

## ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОЩАЙТЕ, СТАРЫЕ, ДОБРЫЕ СВЕТИЛЬНИКИ

Будущее выглядит все более светлым для твердотельных источников света, которые все чаще ассоциируются со сверхъяркими светодиодами (High Brightness LEDs – HB LEDs). Темпы развития технологии светодиодов (СД) оказались выше, чем ожидалось. Созданы мощные СД, световой поток которых много больше, чем у СД в стандартных (диаметром 5 мм) корпусах для монтажа на поверхность. В ближайшее время можно ожидать активного проникновения светодиодов на рынок средств освещения и замены ими ламп накаливания, флуоресцентных и галогенных ламп в домах, на предприятиях, улицах, стадионах, автостоянках, аэропортах и в крупных строениях. Конечно, прежде чем твердотельные устройства смогут успешно эмулировать "теплый" свет ламп накаливания и обеспечить эффективность, присущую флуоресцентным лампам, необходимо решить множество проблем. Но работы по совершенствованию СД, в первую очередь белого свечения, активно ведутся и поддерживаются решениями государственных комиссий и промышленных ассоциаций различных стран и регионов, заинтересованных в переходе к более эффективным и экологически безопасным средствам освещения. В США, Канаде, Европе, Австралии ведутся работы по замене ламп накаливания другими источниками света не позднее 2016 года.

### КРАТКАЯ ИСТОРИЯ СВЕТОДИОДОВ

Впервые "любопытное явление" – свечение структуры металл-карбид кремния – было случайно обнаружено в 1907 году британским радиоинженером Генри Раундом (Henry Round), изучавшим электрические характеристики такой диодной структуры. Небольшое сообщение о желтом излучении двухэлектродной структуры при "несимметричном прохождении тока" не

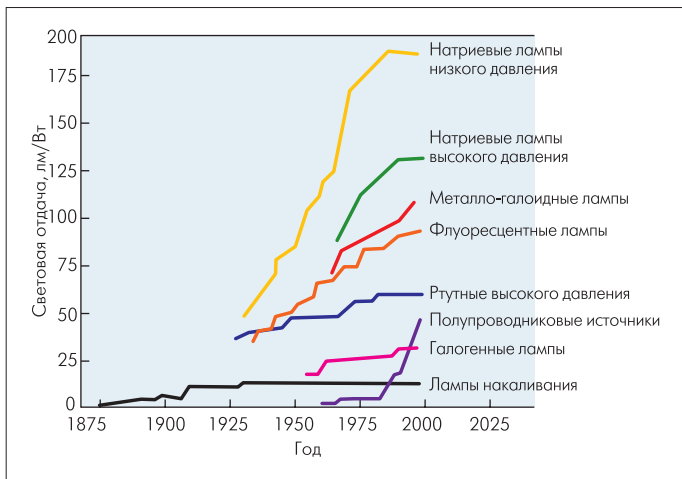
В.Шурыгина

привлекло внимание научных кругов того времени, и о явлении электролюминесценции на многие годы было забыто. В 1923 году это явление вновь обнаружил и подробно описал талантливый 20-летний русский ученый Олег Владимирович Лосев. На основе результатов детального изучения вольт-амперных характеристик структуры металл-карбид кремния Лосев пришел к выводу, что излучение вызвано явлением, "сходным с холодным электронным разрядом". Он также показал, что процессы включения и отключения диода достаточно быстрые, что позволит использовать его в качестве светового реле.

Лишь в 1951 году специалисты электротехнической лаборатории компании Signal Corp. объяснили физику процесса излучения света полупроводниковым диодом, а именно инъекцией неосновных носителей на границе p-n-перехода при его прямом смещении и их рекомбинацией. В 1955 году ими же был создан диод желтого свечения со структурой металл-фосфид галлия. С этого времени началось интенсивное развитие и совершенствование светодиодов, которое продолжается и до сих пор. Первые значительные успехи были достигнуты благодаря замене карбида кремния более эффективными полупроводниковыми соединениями  $A^3B^5$  и благодаря отказу от перехода металл-полупроводник в пользу p-n-перехода. В гонку за лидерство в области производства СД включились компании General Electric, IBM, Bell Telephone Labs, RCA и Лаборатория Линкольна в Лексингтоне. В 1960–1970-е годы на основе арсенида-фосфида галлия, фосфида галлия, легированного азотом или цинком и кислородом, были изготовлены диоды красного, желтого, оранжевого и зеленого свечения. Светодиод синего свечения на базе нитрида галлия удалось создать ученому Университета Нагойи (Япония) Исами Аказасаки лишь в 1989 году. Правда, его эффективность составляла всего 1%. И только в середине 90-х годов прошлого столетия специалисты компании Nichia сумели изготовить на нитриде галлия-индия диоды с двойной гетероструктурой синего и зеленого свечения с эффективностью 10%.

### СВЕТОДИОДЫ vs. ОБЫЧНЫХ ЛАМП

Одно из основных достоинств современных сверхъярких светодиодов (световой поток белых СД до 1000 лм при токе не-



**Рис. 1. Световая отдача твердотельных средств освещения стремительно улучшается по сравнению с другими "зрелыми" источниками света, для которых уже не ожидается существенного совершенствования характеристик**

сколько ампер) – высокая световая отдача. Как известно, 95% энергии питания лампы накаливания преобразуется в тепло и лишь 5% – в световое излучение. В результате на долю современных средств освещения приходится 19% мирового потребления электроэнергии. По данным Министерства энергетики США, ~22% электроэнергии, вырабатываемой в стране, тратится на питание ламп накаливания. Световая отдача полупроводниковых источников света намного больше, хотя пока по этому параметру они уступают флуоресцентным лампам (рис.1). Но этот параметр стремительно улучшается. В лабораторных условиях уже получена световая отдача белых СД 100–150 лм/Вт (против 15 и 80 лм/Вт для ламп накаливания и компактных флуоресцентных ламп, соответственно), и, по оценкам экспертов, лет через десять она удвоится (табл.1 и 2).

Существенную экономию энергопотребления обеспечивают и низкое рабочее напряжение СД. Некоторые светильники на СД могут работать при почти севших батарейках. Кроме очевидной экономической выгоды, низкое энергопотребление светодиодов полезно и с точки зрения техники безо-

**Таблица 1. Сравнительные характеристики различных типов осветительных ламп**

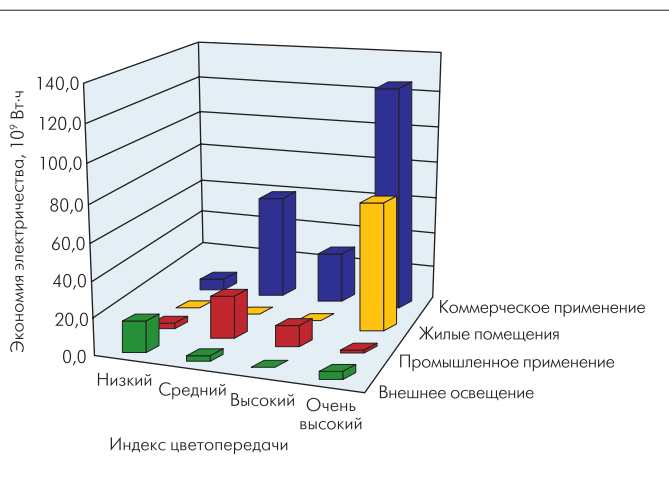
Тип лампы	Мощность, Вт	Световая отдача, лм/Вт	Срок службы, 10 <sup>3</sup> ч
Лампы накаливания	15	8	1
Лампы накаливания	100	15	1
Долговечные лампы накаливания	135	12	5
Галогенные лампы	20	12	3
Галогенные лампы	300	24	3
Компактные галогенные лампы	50	12	2,5
Компактные флуоресцентные лампы	11	50	10
Флуоресцентные лампы	30	80	20
Белые светодиоды	–	30	100

**Таблица 2. Планируемые характеристики СД на период 2007–20015 годы**

Параметр	Изменение по годам			
	2007	2010	2012	2015
Светоотдача лабораторных образцов, лм/Вт	120	160	176	200
Светоотдача коммерческих белых холодных образцов, лм/Вт	84	147	164	188
Светоотдача коммерческих белых теплых образцов, лм/Вт	59	122	139	163
Цена изделия OEM, долл./к/лм	25	10	5	2

*Примечания.* 1. Для белых холодных СД индекс цветопередачи (CRI) составляет 70–80, соотношенная цветовая температура (CCT) – 4100–6500К. Для белых теплых СД CRI – >85, CCT – 2800–3500К.  
2. Ток возбуждения всех СД составляет 350 мА, площадь 1 мм<sup>2</sup>.  
3. Значения стоимости приведены для "разумных" партий (несколько тысяч штук) без учета стоимости драйвера и арматуры светильника.  
4. Срок службы СД (снижение светового потока на 70%) при мощности 1 Вт и токе 350 мА составляет 50 тыс. ч.

пасности, например при работе во влажной среде. Согласно оценкам, выполненным по программе Energy Star\*, применение повсюду в США эффективных твердотельных источников света позволит сократить потребность в электроэнергии на 10% и тем самым обеспечит ее ежегодную экономию в 17 млрд. долл. Кроме того, выделение в атмосферу двуокиси углерода сократится на 202 млн. т (что равноценно сокращению транспортного потока на 15 млн. легковых машин), а ртути – на ~3 т. По оценкам Министерства энергетики США, к 2027 году экономия энергии в стране в результате применения осветительных систем на основе светодиодов в коммерческом оборудовании и жилых помещениях составит 348·10<sup>12</sup> Вт·ч (рис.2). По расчетам европейских производи-



**Рис.2. Применение осветительных устройств на основе СД к 2027 году приведет к существенной экономии потребляемой энергии (данные корпорации Navigating and Consulting, подготовленные для Министерства энергетики США)**

\* Energy Star – программа, проводимая совместно Агентством защиты окружающей среды и Министерством энергетики США с целью экономии затрат на электроэнергию и защиты окружающей среды за счет эффективного использования электроэнергии. Категория Energy Star, присвоенная твердотельному источнику света, гарантирует соответствие изделия критерию эффективности и рабочим параметрам, установленным Министерством энергетики и промышленными фирмами.

лей, полная замена малоэффективных средств освещения более эффективными приведет к экономии около  $63 \cdot 10^3$  ГВт энергии и тем самым позволит сэкономить европейским потребителям ~7 млрд. евро, или ~9 млрд. долл.

Светодиоды долговечны и исключительно надежны, устойчивы к тряске, ударам и другим механическим воздействиям. При правильном использовании срок службы мощных СД составляет десятки тысяч часов. Производители светодиодов считают, что срок их службы может достигать 100 тыс. ч, т. е. 11 лет непрерывной работы. Это в 100 раз больше, чем для ламп накаливания, и в 5–10 раз больше, чем для флуоресцентных ламп (см. табл.1). Срок службы мощных сверхъярких светодиодов меньше – ~20–50 тыс. ч. Благодаря большому сроку службы светодиодов снижаются затраты на обслуживание и замену вышедших из строя светильников. Долговечность светодиодов делает их незаменимыми для осветительных систем, устанавливаемых в труднодоступных местах. К тому же, благодаря компактности СД-светильников и возможности подключения по принципу "Plug-and-play" упрощается их установка. Таким образом, основные свойства СД, способствующие расширению их применения, особенно белых светодиодов в средствах освещения, – высокая световая отдача и большая долговечность. По остальным показателям, таким как эксплуатационная готовность, индекс цветопередачи (Color Rendering Index, CRI), СД не должны уступать другим источникам света.

У светодиодов множество других достоинств, таких как безынерционность (время включения/выключения <100 нс), т. е. способность мгновенно зажигаться даже на морозе, отсутствие разогрева при облучении, миниатюрность, будоражащая воображение дизайнеров, и так далее. И еще одно важное достоинство СД, способствующее расширению их применения, – возможность реализации архитекторами, конструкторами, монтажниками самых неожиданных цветовых решений благодаря наличию светодиодов различного цвета свечения. СД могут использоваться для формирования изменяемого "под настроение" освещения. Белые стены комнаты могут непрерывно менять свой цвет, т.е. жилое или рабочее помещение может ежедневно или несколько раз в день принимать различные "облики".

Главный недостаток светодиодов – высокая стоимость. Пока их цена в пересчете на один люмен, излучаемый светодиодом, во много раз выше, чем у традиционных источников света. Правда, стоимость их непрерывно снижается, и если в 2004 году она составляла 250 долл./кЛм, то в 2006-м – уже 50 долл./кЛм (для сравнения, стоимость обычных источников света равна ~1 долл./кЛм). Производители утверждают, что в ближайшие два-три года им удастся снизить цену в пересчете на люмен примерно в десять раз, не уменьшая, а даже увеличивая мощность светодиодов. Впрочем, так или иначе,

речь идет о единовременных затратах, и, по оценкам специалистов, светодиодное освещение экономически себя оправдывает благодаря низкому энергопотреблению и низким эксплуатационным расходам.

К сожалению, характеристики светодиодов со временем меняются (особенно при высоких значениях тока возбуждения), цвет излучения "портится", первоначальный оттенок излучения меняется, снижается и его интенсивность. Но поскольку технология светодиодов стремительно развивается, они морально устаревают гораздо раньше, чем вырабатывают свой ресурс. В р-п-переходе светодиода продуцируется тепло, и если его не отводить, диод перегревается, отчего изменяются его характеристики, и он может выйти из строя. Так что очень важно строго контролировать количество выделяемого тепла и обеспечивать эффективный теплоотвод СД и ламп на их основе. Другой недостаток СД, которому пока разработчики не придают должного значения, – воздействие на зрение человека. Существуют и другие трудности в продвижении светодиодных систем, включая необходимость обеспечить законченное техническое решение системы освещения и возможность ее простой установки, а также адаптацию ее к стандартным электрическим интерфейсам и устройствам контроля.

### ИЗГНАНИЕ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Стремительный рост энергозатрат, стоимости энергии, а также усиление требований к охране окружающей среды привели к тому, что правительства многих стран мира обратили внимание на достоинства СД. Промышленники, экологи и энергетики объединяют свои усилия с целью в следующие десять лет свести к минимуму применение традиционных средств освещения, в первую очередь ламп накаливания. В начале 2007 года в США коалиция обеспечения эффективности осветительных приборов объявила о намерении способствовать скорейшему принятию стандартов, касающихся эффективности источников света. Эти стандарты должны способствовать отказу от применения ламп накаливания, которые вошли в быт человека одновременно с паровозом, и стимулировать их замену более эффективными источниками, в том числе и сверхъяркими светодиодами. В коалицию входят компания Philips Lighting, крупнейший мировой поставщик источников света, Национальный совет по охране природных ресурсов (общественная организация США), организация Международный день Земли (Earth Day Network), другие организации и электроэнергетические компании США.

Министерство энергетики США с 2000 года проводит программу разработок твердотельных средств освещения (Solid-State Lighting – SSL), рассчитанную до 2020 года. Программа предусматривает изучение ключевых SSL-технологий, разработку приборов и поддержку их коммерциализации. В начале 2008 года Министерство объявило о намерении ассигно-



вать четвертый цикл программы и отчислить 27,8 млн. долл. на проведение 13 проектов в этой области. Всего на трех предыдущих циклах Министерство затратило 75 млн. долл. Шесть проектов четвертого цикла предусматривают разработку или совершенствование имеющихся на рынке материалов, приборов и систем с целью достижения их высоких параметров при приемлемой стоимости. На эти проекты Министерство планирует израсходовать ~17 млн. долл. Остальные 10,8 млн. долл. будут затрачены на совершенствование основных технологий (создание стабильных p-i-n-структур высокоэффективных органических СД – OLED, совершенствование AlN-подложек для СД на основе нитридов, методов спектроскопии InGaN с целью улучшения характеристик зеленых диодов и т.п.).

Последний опрос американских покупателей показал, что 87% из них готовы использовать СД-светильники для частичного или полного освещения дома. При этом большинство готово платить за СД лампу в среднем 4,7 долл. (4% – до 11 долл.) против 0,5 долл. за традиционную лампу накаливания и 3 долл. за компактную флуоресцентную.

Главы правительств стран Европейского союза также энергично поддерживают работы, направленные на сокращение энергопотребления. В начале 2007 года правительство Великобритании объявило о поддержке двух проектов, проводимых представителями промышленности и академических институтов. Цель одного из них, рассчитанного на три года, – создание дешевых СД и GaN-излучателей на 150-мм кремниевых подложках. Министерство торговли и промышленности Великобритании планирует ассигновать на проведение этого проекта 3 млн. евро (~5,8 млн. долл.). В нем примут участие компании Filtronic, QinetiQ, Thoman Swan Scientific (дочерняя компания германского концерна Aixtron), Forge Europa и коллектив Кембриджского университета, специализирующийся в области материаловедения. Правительство Великобритании также поддерживает проводимую в стране компанией Sharp работу по получению материалов и структур OLED, планируя выделить на проект примерно половину его стоимости, составляющую в целом 3,3 млн. евро (~6,3 млн. долл.). В этом проекте участвуют компании Thorn Lighting, CDT (первопроходец в области OLED), Университет Дарема.

Амбициозная программа сокращения энергопотребления, проводимая европейскими производителями, должна привести к исчезновению в странах ЕС неэффективных домашних светильников к 2015 году.

В Австралии правительство намерено к 2010 году постепенно прекратить производство ламп накаливания.

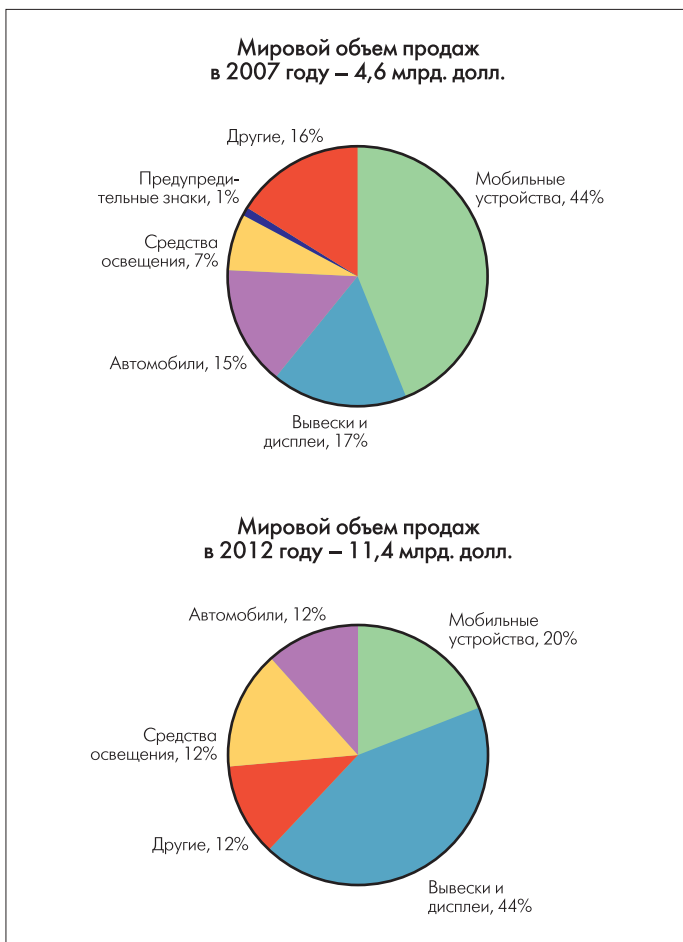
## СВЕТОДИОДЫ СИЯЮТ НА SSL-РЫНКЕ

Сегодня можно выделить шесть основных сегментов современного рынка сверхъярких СД:

- мобильные устройства: дисплеи и подсветка клавиатуры мобильных телефонов, портативные компьютеры, цифровые фотоаппараты;
  - наружные средства рекламы: одноцветные бегущие сообщения, большие полноцветные видеоэкраны;
  - автомобильные системы: салоны (подсветка панели управления, плафон индивидуального освещения), наружные лампы легковых, грузовых автомобилей и автобусов (дополнительный центральный стоп-сигнал, стоп-сигнал, сигнальные лампы поворота, задние фары);
  - осветительные устройства: освещение жилых и торговых помещений, специальное архитектурное декоративное освещение, наружные вывески, уличное освещение, опознавательные огни т.п.;
  - сигнальные средства: дорожные знаки, пешеходные переходы, железнодорожные и авиазнаки;
  - другие средства: индикаторы, лампочки коммерческого, промышленного и бытового электрооборудования, освещение зрелищных мероприятий, комнатные дисплеи и т.п.
- Таким образом, в результате многих лет стремительно-го развития СД высокой яркости становятся товаром повышенного спроса на рынке современных твердотельных осветительных устройств.

Опрос участников представительной Международной светотехнической ярмарки Гонконга 2007 года показал, что у 72% из них объем коммерческой деятельности в области светильников на основе сверхъярких СД за шесть месяцев увеличился на 20%, а 63% предполагают, что к 2009 году на долю СД-светильников придется более 50% объема продаж их компаний. В работе ярмарки приняли участие 1300 компаний из 31 страны мира. По мнению крупнейших производителей средств освещения, наибольшее применение светильники на основе СД высокой яркости найдут в системах освещения улиц/парков (20% рынка), жилых помещений (17%), торговых предприятий/рекламы (17%) и офисов (15%).

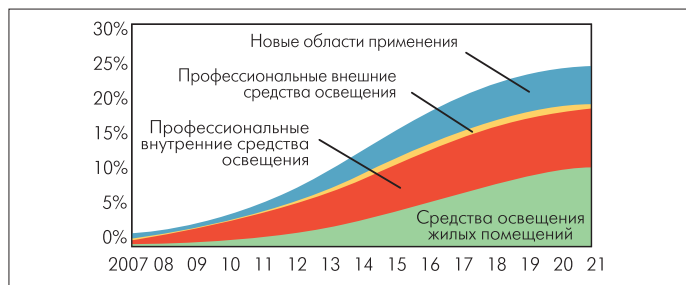
Эти данные соответствуют оценке рынка СД компанией Strategies Unlimited, согласно которой среднегодовые темпы роста СД в сложных процентах за период 2007–2012 годы



**Рис.3. Динамика рынка твердотельных средств освещения**

составят 20%. В результате к 2012 году рынок СД достигнет 11,4 млрд. долл. При этом на долю приборов для средств освещения придется 12% рынка СД против 7% в 2007-м, что соответствует объему их продаж 1,37 млрд. долл. против 330 млн. долл. (рис.3).

Самый быстрорастущий сегмент рынка светодиодов высокой яркости, по мнению экспертов, – сектор твердотельных средств освещения. Большую часть этого сектора составляют системы архитектурного и уличного освещения. Ключевым фактором, способствующим применению светодиодного освещения, считается возможность создания уникального эстетического меняющегося цветного освещения, способного адаптироваться к конкретной ситуации и даже настро-



**Рис.4. Доля твердотельных средств освещения в мировом рынке осветительных устройств к 2021 году составит 25%. При этом наибольший объем продаж придется на средства освещения жилых помещений**

ению потребителей. Применение светодиодов для освещения помещений пока только начинает развиваться. Правда, и здесь уже достигнуты определенные результаты. Так, строительные компании Калифорнии начинают устанавливать СД-осветители в помещениях делюксовых новостроек и во внешнем их оформлении.

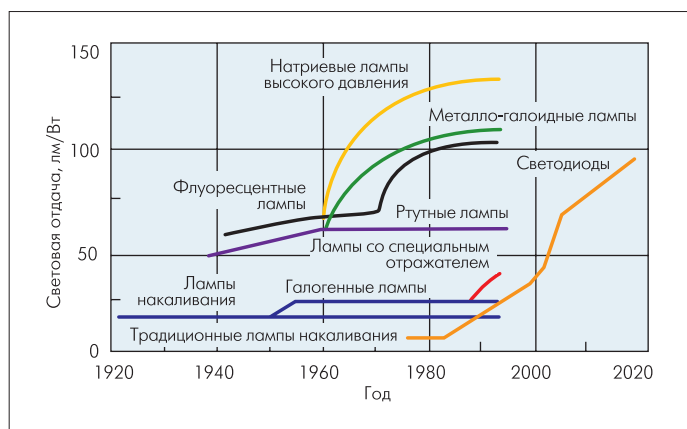
Директор австрийской компании Ledon Lighting, входящей в крупнейший мировой светотехнический концерн Zumtobel Lighting и специализирующейся исключительно в области СД осветительных устройств, Рюди Хуг настроен весьма оптимистично относительно будущего SSL-рынка. По мнению Хуга, к 2021 году SSL заменят до 25% традиционных средств освещения (рис.4). Сейчас основные устройства на этом секторе рынка СД – профессиональные системы внутреннего освещения (55% SSL-рынка). Однако благодаря высоким темпам роста продаж доля домашних СД-светильников к 2021 году на рынке SSL достигнет 45%. Доля профессиональных устройств внутреннего освещения на мировом рынке сократится до 32%, и более широкое распространение (до 21%) СД получат в новых областях применения. Уже в 2008 году, по оценкам Хуга, СД заменят 5% галогенных ламп. Темпы замены ламп накаливания и флуоресцентных ламп будут быстро нарастать после 2015 года и к 2021-му СД заменят 23% этих ламп.

Реализация этих прогнозов потребует улучшения цветового состава спектра излучения и совершенствования конструкций системы освещения. И еще – пока для светодиодов, как для всякой новой технологии, нет единых стандартов.

### СТАНДАРТЫ РАЗНЫЕ НУЖНЫ, СТАНДАРТЫ РАЗНЫЕ ВАЖНЫ

Для развития промышленности твердотельных средств освещения и исключения крикливой и некачественной их рекламы необходимы стандарты. И эти стандарты уже активно разрабатываются такими организациями, как Североамериканское общество инженеров-светотехников (Illuminating Engineering Society of North America, IESNA), организация Underwriters Laboratory, Национальный институт стандартов США (ANSI), Международная комиссия по освещению (International Council on Illumination, CIE) и многими другими. ANSI разработан проект стандарта цветности C78.377A, определяющий восемь номинальных четырехугольников соотношенной цветовой температуры (Correlated Color Temperature, CCT) светодиодов. IESNA рецензирует стандарт на световой поток LM-79, задающий способы установки светодиодов в интегрирующей свет сфере, методы измерения и стабилизации полученных результатов. Там же рассматривается и стандарт на срок службы СД LM-80, в том числе при снижении светового потока на 70% и на 50% от начального значения (L70 и L50, соответственно).

Совместными усилиями МЭК, Института экономической безопасности, Национального института стандартов и Национальной ассоциации производителей электрооборудования разрабатываются стандартные определения, относящиеся к



**Рис.5. По значению эффективности белые светодиоды сопоставимы с обычными источниками света (данные компании Lumileds Lighting)**

твердотельным светильникам и светодиодам. И хотя выработка таких определений не должна вызывать особых затруднений, она сопровождается многочисленными обсуждениями. Стандартные определения будут включены в документ RP-16 Североамериканского общества инженеров-светотехников.

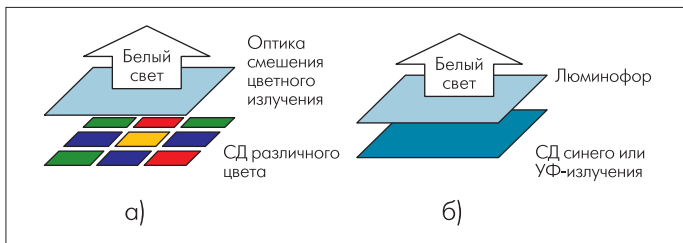
CIE разрабатывает стандарт, касающийся общих вопросов воздействия излучения СД на глаза, — S009. До сих пор для СД действовал стандарт МЭК на лазерное воздействие IEC 60825. Национальным институтом стандартов США готовится проект стандарта C82XX на электробезопасность светодиодных осветительных систем.

Специалисты вне сообщества инженеров-светотехников плохо понимают, что значит "цветовая температура", а компании, специализирующиеся в области осветительных систем, — что значат оттенки белого света. Специальной группой, работающей с Агентством по охране окружающей среды и Центром светодизайна, проведены маркетинговые исследования, показавшие, что определение оттенка может быть весьма полезным и эффективным. Хотя результаты этого исследования пока не предложены в виде стандарта, они, очевидно, будут широко использованы для указания оттенков света пользователям.

## ГОРИ, ГОРИ ЯСНО

Сегодня все больший интерес производителей оборудования привлекают белые светодиоды, которые по световой отдаче становятся сопоставимыми с традиционными источниками света (рис.5) и уже могут сформировать выгодный и крупный сектор рынка средств освещения.

Существуют два основных способа получения белого излучения светодиода. Первый — смешивание цветов, для чего на подложке размещаются красные, зеленые и синие (RGB) светодиоды, излучение которых смешивается с помощью оптической системы (рис.6а). С помощью RGB-технологии можно получать не только белый цвет. Набор красных, зеленых и синих светодиодов обеспечивает до 16 млн. различных оттенков, включая и теплый белый. В результате изготовления

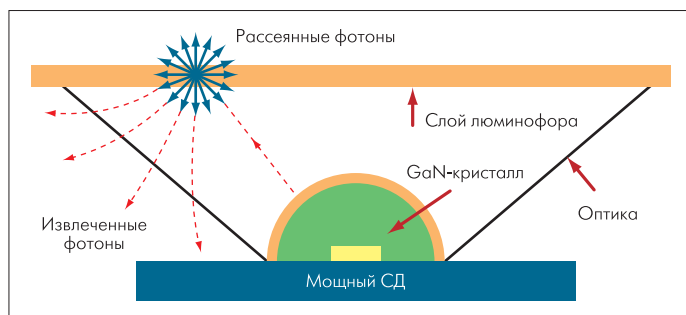


**Рис.6. Основные способы получения светодиодов белого цвета: смешение цветов (а) и применение фосфора (б)**

нескольких светодиодов на подложке достигается высокий суммарный световой поток. Но из-за aberrаций оптической системы цвет в центре и по краям матрицы неодинаков, а главное, в связи с неравномерным отводом тепла от краев и центра матрицы светодиоды нагреваются по-разному. В итоге их свечение в процессе старения изменяется по-разному – суммарные цветовая температура и цвет в ходе эксплуатации "плывут". Это явление достаточно сложно и дорого компенсировать.

Белые RGB-матрицы используются в многоцветных табло и дисплеях, наружной рекламе, в системах освещения транспортных средств, для наружной подсветки домов или ландшафта, подсветки ЖКИ портативных электронных приборов. Они применяются для "здорового" освещения, устраняющего некоторые побочные физиологические и психологические эффекты, вызываемые люминесценцией. Матрицами светодиодов можно управлять с помощью микропроцессоров и добиваться различных цветовых эффектов. Все это открывает перед дизайнерами огромные возможности.

Согласно второму способу, на синий светодиод наносится желтый (или зеленый плюс красный) люминофор. В результате два или три излучения смешиваются, образуя белый или близкий к белому свет. Такие светодиоды значительно дешевле RGB-матриц (в пересчете на единицу светового потока). В отличие от RGB-светодиодов, оттенок белых СД с люминофорным покрытием задается в процессе их производства. По оценкам компании InterMatrix сегодня в 51% белых СД для средств освещения используются люминофоры на базе алюмоиттриевого граната (АИГ) фирмы Nichia, в 20% – АИГ-люминофоры других фирм, еще в 20% – люминофоры на основе алюмотербиевого граната



**Рис.7. Структура, предложенная инженерами Политехнического института Ренселе**

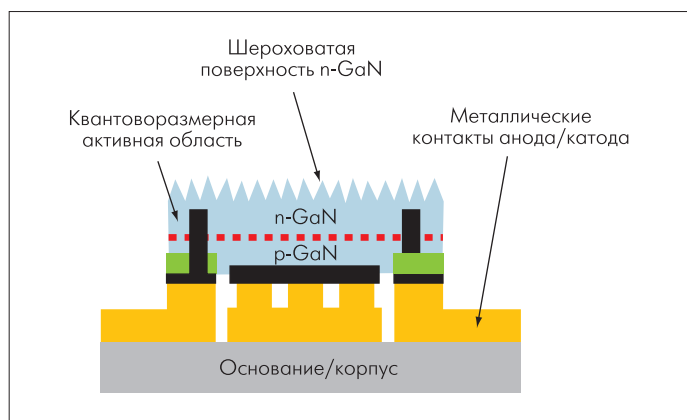
(АТГ), лицензируемого у компании Osram. В оставшихся 9% применяются желто-зеленые люминофоры на основе силиката с длиной волны свечения в зависимости от выбранной комбинации двухвалентных металлов и примеси галогена в диапазоне 500–575 нм.

Недостатки СД с люминофорным покрытием – меньшая, чем у RGB-матриц, светоотдача из-за преобразования света в слое люминофора, трудность нанесения равномерного по толщине покрытия (и как следствие, получение неконтролируемой цветовой температуры). К тому же, люминофор стареет быстрее светодиода. Инженеры Исследовательского центра средств освещения при Политехническом институте Ренселе для сокращения потерь света при использовании люминофорного покрытия предложили метод извлечения рассеянных фотонов. Метод заключается в размещении люминофора вдали от излучающей диодной структуры (рис.7). СД с люминофорным покрытием находят широкое применение в карманных фонариках, передних фарах автомобилей, системах сигнальных и навигационных огней, устройствах подсветки таблиц, дорожных знаках, рекламных вывесках, средствах уличного освещения.

Интерес представляют ZnSe-светодиоды, изготавливаемые на ZnSe-подложке. Активная область диода при этом излучает синий свет, а подложка – желтый. Достоинства белых ZnSe-светодиодов – малое рабочее напряжение (2,7 В) и высокая устойчивость к статическому разряду. Светодиоды ZnSe излучают свет в гораздо более широком диапазоне цветовых температур, чем приборы на основе GaN (3500–8500К против 6000–8500К), что позволяет создавать приборы с более теплым белым свечением. Однако ZnSe СД недолговечны, их сопротивление достаточно велико, и пока они не нашли коммерческого применения.

Характеристики коммерческих белых светодиодов, выпускаемых достаточно большим числом компаний, за последнее время существенно улучшились. Конкуренция стимулирует разработку новых архитектур диодов, обеспечивающих высокую эффективность выхода фотонов, благодаря чему их характеристики могут вплотную приблизиться к параметрам, требуемым для широкого развертывания SSL. Основные параметры, наиболее часто и не всегда правильно используемые для описания сверхъярких СД, – это световой поток и световая отдача. Но эти параметры зависят от многих других характеристик, в первую очередь от управляющего тока и размера диода. Световая отдача небольших диодов с малыми значениями управляющего тока (20 мА) будет выше, чем у приборов "класса средств освещения".

Для получения большого светового потока необходимо увеличивать управляющий ток. С этой точки зрения интерес представляет так называемый TFFC СД компании Lumileds, в котором тонкопленочный (TF) InGaN/GaN-светодиод семейства



**Рис.8. Структура TFFC-светодиода**

Luxip имеет структуру, монтируемую методом перевернутого кристалла (flip-chip – FC) (рис.8). Диод изготавливается путем монтажа обычной FC-структуры на основание с помощью золотых межсоединений, удаления сапфировой подложки с помощью эксимерного лазера, обработки верхнего слоя GaN УФ-излучением и разбавленным раствором едкого калия для закругления поверхности перед проведением операций литографии и травления. Текстурирование поверхности позволяет увеличить светоотдачу и существенно повысить квантовую эффективность светодиода. А flip-chip-структура позволяет получать высокую плотность монтажа СД.

Выходная мощность синих TFFC-светодиодов (длина волны 425 нм) при токе 350 мА составляет 566 мВт при внешней квантовой эффективности 56% и энергетической эффективности 44%. При токе 2 А выходная мощность такого СД равна ~2 Вт. Максимальная светоотдача белого TFFC СД с YAG:Ce-люминофором составляет 147 лм/Вт при токе 10 мА, 88 лм/Вт при 350 мА и 56 лм/Вт при 1000 мА (для сравнения, светоотдача галогенных ламп равна 25 лм/Вт). Максимальная яркость белых негерметизированных СД – 58,8 Мнт, среднее значение яркости при светоотдаче 40 лм/Вт – 50 Мнт, что превосходит этот параметр галогенных источников света (15–30 Мнт при 40 лм/Вт) и незначительно отличается от яркости высокоинтенсивных газоразрядных ламп (60–80 Мнт при 100 лм/Вт). Испытания на надежность – ключевого параметра, определяющего коммерческий успех прибора, – показали, что выходная мощность белого СД при выдержке диода в течение 1 тыс. ч при температуре 110°C изменяется лишь на несколько процентов. Аналогичные результаты были получены при испытании синих СД в течение 7 тыс. ч при температуре 85°C.

На основе TFFC-структуры компанией Lumileds создан СД размером 1×1 мм, светоотдача которого составила 115 лм/Вт при токе 350 А и 61 лм/Вт при 2 А. Для диода размером 2×2 мм светоотдача равна 131,5 лм/Вт. Максимальный световой поток СД – 502 лм, соотношенная цветовая температура – 4685К, что меньше, чем у многих конкурирующих приборов и ближе к пожеланиям покупателей.



В конце 2007 года компания Lumileds объявила о создании мощного СД с TFFC-структурой, смонтированного в корпус K2. Испытания показали, что при токе возбуждения 1 А световой поток СД достигает 160 лм. По утверждению разработчиков, СД способен работать при токе до 1,5 А. В этом случае световая энергия превысит 220 лм. Максимальная температура перехода – 150°C, тепловое сопротивление диода в корпусе K2 – 5,5°C/Вт. Таким образом, создан надежный СД, способный работать при токе возбуждения, превышающем 350 мА (пока стандартное максимальное значение управляющего тока СД), с высокими значениями световой энергии и световой отдачи без ухудшения своих характеристик. СД марки Luxeon в корпусе K2 позволит снизить затраты на средства контроля температурного режима, схему управления осветительным устройством, оптику и число используемых СД.

Не отстают от компании Lumileds и другие крупные изготовители СД. Так, компания Cree в конце 2007 года объявила о создании белых холодных и теплых светодиодов (ССТ = 5813 и 2950К, соответственно), световая отдача которых при токе 350 мА составляет 129 лм/Вт и 99 лм/Вт. Световой поток холодных СД – 135,7 лм, теплых – 104,2 лм. Кроме того, компания продемонстрировала однокристальный белый СД с световым потоком более 1000 лм при токе 4 А. Световая отдача белого холодного диода составляет 72 лм/Вт, входная мощность – 14,6 Вт, прямое напряжение – 3,65 В. Световой поток белого теплого диода равен 760 лм, световая отдача – 52 лм/Вт. Отмечается, что параметры измерялись сразу же по включению, не дожидаясь установления теплового равновесия. Размер кристалла не указывается, го-

ворится лишь, что размер стороны где-то между 1 и 2 мм. Как правило, компания Cree начинает промышленное производство новых изделий через один-два года после объявления о их разработке.

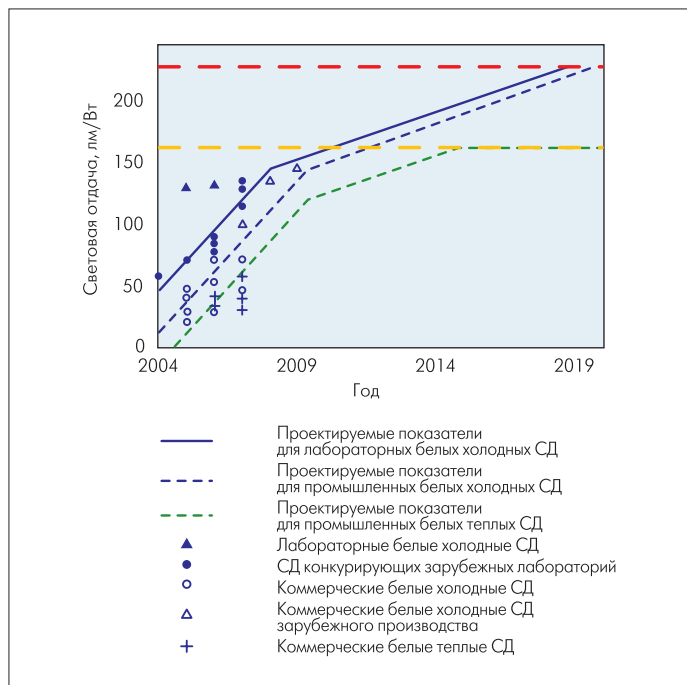
Световую отдачу белых холодных (ССТ – 5000К) СД, равную 136 лм/Вт при токе 350 мА, получили специалисты компании Osram Opto Semiconductors. Максимальный световой поток диодов площадью 1 мм<sup>2</sup> при работе в стандартных условиях составил 155 лм. При токе возбуждения 1,4 А световой поток достигает 500 лм. Это значит, что новые СД найдут применение не только в твердотельных средствах освещения, но и в проекционных устройствах. Такие результаты получены за счет оптимизации технологии изготовления светодиодов, применения высокоэффективного люминофора и специального корпуса.

В январе 2008 года компания Osram планировала выпустить на рынок серию однокристальных СД марки Diamond Dragon (Алмазный дракон) со световым потоком 250 лм при токе 1,4 А (максимальный ток может достигать 2 А). Диоды изготовлены по тонкопленочной GaN-технологии и поставляются в корпусе под поверхностный монтаж. Входная мощность СД серии лежит в диапазоне 5–8 Вт, тепловое сопротивление составляет 2,5К/Вт, максимальная температура перехода – 175°C, срок жизни – 50 тыс. ч, ССТ диодов – 2700–6500К.

Интерес представляет новый тип ультрамощных светодиодов, предложенный компанией Luminus Devices, так называемые PhlatLight (от СД на основе фотонной решетки – Photonic lattice). Работа этих СД основана на управлении распространением фотонов вблизи решетки прозрачного диэлектрического материала с периодически изменяющимся показателем преломления при сопоставимых значениях длины волны фотонов и периода решетки. Для светодиодов видимого излучения размеры фотонной решетки составляют несколько сотен нанометров, т.е. она должна изготавливаться методами нанотехнологии. Благодаря непосредственному излучению сфокусированного света отпадают многие проблемы надежности, присущие СД в обычных корпусах, рассчитанных на мощные диоды.

Компанией Lumileds разработан процесс массового производства дешевых диодов семейства PhlatLight, монтируемых в усовершенствованный корпус, рассчитанный на приборы с рассеиваемой мощностью от 20 до более 100 Вт. Типичные СД семейства выполняются на одном кристалле большой площади (от ~4 до 14 мм<sup>2</sup>) и работают при плотностях импульсного тока до 2,5 мА/мм<sup>2</sup>. Тепловое сопротивление СД с рассеиваемой мощностью 100 Вт не превышает 0,6°C/Вт. Испытания в обычном и ускоренном режимах показали, что срок службы диодов семейства PhlatLight превышает 120 тыс. ч.

СД компании Luminus уже нашли применение в проекционных телевизорах фирм Samsung и NuVision. В треть-



**Рис. 9. Повышение световой отдачи светодиодов в соответствии с программой Министерства энергетики США**

ем квартале 2008 года Luminus планирует выпустить опытные образцы белых светодиодов на ток около 30 А и световой поток до 4000 лм. Правда, при этом большой светоотдачи ожидать не приходится. В серию белых СД войдут приборы холодного, нейтрального и теплого свечения, рассчитанные на работу с максимальным световым потоком (ток до 2 А/мм<sup>2</sup>) или с максимальной светоотдачей (до 80 лм/Вт). Первыми намечены к выпуску образцы PhlatLight CBT-90 и CBM-360. СД PhlatLight CBT-90 со световым потоком более 1600 лм, выполненный на кристалле площадью 9 мм<sup>2</sup>, демонстрировался на всемирной ярмарке LIGHTFAIR International, проходившей в Лас-Вегасе в конце мая 2008 года. Площадь излучающей поверхности диода CBM-360 (белый холодный с CCT = 6000К) составляет 36 мм<sup>2</sup>, световой поток – 4000 лм. По утверждению разработчиков, новые СД пригодны для архитектурного освещения, рекламы, освещения промышленных и жилых помещений.

Приведенные примеры – лишь небольшая часть выпускаемых в мире сверхъярких светодиодов. Тем не менее, из рассмотрения их характеристик становится ясным, что достигнутые значения светоотдачи СД ведущих светотехнических компаний превзошли ожидаемые результаты. Таким образом, появилась возможность ускоренного достижения параметров, заложенных Министерством энергетики США в многолетнюю программу развития SSL на 2009–2014 годы (см. табл.2). Правда, по данным SSL-программы Министерства энергетики США, в дальнейшем темпы повышения световой отдачи до уровня 228 лм/Вт для белых холодных и до 162 лм/Вт для белых теплых диодов снизятся (рис.9). Ведущие производители СД, стремящиеся укрепить свое положение на рынке, будут уделять все больше внимания освоению промышленного выпуска разработанных СД. Большой приоритет получают работы в области эпитаксиального выращивания диодных структур и совершенствования технологии их производства. В будущем все большую популярность получают органические светодиоды с большей, чем у обычных СД, светоотдачей и меньшим энергопотреблением.

---

При сравнении СД светильников с другими источниками света следует учитывать такие существенные показатели, как стоимость владения на протяжении срока службы, в которую входят затраты на рабочую силу, капитальные затраты, затраты на обслуживание и ремонт. Следует также учитывать и объем энергосбережения на протяжении срока службы светильника. При этом необходимо помнить, что светодиод – не простой эквивалент обычного источника света (лампы накаливания, флуоресцентной лампы). Светодиод лишь часть светильника, содержащего не только источник света, а и отражатели, линзы, источник питания и электронную схему управления. Но это уже другая история.

