (ЛЛ).

Достоинства лампы накаливания:

- низкая стоимость лампы;
- компактность;
- надежная работа в широком диапазоне температур.

К недостаткам же, способным при некоторых обстоятельствах «перевесить» достоинства, относятся:

- низкий КПД, до 5 % энергии преобразуется в свет, остальные 95 % – в тепло;

- высокая рабочая температура;
- заметные колебания светового потока при изменениях напряжения питания;
- недолговечность.

Люминесцентные лампы применяются для освещения общественных и производственных помещений.

Достоинства люминесцентных ламп:

- высокая световая отдача (до 80 лм/Вт);
- большой срок службы.

Недостатки люминесцентных ламп:

- относительно большие габариты (в настоящее время появились компактные ЛЛ);
- необходимость в специальном пускорегулирующем устройстве;
- чувствительность к температуре окружающего воздуха (при температуре ниже +5 °С лампа может не зажечься). Однако работа лампы при низких температурах возможна при использовании электронной пускорегулирующей аппаратуры;
- наличие стробоскопического эффекта. Этот эффект вызывается частыми не уловимыми для глаза миганиями лампы в такт колебаниям переменного тока в электрической сети. В результате у человека создается нарушение правильного восприятия скорости движения предметов, появляются неприятные ощущения;
- при неправильном включении (без защитных конденсаторов) люминесцентные лампы становятся источниками помех для радиоприемников и телевизоров;
- обязательная утилизация отслуживших ламп как ртутьсодержащих отходов.

К преимуществам светодиодов можно отнести:

- в отличие от лампы накаливания или люминесцентной лампы в светодиоде электрический ток преобразуется непосредственно в световое излучение, теоретически это можно сделать почти без потерь, с максимальным КПД;
- чистота и разнообразие цветов. Цвет свечения СИД определяется материалом полупроводникового кристалла. Излучение происходит в узкой части спектра, что позволяет формировать необходимые чистые цвета, при этом УФ- и ИК-излучения отсутствуют. Светодиоды (при должном теплоотводе) не производят тепла в форме ИК-излучения и поэтому не греются как лампы накаливания;
- отсутствие стеклянной колбы у светодиодов определяет очень высокую механическую прочность и надежность. Светодиод влаго- и пыленепроницаем, не имеет спиралей и других изнашиваемых деталей. Срок службы светодиода может достигать 100000 часов. Долгий срок службы СИД позволяет снизить затраты на обслуживание, что делает их незаменимыми для установки в труднодоступных местах;
- угол обзора светодиода может варьироваться в широких пределах (от 4 до 160°);
- светодиоды обладают высоким быстродействием, что делает их незаменимыми в системах отображения информации;
- низкое энергопотребление;
- как источники света для наружного и декоративного освещения, они обладают рядом уникальных достоинств, среди которых точная направленность света, возможность управления цветом, устойчивость к многократным включениям и выключениям;
- низкое рабочее напряжение. Светодиод – низковольтный электроприбор, а значит – безопасный;

– экологичность светодиодов (отсутствие у них ртутьсодержащих компонентов по сравнению с люминесцентными лампами), а также отсутствие электромагнитных излучений и помех.

Недостатки светодиодов:

– основной недостаток светодиодов на сегодняшний день – их цена по сравнению с другими источниками света. Производители утверждают, что в ближайшие 2–3 года удастся снизить цену, одновременно увеличив мощность СИД;

– как и у других источников света, рабочие характеристики СИД со временем ухудшаются, а стандартной процедуры оценки срока их службы на сегодняшний день еще нет;

– чем больший ток пропускается через светодиод, тем выше его температура. И если не происходит отвод тепла, р-п-переход перегревается, отчего изменяются характеристики светодиода (уменьшается яркость и изменяется цвет). Поэтому срок службы у мощных СИД короче, чем у маломощных (примерно 20–50 тысяч часов). Так что очень важно обеспечивать эффективный отвод тепла;

– для работы светодиодов необходим постоянный ток и очень важно отсутствие даже минимальных колебаний напряжения и силы тока. Потому для работы светодиодов непременно требуются дополнительные устройства – драйверы;

– светодиодные технологии очень быстро развиваются, и светодиоды морально устаревают гораздо раньше, чем вырабатывают свой ресурс;

– для светодиодов пока не разработано единых стандартов. Это создает дополнительные сложности при подборе и обслуживании оборудования.

Сравнительный анализ источников света представлен в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение различных типов источников света по базовым характеристикам

Параметр сравнения	Светодиоды	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Компактность	Компактные	Габаритные	Компактные
Ударостойкость	Устойчивы	Хрупкие	Хрупкие
Влагостойкость	Да	Нет	Нет
Энергопотребление	Малое	Среднее	Высокое
Светоотдача	Средняя	Высокая	Низкая
Возможность получения цветного света	Есть	Светофильтр	Светофильтр
Срок службы	До 100 тысяч часов	До 10 тысяч часов	До 1 тысячи часов
Легкость в монтаже и обслуживании	Есть	Нет	Нет
Инерционность	Очень низкая	Высокая	Низкая
Зависимость срока службы от количества включений / выключений	Нет	Высокая	Высокая
ИК-излучение	Нет	Минимальное	Очень высокое
УФ-излучение	Нет	Очень высокое	Приемлемое
Температура эксплуатации	От минус 30 до плюс 70 °С	От плюс 10 до плюс 50 °С	Не имеет значения
Стоимость	Высокая	Средняя	Низкая
Эксплуатационные расходы	Низкие	Приемлемые	Очень высокие

Таким образом, из приведенного выше сравнения видно, что светодиоды за счет низкого расхода финансовых средств в течение срока эксплуатации, длительного срока службы, низкого энергопотребления, отсутствия ИК- и УФ-излучений, являются лидерами в рейтинге источников света.

В то время как все существующие на сегодняшний день источники света достигли своей максимальной световой эффективности, светодиоды приблизились только к 10 % своих возможностей.

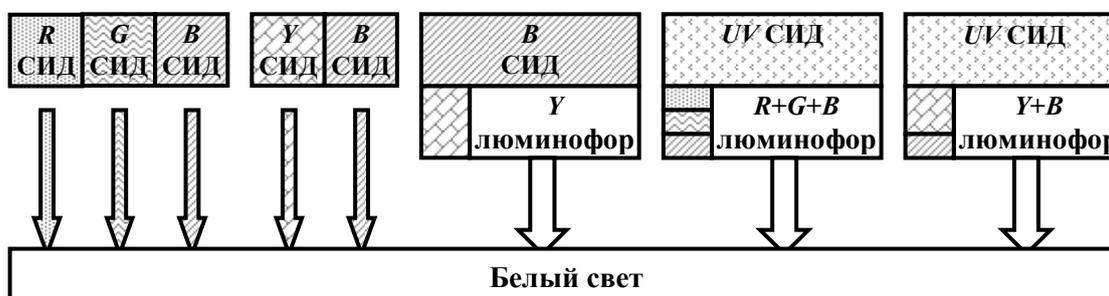
Сравнивая светодиоды с люминесцентными лампами, нельзя однозначно говорить о преимуществе СИД. На сегодняшний момент световая эффективность белых светодиодов меньше, чем у люминесцентных ламп, а цена – выше. Здесь в первую очередь следует учитывать тот факт, что для большинства случаев, где в настоящее время применяются ЛЛ, выгоднее и безопаснее использовать именно светодиодное освещение. Кроме того, отслужившие люминесцентные лампы должны быть утилизированы, как ртутьсодержащие отходы. Например, ежегодно в России [6] на 1 млн населения приходится около 80000 отработанных люминесцентных ламп (или 16 тонн РСО). Стоимость утилизации 1 тонны РСО составляет 300 долларов США. Ежегодные расходы только на утилизацию люминесцентных ламп для России составляют сумму порядка 700000 долларов.

Как бы то ни было, для потребителей жилого сектора главным аргументом в пользу выбора источника освещения является его начальная цена. Перспектива будущей экономии средств на обслуживание и электроэнергию является для них малоубедительной. В то же время, промышленный и коммерческий секторы, где в основном применяется люминесцентное освещение, наоборот заинтересованы в приобретении более экономичных и долговечных источников света высокой эффективности. Деятельность этих секторов рассчитана на перспективу, и поэтому снижение расходов на обслуживание, безопасность и низкие энергетические затраты имеет первостепенное значение и влияет на прибыль в целом.

Люминофоры и преобразователи

Приведем основные способы получения белого света (рис. 2), каждый со своими достоинствами и недостатками [7], [8]:

- синий, зеленый и красный СИД;
- синий и желтый СИД;
- синий СИД + желтый люминофор;
- ультрафиолетовый СИД + синий, зеленый и красный люминофор;
- ультрафиолетовый СИД + синий и желтый люминофор.



R, G, B, Y, UV – красный, зеленый, синий, желтый, ультрафиолетовый СИД
R, G, B, Y – красный, зеленый, синий, желтый люминофор

Рис. 2. Основные способы получения белого света с помощью светодиодов и фотолюминофоров

При смешении излучения трех цветов для каждого из СИД (красного, зеленого или синего) надо выбрать значение тока, соответствующее максимуму его внешнего квантового выхода излучения. Но при этих токах и напряжениях интенсивности каждого цвета не будут соответствовать значениям, необходимым для синтеза белого цвета. Этого можно достигнуть, изменяя число светодиодов каждого цвета. Для практических применений этот способ неудобен, поскольку нужно иметь несколько источников различного напряжения, много контактных вводов и устройства, смешивающие и фокусирующие свет от нескольких СИД.

Способы смешения синего излучения СИД с излучением люминофора, возбуждаемых этим синим излучением, наиболее просты и в настоящее время наиболее экономичны. Состав кристалла на основе InGaN/GaN подбирается так, чтобы его спектр излучения соответствовал спектрам возбуждения люминофоров. Кристалл покрывается слоем компаунда с порошком люминофора таким образом, чтобы часть синего излучения возбуждала люминофор, а часть – проходила без поглощения. Форма держателя, толщина слоя и форма пластикового купола рассчитываются и подбираются так, чтобы излучение имело белый цвет в нужном телесном угле. Возбуждение люминофора производится на длине волны 460–480 нм, а излучение – 560–590 нм [7]. Именно этим путем идет большинство современных производителей белых СИД. Белые светодиоды намного дешевле трехкристалльных, обладают хорошей цветопередачей, а по световой отдаче (до 50 лм/Вт) они уже обогнали лампы накаливания.

Большинство производителей белых СИД используют в качестве желтого люминофора иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ), легированный церием. Для создания теплых белых СИД применяют смеси с оранжевым или красным люминофором.

Люминофор на основе ИАГ обладает определенными недостатками [9]:

- 1) узкая полоса возбуждения;
- 2) ограничение на индекс цветопередачи излучения светодиода;
- 3) ограничение на цветовую температуру излучения светодиода.

Тем не менее, эффективность производящихся в настоящее время люминофоров типа ИАГ довольно высока. Ведутся разработки однофазных люминофоров (не смесей) с эффективностью, равной эффективности ИАГ, и позволяющих создавать с их помощью теплые белые светодиоды, а также СИД на основе двухслойных кристаллов, излучающие одновременно синий и красный цвет [10]. Основные идеи актуальных разработок в этом направлении следующие [9]:

- использование в качестве активатора двухвалентного европия с широкой полосой возбуждения [11], [12];
- построение матрицы люминофора на группировках и SiN^+AlO^+ ;
- группировки SiN^+ обеспечивают хорошие химические свойства, такие как высокая стабильность;
- содержание и расположение группировок AlO^+ обеспечивает необходимые оптические свойства, такие как цвет излучения, высокая квантовая эффективность;
- координационная сфера активатора составлена атомами кислорода и азота.

Светоотдача белых СИД ниже, чем светоотдача СИД с узким спектром, т. к. в них происходит двойное преобразование энергии, часть ее теряется в люминофоре.

По данным [7] спектр излучения люминофора может быть представлен в виде несимметричной гауссовой кривой с вершиной 560 нм и шириной по половинному уровню от 40 до 65 нм. Расчетные цветовые координаты такого спектра $X = 0,447$, $Y = 0,526$, световая эффективность $E_v = 470$ лм/Вт. Пример спектра люминесценции церий-содержащего порошка ИАГ, полученного в НИЛ ТХН ГГТУ им. П. О. Сухого и исследованного в лаборатории люминесценции ИМАФ НАН Республики Беларусь (Г. Е. Малашкевич), приведен на рис. 3.

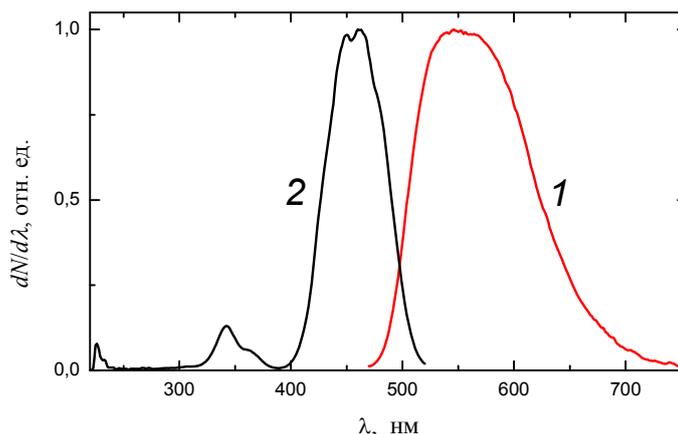


Рис. 3. Корректированные спектры люминесценции (1) и ее возбуждения (2) для люминофора на основе ИАГ: Ce^{3+} , полученного золь-гель методом

У каждого способа есть свои достоинства и недостатки [5]. Белые светодиоды с люминофорами существенно дешевле, чем светодиодные *RGB*-матрицы (в пересчете на единицу светового потока), и позволяют получить хороший белый цвет. Однако у них меньше, чем у *RGB*-матриц, светоотдача из-за преобразования света в слое люминофора, также достаточно трудно точно контролировать равномерность нанесения люминофора в технологическом процессе и, следовательно, цветовую температуру. И, наконец, люминофор тоже стареет, причем быстрее, чем сам светодиод.

Интенсивные научные исследования и разработки проводятся в направлении создания новых, экономичных методов синтеза люминофоров для СИД [13], [14], новых матриц для ионов церия [15], [16], а также улучшенных конструкций СИД [17], [18].

Промышленность выпускает как светодиоды с люминофором, так и *RGB*-матрицы – у них разные области применения.

Эффективность белых светодиодов

Эффективность E СИД определяется отношением светового потока F , производимого СИД к потребленной мощности P [19]. Это общая эффективность, включающая в себя энергетическую эффективность самого СИД, зависящую от физики работы, материала и конструкции СИД и световую эффективность спектра излучения данного СИД. Общая эффективность измеряется в люменах (лм) на ватт (Вт):

$$E = F / P, \text{ лм/Вт.} \quad (1)$$

Производители указывают в качестве основного параметра СИД силу света I , измеряемую в канделах, поэтому нужно пересчитать канделы в люмены. Сила света определяет пространственную плотность (интенсивность) светового потока (luminous intensity):

$$I = F / \Omega, \text{ лм/ср,} \quad (2)$$

где Ω – телесный угол, измеряемый встерадианах (ср), связанный с плоским углом α соотношением:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha / 2), \text{ ср.} \quad (3)$$

Угол α – угол, приводимый изготовителями как угол наблюдения или угол излучения (viewing angle, radiation angle), определяемый по спаду силы света на 50 %.

Зная приводимый изготовителями угол наблюдения, можно приблизительно определить световой поток СИД:

$$F = I \cdot \Omega . \quad (4)$$

Общая эффективность светоизлучающего прибора E определяется двумя составляющими: энергетической эффективностью E_e (отношение выходной оптической к входной электрической мощности) и световой эффективностью E_v .

Спектр зрения человека ограничен диапазоном длин волн от 380 до 780 нм. Мало того, чувствительность зрения к различным длинам волн различна и определяется т. н. кривой видности $V(\lambda)$.

СИД излучает не на одной длине волны, а в некотором промежутке. Интенсивность распределения оптической мощности в пределах этого промежутка описывается кривой, называемой энергетическим (или оптическим) спектром излучения $F_e(\lambda)$. Оптическая мощность определяется площадью под кривой спектра и измеряется в ваттах. Для расчета световой мощности нужно перейти от энергетических величин (ватт) к световым (люменам), для чего необходимо перемножить энергетический спектр $F_e(\lambda)$ на кривую видности – $V(\lambda)$.

Тогда световая эффективность определится как отношение световой мощности к оптической:

$$E_v = F_v / F_e , \quad (5)$$

где F_e, F_v – интегралы функций $F_e(\lambda), F_v(\lambda)$.

Максимальное значение световой эффективности приходится на длину волны 555 нм и составляет 683 лм/Вт.

Теперь, зная энергетическую и световую эффективность, можно определить общую эффективность:

$$E = E_e \cdot E_v . \quad (6)$$

На рис. 4 показаны структурные составляющие эффективности светодиода.

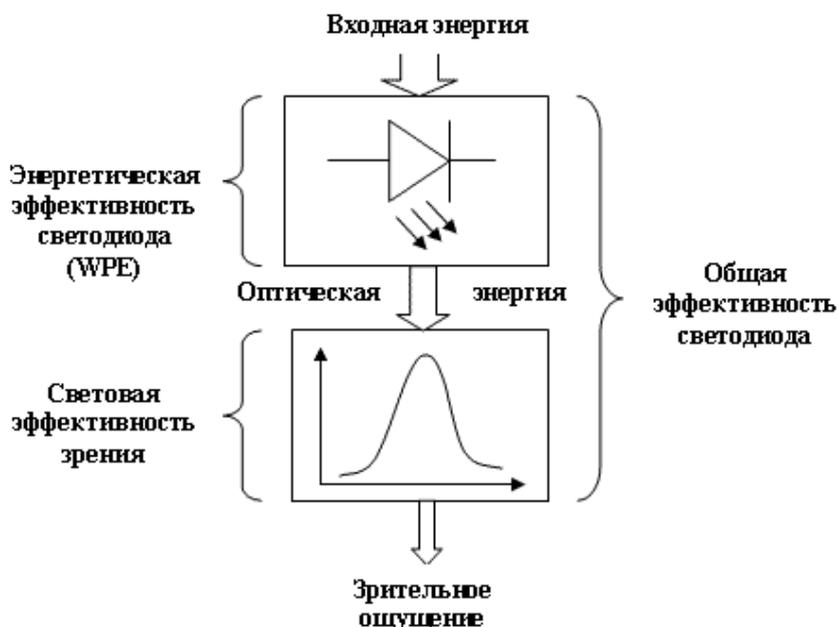


Рис. 4. Структурные составляющие эффективности светодиода

Энергетическая эффективность светодиодного кристалла составляет от 5 до 20 %. Существенная доля потерь связана с потерями фотонов при выводе из корпуса

светодиода. Чем шире диаграмма направленности светодиода, тем меньше эти потери. Характерные значения КПД светодиодов – от 1 до 10 %.

Современные светодиоды с наибольшим световым потоком производятся на кристаллах InGaN. Они излучают свет на длине волны 470 нм (синий цвет). На основе кристалла, излучающего синий цвет или работающего в ультрафиолетовом диапазоне и покрытого слоем люминофора, производятся белые светодиоды. Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый цвет. Максимальную эффективность светодиоды на кристаллах InGaN имеют в диапазоне длины волны от 505 до 525 нм. Но есть особенность, которую необходимо учитывать при разработке устройств с использованием светодиодов на InGaN – это то, что длина волны света сильно зависит от прямого тока через светодиод.

Чтобы применяться в осветительных приборах и конкурировать с традиционными источниками света, белые СИД должны иметь большую эффективность освещения и повышенное количество света, излучаемого одним прибором. В настоящее время белые светодиоды имеют эффективность освещения 50 лм/Вт. Большинство из методов повышения эффективности связаны с улучшением извлечения света из кристалла. Люминофор является другим компонентом, требующим улучшения. Но даже несмотря на то, что используемый в настоящее время люминофор имеет высокую эффективность, способ его размещения внутри прибора ведет к повышенным световым потерям. В большинстве случаев этот свет поглощается внутри корпуса в виде видимого света.

Существует несколько вариантов размещения люминофора вдали от кристалла. Однако эффективного расположения люминесцирующего экрана не было предложено. Была разработана и запатентована новая концепция [20], названная «Улавливание рассеянных фотонов». Согласно этой технологии, люминофор размещается на некотором расстоянии от кристалла и оптика между кристаллом и слоем люминофора формирует эффективное извлечение обратнорассеянных фотонов. Экспериментальные результаты [20] показали, что эффективность по сравнению с традиционными конструкциями СИД повышается на 60 %. Кроме того, установлено, что увеличивается также срок службы СИД за счет уменьшения деградации эпоксидной смолы, нанесенной на кристалл. Деградация связана с ухудшением отвода тепла, выделяющегося во время работы, от кристалла.

Конструкция СИД согласно технологии [20] изображена на рис. 5.

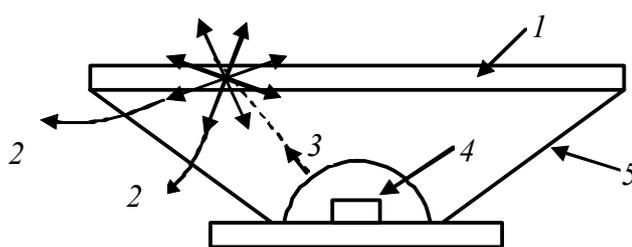


Рис. 5. Конструкция СИД по технологии «Улавливание рассеянных фотонов»: 1 – слой люминофора; 2 – обратнорассеянные фотоны; 3 – рассеянные фотоны; 4 – кристалл; 5 – оптика

Перспективы применения светодиодов

Результатом интенсивного развития технологий в области производства СИД стало широкое использование этих приборов в системах отображения информации и световой сигнализации. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и получения любого оттенка в широком динамическом диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования СИД в качестве источников света для этих устройств.

Так, световая отдача лампы накаливания с красным светофильтром составляет всего 3 лм/Вт, в то время как красные светодиоды сегодня дают 50 лм/Вт и более [8]. Например, лампа на основе светодиодов AlInGaP красного цвета излучения потребляет в 100 раз меньше электроэнергии и служит в 100 раз дольше, чем обеспечивающая аналогичный эффект лампа накаливания с красным светофильтром [21].

Лампы накаливания в обычных светофорах требуют ежегодной замены, а светодиодные приборы служат 5–10 лет, потребляя при этом в 5–10 раз меньше электроэнергии [21].

Процесс замены ламп накаливания на СИД быстрее всего протекает в мобильных приложениях (фонари для разного рода работ, велосипедные фары и т. д.).

Из объектов жилищно-коммунального хозяйства перспективными с точки зрения использования светильников со светодиодами в настоящее время могут быть те, в которых действующими нормативными документами установлены сравнительно низкие уровни освещенности при отсутствии требований к качеству цветопередачи или невысоком уровне этих требований. К таким объектам можно отнести: лестничные клетки (площадки, пролеты), лифты, номерные знаки домов и указатели названий улиц.

Освещение квартир, парадных вестибюлей и фойе, контор и других помещений с постоянным или длительным пребыванием людей могут представлять интерес с точки зрения использования СИД в перспективе. Применение СИД в качестве альтернативного источника света позволяет экономить электроэнергию. Светильники на основе СИД могут избавить жилищно-коммунальные хозяйства от такого бедствия, как вандализм, т. к. отсутствие в них стекла и изготовление корпусов светодиодов из монолитного поликарбоната делает их практически неразрушаемыми.

Потенциально световая эффективность белых светодиодов может возрасти к 2028 г. до 200–210 лм/Вт [21], что в 3 раза превышает данные для самых эффективных из существующих на сегодняшний день люминесцентных ламп.

Ростовская компания «ЦЕРС-Технолоджи» (производственная фирма холдинга «НОТИС») осуществила уникальный, первый в России и второй (после PHILIPS) в мире проект: оснастила улицу Дзержинского и Пролетарский спуск г. Азова Ростовской области энергосберегающими светодиодными светильниками «ZERS» собственного производства [22]. Помимо высокого качества освещения, важнейшей характеристикой светодиодных светильников является их экономичность. Нормативный уровень освещения согласно СНиП 25-05-95 достигается при незначительном энергопотреблении, что позволяет сократить потребление энергии почти в два раза. Срок службы светильников 20 лет, отсутствуют эксплуатационные затраты.

Исследователи из Национального института стандартов и технологий (NIST) заявили о создании светодиода нового типа – резонаторного СИД (resonant cavity LED, RCLED), который в семь раз ярче традиционных [23]. Этого удалось достичь благодаря дополнительному вытравливанию круговых решеток Брэгга размерами 130 нанометров на поверхности устройства. По мнению исследователей, новая технология может применяться в оптокогерентной томографии и других средствах медицинской визуализации.

Специалисты компании Lumileds разработали светодиод Luxeon V, имеющий световой поток 120 люмен при токе 700 мА. Модель Luxeon K2 позволяет излучать белый световой поток 140 люмен. Новейшая разработка компании – Luxeon Portable PWT1, обладает световым потоком в 26 люмен при токе 350 мА, имея размеры 2,0 x 1,6 x 0,7 мм. Это значит, что он примерно на 75 % меньше, чем светодиоды с аналогичной мощностью, и производит в 4,5 раза больше света на квадратный мил-

лиметр. Это позволяет производителям миниатюрных устройств с СИД (например, вспышек для мобильных телефонов) делать их еще меньше и легче [23].

Американская компания Lamina Ceramics объявила о создании светодиодного источника света, на порядок более яркого, чем существующие. При диаметре 5 дюймов (12,7 см) его световой поток составляет 13300 люмен. Источник света с такой яркостью можно использовать для освещения архитектурных ансамблей, или огромных выставочных павильонов [23]. Создание светодиодного излучателя беспрецедентной яркости стало возможным благодаря разработанному компанией Sarnoff методу теплоотвода. Его использование позволило повысить плотность размещения светодиодов без риска их повреждения либо уменьшения яркости. Новый источник света при яркости 13300 люмен имеет электрическую мощность 860 Вт и позволяет независимо управлять красным (4600 люмен), зеленым (7600 люмен) и голубым (1100 люмен) каналами, а также дает возможность плавно менять уровень освещения от «рассветного» до «полуденного» и «закатного».

Немецкая компания Hella представила VW Golf Plus с изготовленными специально для него новейшими фарами на базе светодиодной техники [24]. В Европе, как ожидается, фары на светодиодах обретут свой стандарт в 2008 г.

В настоящее время в рамках задания 1.46 «Разработка и исследование перспективных люминофоров для гибридных излучателей «светодиод-люминофор» квази-белого цвета свечения ГКПНИ «Электроника» на 2007–2010 гг. в НИЛ технической керамики и наноматериалов ГГТУ им. П. О. Сухого проводятся научно-исследовательские и технологические работы по созданию люминесцентных трансформирующих материалов с улучшенными спектральными и теплофизическими характеристиками (YAG: Ce^{3+} , Eu^{3+} ; YAG: SiO_2 , Ce^{3+} ; YAG: SiO_2 , MgO , Ce^{3+} и др.), а также прогрессивных коллоидно-химических методов их производства. Спектрально-люминесцентные характеристики образцов порошкообразных материалов, полученных путем соосаждения в присутствии органического темплата с последующей прокалкой осадка при 1000 °С продемонстрировали перспективность синтезированных материалов для осветительных устройств на основе светодиодов. По эффективности люминесценции данные люминофоры не уступают полученным традиционным методом люминофорам НПФ «Люминофор» (г. Ставрополь, Российская Федерация) и обладают более высоким «спектроскопическим потенциалом» благодаря возможности управления структурой оптических центров на различных стадиях золь-гель процесса, а также более низкой температуры синтеза.

Заключение

В результате проведенного сравнения светодиодов с широко используемыми источниками света показано, что СИД являются перспективными для применения в системах освещения. В настоящее время наиболее приемлемым способом получения сверхъярких светодиодов с белым цветом свечения является применение люминофоров, преобразующих излучение синего цвета в широкий спектр, соответствующий солнечному спектру. Повышение эффективности СИД связано не только с улучшением извлечения света из р-п-перехода, но и повышением эффективности люминофора-преобразователя.

Люминофоры, разрабатываемые в НИЛ технической керамики и наноматериалов ГГТУ им. П. О. Сухого, по эффективности люминесценции не уступают традиционным и обладают более высоким «спектроскопическим потенциалом».

Литература

1. Светодиоды – новые технологии рынка освещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ledmir.ru/public_01.htm. – Дата доступа: 09.11.2006.
2. Развитие светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ledinfo.ru/replac6.html>. – Дата доступа: 26.10.2006.
3. LED Art – вопросы – ответы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ledart.ru/faq.htm>. – Дата доступа: 19.01.2007.
4. Галюк, Е. Светодиоды: за и против / Е. Галюк // Иллюминатор – журнал световых решений. – 2006. – № 1(21).
5. Рябов, А. Часто задаваемые вопросы по светодиодам, технологиям их производства и применения / А. Рябов // Цоколь. – 2004. – № 1.
6. История создания и совершенствования светодиодов, расширение круга применения, перспективы развития светодиодного осветительного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cled.ru/history.htm>. – Дата доступа: 26.10.2006.
7. Дедов, В. П. Пять способов получения белого света [Электронный ресурс] / В. П. Дедов. – Режим доступа: http://www.infor.sp.ru/led_spectra.htm. – Дата доступа: 26.10.2006.
8. Давиденко, Ю. Высокоэффективные современные светодиоды / Ю. Давиденко // Современ. электроника. – 2004. – № 10. – С. 36–43.
9. Феопентов, А. Перспективные люминофоры для белых светодиодов [Электронный ресурс] / А. Феопентов. – Режим доступа: <http://u987.netangels.ru/reviews/papers/yellphos>. – Дата доступа: 09.01.2007.
10. United States Patent № US 7126274 B2 Light emitting device with blue light LED and phosphor components / Y. Shimizu and other (JP) // 24.10.2006.
11. Nazarov M. High efficient LED for white light / M. Nazarov and other // Moldavian Journal of the Physical Sciences. – 2005. – Vol. 4, № 4. – P. 485–495.
12. United States Patent № US 7061024 B2 Light-emitting device comprising an Eu(II) – Activated phosphor / P. Schmidt and other (DE) // 13.06.2006.
13. Lu Chung-Hsiu Cerium-ion-doped yttrium aluminum garnet nanophosphors prepared through sol-gel pyrolysis for luminescent lighting / Chung-Hsiu Lu and other // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 80, № 19. – P. 3608–3610.
14. Сокульская, Н. Н. Синтез и исследование гранатов РЗЭ и алюминия для светоизлучающих диодов: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.21 / Н. Н. Сокульская. – Ставрополь, 2004.
15. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами / М. Л. Бадгутдинов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 6. – 758–763 с.
16. Nazarov, M. Luminescence mechanism of highly efficient YAG and TAG phosphors / M. Nazarov // Moldavian Journal of the Physical Sciences. – 2005. – Vol. 4, № 3. – P. 347–356.
17. Описание изобретения к патенту РФ № RU 2134000 C1 Светодиодное устройство / В. С. Абрамов [и др.] ; 27.07.1999.

18. Описание изобретения к патенту РФ № RU 2207663 С2 Светодиод / Н. А. Гальчина [и др.] ; 27.06.2003.
19. Дедов, В. П. На уровне паровоза или эффективность светодиода [Электронный ресурс] / В. П. Дедов. – Режим доступа: <http://www.infor.sp.ru>. – Дата доступа: 26.10.2006.
20. Nadarajah Narendran. Phosphor placement in white LED packages // Photonics Spectra. – 2006. – № 7. – P. 58–62.
21. Наиболее перспективные области применения светильников на светодиодах в освещении объектов жилищно-коммунального хозяйства [Электронный ресурс] / Ю. Б. Айзенберг [и др.]. – Режим доступа: <http://www.ledmir.ru/public.htm>. – Дата доступа: 09.11.2006.
22. Улица светодиодных светильников – первая в России, вторая в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.illuminator.ru/ynews.asp>. – Дата доступа: 31.10.2006.
23. Светодиодный прожектор стал реальностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cnews.ru>. – Дата доступа: 17.04.2006.
24. Светодиодные фары станут серийными с 2008 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.za.ru>. – Дата доступа: 06.07.2005.

Получено 13.01.2007 г.