

СВЕТОДИОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УКРАСИМ ЖИЗНЬ СВЕТОМ

В.Майская

За последние десять лет темпы развития технологии светодиодов (СД), стимулируемые интенсивным ростом их применения в системах освещения, стали особенно высокими. Цены светодиодов быстро снижаются, их возможности расширяются, массовое производство становится все более эффективным. Но технология далека от статического равновесия. Фундаментальные исследования материалов и методов изготовления СД приводят к неожиданным качественным скачкам. По эффективности излучения современные светодиоды далеко опережают диоды, изготовленные с помощью предыдущих технологий. Они отличаются чрезвычайно большим сроком службы (измеряемой десятилетиями). По спектру и природе света они намного более совершенны, чем любой источник светового излучения, созданный человечеством. Рассмотрим некоторые инновации и разработки, способствующие дальнейшему развитию светодиодной технологии.

Светодиоды появились на рынке 50 лет назад, но до последнего времени они в основном использовались в устройствах хозяйственно-бытового назначения. Сейчас наблюдается быстрое развитие светодиодной технологии в соответствии с законом, эквивалентным закону Мура для полупроводниковой технологии. Это – закон Хейтза (Heitz's Law), согласно которому каждые десять лет стоимость светодиодов в пересчете на излучаемый световой поток уменьшается в десять раз, а световой поток на определенной длине волны возрастает в 20 раз (рис.1) [1].

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Светодиодные лампы – прекрасная альтернатива не только обычным лампам накаливания, светотдача которых составляет всего 15 лм/Вт, но и люминесцентным лампам

(светоотдача 47–75 лм/Вт), металлогалогенным лампам (до 115 лм/Вт) и натриевым лампам высокого давления (150 лм/Вт). На рынке уже представлены образцы со светотдачей до 100 лм/Вт, и этот показатель непрерывно увеличивается и, очевидно, сможет достичь 260–300 лм/Вт. И по качеству излучаемого света современные СД не уступают, а в ряде случаев превосходят традиционные лампы накаливания, газоразрядные и люминесцентные лампы. Они активно используются в уличном освещении, для освещения жилых, офисных и торговых помещений. Благодаря энергосбережению светодиодные лампы пользуются популярностью в тех случаях, когда необходима оригинальная нестандартная система освещения. Сегодня светодиодные модули повсеместно применяются для подсветки рекламных объектов (баннеры, световые витрины и пр.). Кроме того, считается модным и престижным применение светодиодов в ландшафтном дизайне, а также

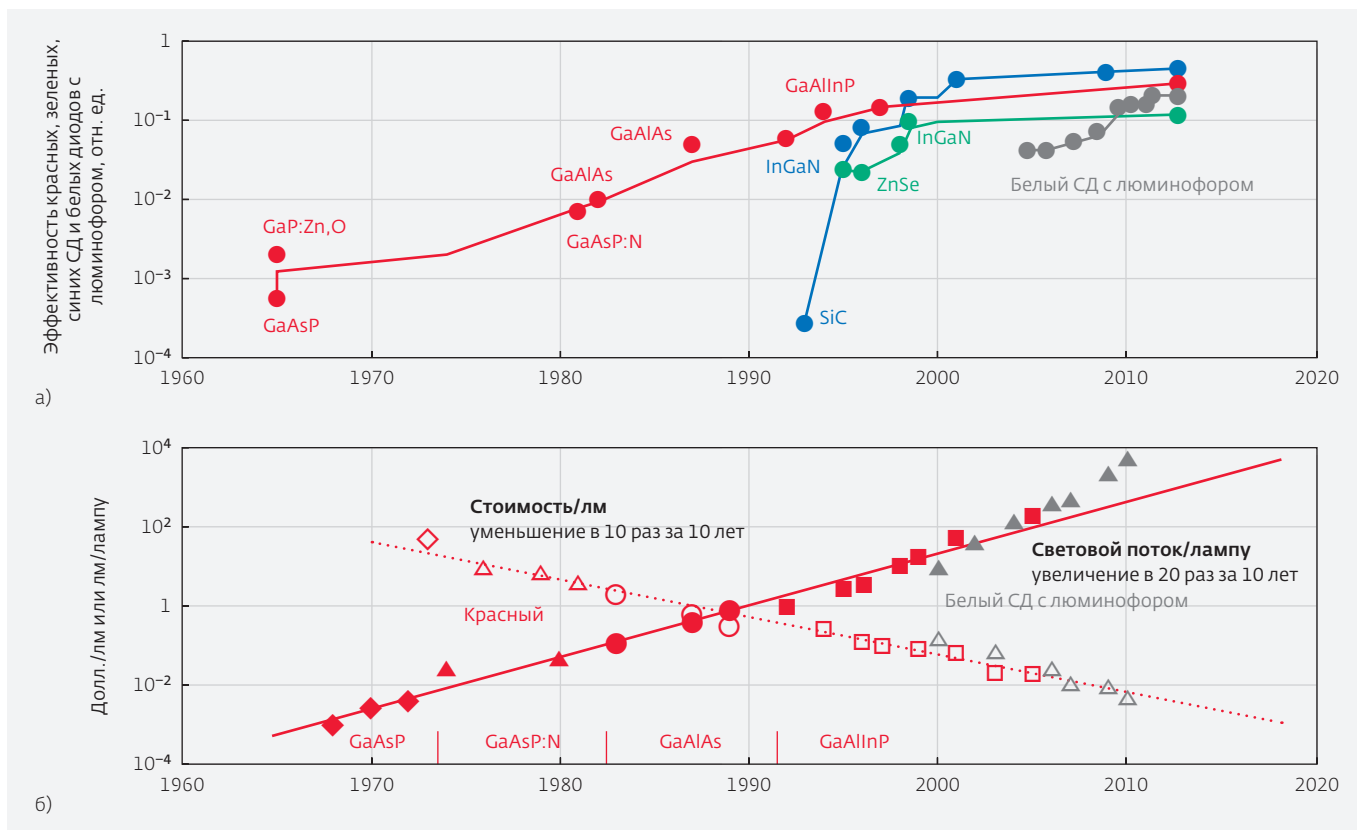


Рис.1. Развитие светодиодной технологии (а) и действие закона Хейтца на примере красных СД и белых СД с люминофором Р (б)

в дизайне интерьеров и для декоративной подсветки зданий. При условии, что рынок не будет наводнен дешевыми светодиодами плохого качества, крупные игроки смогут существенно расширить сбыт своих изделий. Так какво современное состояние рынка светодиодов и систем освещения на их основе?

РЫНОК СВЕТОДИОДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

По данным обзора рынка упакованных светодиодных компонентов и универсальных СД-светильников, представленного компанией Strategies Unlimited на пленарном заседании международной выставки и конференции современной светотехнической промышленности Strategies in Light (SIL) 2014, мировой объем продажи упакованных СД в 2013 году составил 14,4 млрд. долл.* В 2018 году он достигнет 25,9 млрд. долл. (рис.2). Темпы роста продаж СД-светильников будут еще

выше. Увеличению продаж СД и твердотельных источников света способствует снижение цен на светодиоды до уровня, приемлемого для замены традиционных ламп в устройствах освещения более энергоэффективными приборами с большим сроком службы (рис.3).

Поскольку многие секторы рынка светодиодов уже насыщены, основной стимулятор роста рынка в текущем десятилетии – это системы

* При оценке рынка упакованных светодиодов не учитывались продажи бескорпусных диодов, а также ИК- и УФ-приборов, используемых в промышленности, системах безопасности и в других приложениях.

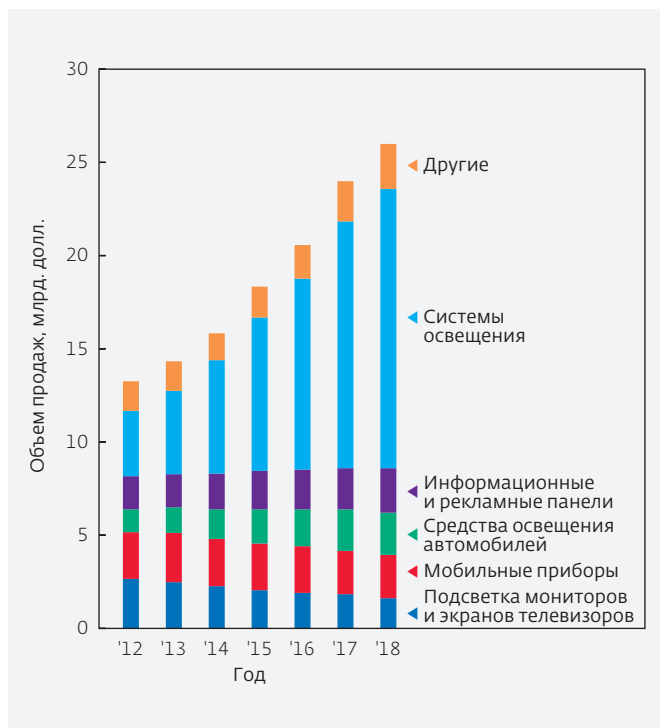


Рис.2. Динамика развития рынка светодиодов

освещения, продажи которых уже в 2012 году "низвергли с престола" светодиоды для подсветки широкоформатных дисплеев и экранов телевизоров. И если вплоть до 2013 года рост рынка был обусловлен в первую очередь увеличением продаж как светодиодной подсветки, так и универсальных СД-светильников, то в 2014 году на долю упакованных светодиодов для светильников придется более 50% рынка. Объем продаж упакованных СД за рассматриваемый период возрастет на 12,9%, частично благодаря 27%-ным совокупным темпам роста применения СД в осветительных

системах, а также благодаря признанию потребителями достоинств СД-ламп и увеличению применения светодиодов для замены обычных осветительных ламп и ламп в светильниках. Продажи СД-ламп, предназначенных для замены, в 2013 году составили 4,8 млрд. долл. и, согласно прогнозам, в 2018 году достигнут 12,2 млрд. долл. При этом, аналитик компании Катя Евстратьева отметила, что, как это не удивительно, но на долю американских производителей в 2013 году пришелся основной объем продаж СД для систем освещения (31% против 21% для Японии). Большую часть продаж обеспечили изделия компании Cree – крупнейшего поставщика осветительной аппаратуры*. Отмечалось также, что, несмотря на рост применения СД в осветительной аппаратуре, в будущем они могут уступить свое положение на рынке интегрированным СД или модулям твердотельных источников излучения. Такие новые осветительные системы будут способствовать уменьшению габаритов источников света и созданию СД-матриц, способных освещать большие площади.

На обоих рынках (СД и систем освещения) рост продаж будет происходить при снижении цен на светодиодные изделия, которые уже достигли уровня, приемлемого для замены традиционных устройств освещения более энергоэффективными светодиодными светильниками с большим сроком службы.

Региональная структура рынка СД-устройств

В 2013 году 68% продаж светодиодной техники пришлось на долю 10 ведущих компаний – Cree,

* См.: Червинский М. Новая продукция компании Cree. Возможности для разработчиков расширяются – настоящий выпуск, с.64.

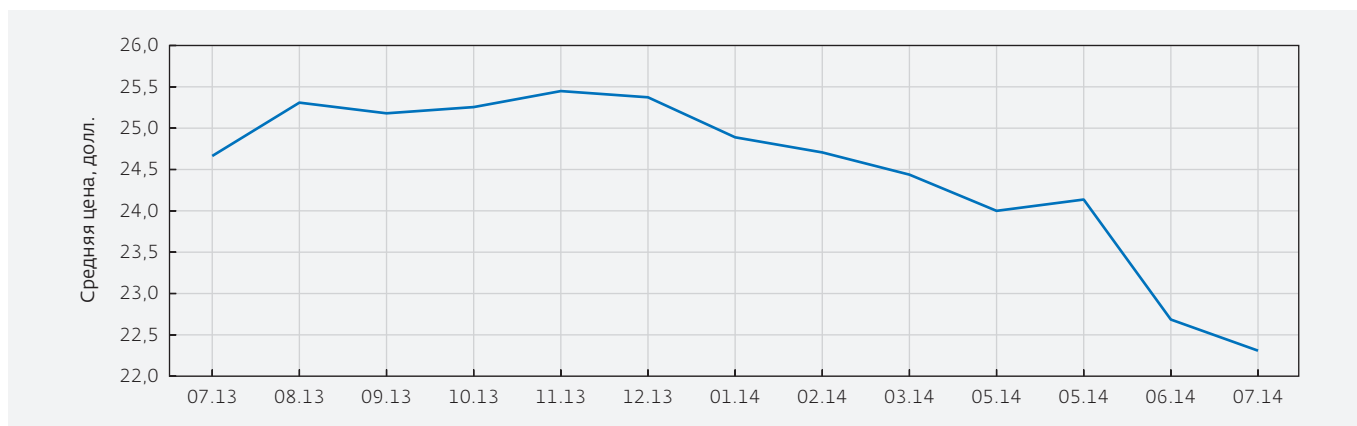


Рис.3. Изменение средних розничных цен светодиодов (по данным компании IHS)

Applied Materials, Veeco Instruments, (США), Philips Lighting (Нидерланды), Nichia Corporation, Everlight Electronics (Япония), Seoul Semiconductor, LG (Южная Корея).

Согласно региональной структуре мирового рынка светодиодной промышленности, наибольший объем продаж в 2013 году приходился на долю японских компаний (рис.4). Второе место по объему продаж заняла Южная Корея. Но, исключив из рассмотрения Японию и Южную Корею, получим намного более интересную региональную структуру продаж. Так, в США рост продажи стимулировали всего три компании, а в Европе только одна. В то же время в Тайване рост продаж обеспечили 13 компаний и в Китае – девять. Это свидетельствует об улучшении качества продукции и увеличении объема продаж на отечественных рынках, а также о появлении новых start-up компаний, стремящихся завоевать переполненный светодиодный рынок [2].

Аналитическая компания IHS отметила пять тенденций развития СД-технологии на 2014 год:

- консолидация поставщиков. Превышение поставок СД на рынок вызывает снижение как их цен, так и прибыли изготовителей, что и может привести к консолидации поставщиков;
- увеличение IQ осветительной аппаратуры. В таких приложениях, как освещение улиц, административных зданий целесообразно

применять интеллектуальные светильники, которые позволяют в краткосрочной перспективе перекрывать первоначальные расходы и в долгосрочной перспективе получать доходы. Рынок интеллектуальных светильников в 2014 году, по-видимому, существенно увеличится;

- наступление перелома в промышленности. Год 2014 – год, когда расчет окупаемости инвестиций приобретает смысл, и производство становится рентабельным;
- изменение динамики светодиодной технологии. Согласно прогнозу IHS, в 2014 году в светодиодной промышленности произойдут три важных изменения: значительно возрастут продажи СД средней мощности, спрос на мощные СД также будет увеличиваться, а основным фактором, определяющим спрос на СД, станет их цена, а не параметры. И еще одно новое направление в технологии – освоение производства светодиодов на кремниевых подложках [3].

Конечно, нельзя не отметить насколько быстро светодиоды стали эффективной альтернативой традиционным источникам света. Но, как было отмечено на международной торгово-промышленной выставке LightFair 2014, состоявшейся 3-5 июня в Лас-Вегасе, их широкому применению пока препятствуют три проблемы. Для изготовителей основная трудность заключается в том, что, выпустив светильник со штепселем под

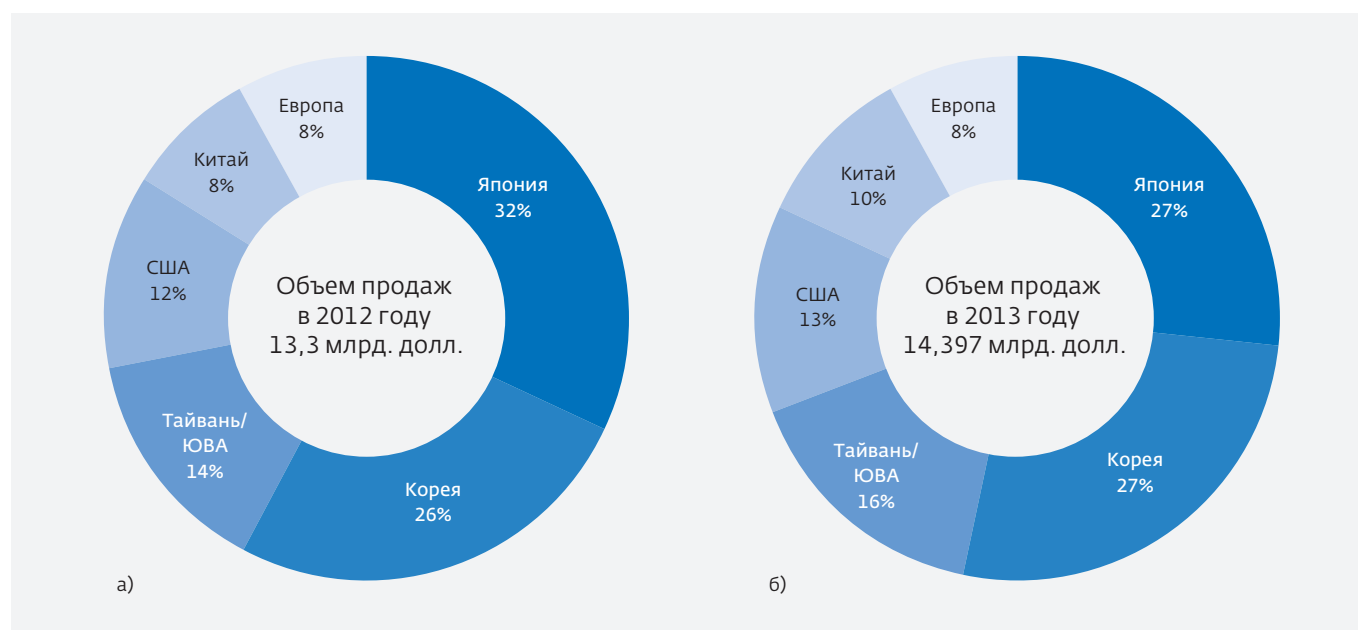


Рис.4. Региональная структура рынка упакованных СД в 2012 (а) и 2013 (б) годы

модифицированную (ретрофитную) СД-лампу, они в течение 10 лет не смогут продать другую лампу под этот штепсель, поскольку срок службы СД равен 10 годам. Им нужно будет отказаться от создания в торговой сети запасов ретрофитных СД-ламп, обеспечивающих каждые два-три года приемлемую прибыль на инвестированный капитал, и разработать другую бизнес-модель.

Вторая проблема, обсуждавшаяся на LightFair, – срок службы источника питания светильника может не соответствовать 10-летнему сроку службы СД-лампы. В результате гарантия на светодиодную систему может быть нарушена. Очевидно, профессионалам в области светодиодной техники следует обратить внимание на источники питания СД.

И наконец, несоответствие светодиода и используемого диммера может привести к возврату светильника изготовителю или монтажной организации. Компания Lutron, мировой лидер в области производства компонентов для управления освещением в домах, офисах и частных резиденциях, испытывает тонны СД, чтобы убедиться в том, что они могут "разговаривать" с ее устройствами управления [4].

Вот почему аналитики компании Strategies считают, что последующие пять лет будут весьма впечатляющими для промышленности твердотельных систем освещения (SSL). Как же промышленность решает стоящие перед ней проблемы?

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И РАЗРАБОТКИ, СТИМУЛИРУЮЩИЕ РАЗВИТИЕ СВЕТОДИОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

GaN-светодиоды на кремниевой подложке

Сегодня при стандартной технологии в производстве светодиодных GaN-компонентов в основном используются сапфировые подложки-заготовки диаметром 50 и 100 мм. Но сапфир не дешев и применение подложек большого диаметра, позволяющих повысить выход годных приборов, приводит к удорожанию СД.

Внимание ученых и специалистов промышленности давно привлекают GaN СД на кремниевых подложках благодаря их экономической эффективности и возможности массового производства приборов, сопоставимых по параметрам с диодами на сапфире. Так, GaN-светодиоды, изготовленные на кремниевых пластинах диаметром 150 мм, на 30% дешевле эквивалентных приборов на сапфировой подложке с аналогичными характеристиками, и при этом производитель добивается 40%-ной прибыли.

Ряд изготовителей, в том числе Aledia (Франция), Toshiba (Япония, лидер инновационных решений), Bridgelux (США), Plessey (Британия), Azzurro Semiconductors (Германия), уже начали производство GaN СД на дешевых кремниевых подложках диаметром 100 и 150 мм. В дальнейшем ожидается применение подложек диаметром до 200 мм. Так, компания ARC Energy (Китай) заявила о возможности производства 200-мм сапфировых пластин/заготовок в печах с управляемым отводом тепла серии CHES. По мере развития технологии и увеличения эффективности производства с переходом к подложкам все больших размеров стоимостное преимущество кремниевых подложек будет возрастать. Ход развития светодиодной технологии практически такой же, как и полупроводниковой на более ранних стадиях ее освоения, и изготовители СД могут использовать устаревшее оборудование полупроводниковых предприятий.

Основной недостаток рассматриваемой технологии – несогласованность постоянной

кристаллических решеток кремния и нитрида галлия, что приводит к чрезвычайно высокой плотности ростовых дислокаций (10^{10} – 10^{11} см⁻²). Не согласованы эти материалы и по коэффициенту теплового расширения, что вызывает растрескивание пластин/заготовок, предназначенных для формирования светодиодов. Эти недостатки частично могут быть компенсированы за счет применения буферного слоя при эпитаксиальном выращивании пленок GaN.

Пока, в лабораториях США, Европы, Японии получены успешные результаты при создании СД рыночной категории по технологии нитрида галлия на кремнии, но массовое их производство не освоено. Различий в цене кремниевой и сапфировой подложек недостаточно для оправдания перехода к новой технологии, и сейчас совсем не ясно, насколько дешевые СД на кремниевой подложке повлияют на снижение стоимости светодиодных ламп и светильников. Ведь помимо СД эти устройства содержат электронику для терморегулирования, для управления источником питания и оптикой. Как предполагают поборники кремниевой технологии, даже при сокращении на 75% стоимости нитридгаллиевых СД на кремнии цена светодиодного устройства снизится лишь на несколько процентов. Тем не менее, сторонники этой технологии считают, что доля GaN СД на Si к 2020 году составит 10–20% светодиодного рынка, а по оценкам IHS она может достичь 40% (в основном за счет замещения СД на сапфировых и карбид кремниевых подложках). При этом сторонники изготовления GaN-светодиодов на кремниевых подложках утверждают, что через год такие светодиоды по своим характеристикам не будут уступать диодам на сапфировой подложке.

И предпосылки этому есть. На выставке LightFair 2014 молодая китайская start-up компания LatticePower сообщила о начале крупносерийного производства мощных InGaN-светодиодов на кремниевой подложке, сопоставимых по своим характеристикам с высококачественными диодами на сапфировой подложке. Заготовку с пленкой InGaN на кремниевой подложке выращивают в реакторе химического осаждения из паров металлоорганических соединений (MOCVD) с помощью разработанного компанией метода, обеспечивающего контроль механической напряженности и растрескивания пластины. После выращивания нитридгаллиевой пленки пластина со стороны материала р-типа с помощью металлической связки (золото или его сплавы

в зависимости от применения СД) присоединяется к подложке-носителю (кремниевой, германиевой или металлической), а исходная кремниевая подложка стравливается.

Компанией также разработан необычный метод формирования системы в корпусе, заключающийся в объединении GaN на Si СД и теплоотвода на основе кремниевой подложки. Это решение допускает автоматизированное изготовление светодиодных устройств и обеспечивает низкие издержки производства.

Световой поток представленного на выставке LightFair белого GaN на Si СД с люминофором на основе алюмоиттриевого граната составлял 130 лм при рабочем токе 350 мА. Светоотдача СД размером 1x1 мм была равна 120 лм/Вт [5].

Таким образом, компания Lattice Power – одной из первых совершила крупные инвестиции в технологию производства GaN СД на кремниевых подложках. Газета Wall Street Journal отметила, что сейчас Lattice Power – лидер по преодолению затруднений, связанных с производством светодиодов на кремниевой подложке, среди компаний США, Германии и Южной Кореи.

GaN-светодиоды на GaN-подложке

Светодиоды на основе нитрида галлия на сапфировых и карбид кремниевых подложках совершенствуются уже последние 20 лет, но излучаемый ими белый свет по качеству до сих пор несравним с естественным солнечным светом. Применение достаточно дешевых и широко распространенных кремниевых подложек для изготовления GaN-светодиодов, конечно, заманчиво для производителей, особенно с учетом прогнозов аналитических компаний, но и здесь результаты не очень обнадеживающие. Причина неуспеха этих технологий частично кроется в том, что светодиодная промышленность повторяет многие ошибки промышленности компактных люминесцентных ламп, отдавая предпочтение светоотдаче, а не качеству цветопередачи, в том числе качеству белизны и форме излучаемого пучка, сбивая тем самым потребителя бесконечными количественными показателями вместо того, чтобы дать ему то, что нужно.

Первые белые GaN СД с люминофором, появившиеся в конце 1980-х-начале 1990-х годов и применявшиеся в автомобильных электронных системах, рекламе и подсветке ЖКД, изготавливались, да изготавливаются и сейчас, на подложках из инородного материала. Такие гетероэпитаксиальные структуры отличаются высокой

плотностью дефектов (до 10^6 см⁻²), трудностью изготовления и сложной конструкцией. Они не только дороги. Из-за высокой плотности дефектов гетероструктур внутренний квантовый выход СД низок. Это устанавливает "потолок" светосилы диодов и, следовательно, их экономической эффективности (удельная светоотдача на затрачиваемый доллар). В результате ограничена и допустимая максимальная мощность диодов. Для получения высокой светоотдачи мощных СД требуется низкая плотность рабочего тока (менее 100 А/см²), а это приводит к увеличению их площади. Поэтому, несмотря на низкое энергопотребление и высокую светоотдачу белых GaN-светодиодов на инородных подложках, цена и сомнительное качество белого излучения ограничивает их применение в осветительных устройствах.

Вот почему новая калифорнийская start-up компания Soraа отдала предпочтение GaN-светодиодам на GaN-подложках (GaN-на-GaN), считая их самыми перспективными высокоэффективными источниками "чистого" белого света. Технология GaN-на-GaN компании направлена на устранение упущений, возникающих при изготовлении GaN СД на инородных подложках. Применение "родной" GaN-подложки позволяет уменьшить плотность дефектов на три порядка и, к тому же, существенно упростить процесс изготовления СД, исключив применение пластины-носителя и ненужную операцию присоединения структуры на инородной подложке к носителю с последующим удалением подложки.

Специалисты компании пока не сообщают конкретные данные относительно характеристик используемых GaN-подложек/заготовок, за исключением того, что они представляют собой имеющиеся на рынке подложки, выращенные с помощью гидридной газофазной эпитаксии. Вместе с тем компания изучает методы выращивания пленок нитрида галлия на объемных GaN-пластинах. Правда, пока размеры таких пластин невелики, они дороги и их применение экономически не целесообразно.

Использование родной подложки позволяет реализовать такие важные эксплуатационные характеристики GaN-светодиодов, как:

- высокие значения электро- и теплопроводности (~230 Вт/мК), обеспечивающие плотность рабочего тока, характерную для лазерных диодов (несколько килоампер на площадь в 1 см²), и также стабилизацию мощности;
- однородную плотность мощности при отсутствии сжатия тока даже при более высокой его плотности, чем у традиционных СД. Это значит, что GaN-светодиоды, которые в 15-25 раз меньше обычных диодов, могут работать при высокой мощности, сохраняя высокий внешний квантовый выход. Испытания СД в течение нескольких тысяч часов при температуре р-п-перехода 140°C не показали каких-либо заметных изменений рабочих характеристик. Поэтому компания Soraа утверждает, что срок службы ее продукции превышает 30 тыс. ч. при работе в обычных условиях;
- согласование коэффициентов отражения GaN эпитаксиальной пленки и GaN-подложки, благодаря чему свет между эпитаксиальной пленкой и подложкой, не отражаясь, минует поглощающие области прибора (активный слой и контакты) и проходит к внешним излучающим поверхностям диода;
- возможность конструирования и формирования объемной структуры, обеспечивающей более высокую эффективность вывода излучения. GaN-на-GaN СД компании Soraа имеют толстые боковые стенки и треугольную форму размером 400 мкм. В результате видимое световое излучение диода составляет ~90% возбужденного излучения (против 80% у лучших тонкопленочных СД).

Световой поток одной партии GaN-на-GaN-светодиодов можно приравнять к потоку 5-10 партий стандартных СД. В итоге даже сегодня при относительно низком уровне развития технологии по удельной стоимости, отнесенной к световому потоку, GaN-на-GaN-светодиодные устройства сопоставимы с лучшими имеющимися на рынке источниками света. Так, VIVID 2 СД лампа типоразмера MR16 (рис.5) на основе небольшого яркого GaN-на-GaN СД, оптики и теплоотвода излучает в 10 раз больше света, чем обычная светодиодная лампа. А стоит ее эксплуатация всего 1 долл./Вт/год, т.е. 11,5 центов/кВт·ч. Таким образом, она способна заменить 50-Вт галогенные лампы при потребляемой мощности 10 Вт. СД-лампа MR16 в 2013 году получила премию Red Dot Award – престижную международную награду в области дизайна, присуждаемую европейским Центром дизайна Северного Рейна Вестфалии (Design Zentrum Nordrhein Westfale).

Благодаря большой допустимой мощности GaN-на-GaN-приборы излучают свет фиолетового диапазона длин волн. Требуемая для этого высокая энергия фотонов (3 эВ против 2,7 эВ для

диодов синего свечения) компенсируется высоким качеством цвета свечения. Показатели цветопередачи R (CRI) и передачи красного цвета R9 светодиодной лампы VIVID MR16 оба равны 95. В результате при использовании соответствующих люминофоров можно дополнительно получать сине-зеленое (циановое) излучение, не присутствующее в спектре излучения обычных GaN-светодиодов.

Энергия фотонов GaN-на-GaN СД фиолетового свечения достаточна для возбуждения флуоресцентных осветителей (Optical Brightening Agents, OBAs) в материалах белого цвета (одежде, бумаге, пластике и косметических препаратах). Осветители используются для того, чтобы белый материал выглядел "белым" как при дневном свете, так и при искусственном освещении. Излучение синих светодиодов придает этим материалам желтоватую и тусклую окраску.

Таким образом, новая платформа GaN-на-GaN компании Soraа отличается высоким качеством выводимого излучения, упрощенной архитектурой диода и низкой стоимостью. Спектр GaN-на-GaN светодиодов не усечен, устранены проблемы цветопередачи и ухудшения "белизны", присущие синим GaN СД на инородных подложках [6].

В начале 2014 года компания объявила о создании третьего поколения GaN-на-GaN светодиодов Gen3 со степенью преобразования электрической энергии в оптическую 75% при плотности тока 35 А/см² и температуре перехода 85°C. За счет применения тройного люминофорного состава СД излучает полный спектр видимого света (все цвета радуги, включая фиолетовый).



Рис.5. Светодиодная GaN-на-GaN лампа Soraа MR16

Модифицированная ретрофитная лампа серии PAR30L на основе СД Gen3 превосходит представленные на рынке лампы этой серии не только по уровню излучения, но и по индексам цветопередачи, в том числе и чистого белого цвета CRI-95 и R9-95 при цветовой температуре 2700–5000К. Не уступает лампа конкурентам и по силе света в направлении ее оси (Center Beam Candle Power, СВСП), равной 250 кд при ширине диаграммы направленности 8°. Во втором квартале 2014 года компания планировала на основе СД Gen3 выпустить лампы серий PAR и AR большого формфактора, а также MR16 лампы.

Лампу серии PAR30L (с длинной шеей) наряду с полноцветными ретрофитными СД-лампами AR111, PAR30S (с короткой шеей) и PAR38 компания Soraа продемонстрировала на выставке LightFair 2014. СД-лампа AR111 – пока единственная светодиодная лампа, сопоставимая по параметрам с галогенными лампами. СВСП лампы на 50% больше, чем у ближайших конкурентов с индексом цветопередачи 80. Углы излучения всех полноцветных СД-ламп составляют 25, 36 и 60°. Все они поставляются с широким диапазоном цветовой температуры. Предназначены для точечной подсветки ресторанов, торговых залов, больничных, жилых помещений и т.п. [7].

Светодиоды хорошо работают при низких температурах. Они практически не излучают в ИК-диапазоне. Но р-п-переход диода при работе нагревается и изготовитель вынужден задавать максимальную температуру, которую не следует превышать, чтобы не сократить срок службы СД. Для отвода тепла, выделяемого при нагреве р-п-перехода, большинство изготовителей используют теплоотводы или выполняют тепловой расчет конструкции с тем, чтобы обеспечить соответствующий путь отвода тепла в окружающую среду. Расположение теплоотвода в базе СД-ламп

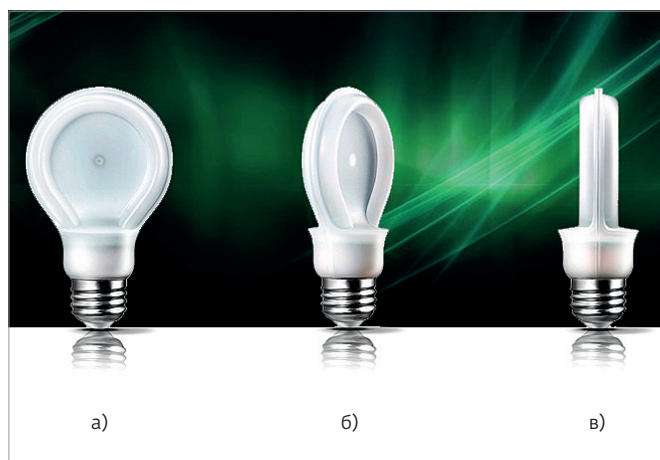


Рис.6. Светодиодная лампа SlimStyle – все, что хотел потребитель, плюс новый вид: фронтальный (а); с правого бока (б); с левого бока (в)

приводит к тому, что эти лампы, предназначенные для замены ламп накаливания с винтовыми цоколями, весят много и выглядят громоздкими. Удаление теплоотвода позволяет сократить стоимость используемых для создания лампы материалов, а также сбросить ее вес. Интересное решение отвода тепла светодиода предложила компания Philips.

Плоские теплоотводы

Объявление компании Philips в декабре 2013 года о выпуске СД-лампы SlimStyle (изящного стиля) (рис.6) вызвало в светодиодной промышленности переполох. Вызван он был не только тем, что это была СД-лампа стоимостью менее 10 долл., предназначенная для замены 60-Вт А19 ламп накаливания. Лампа SlimStyle оказалась тонкой и легкой. Ее особенность – дискообразный теплоотвод, на передней и задней поверхностях которого в виде подковы смонтированы 26 светодиодов. Тепло р-п-переходов диодов рассеивается пластиковой оболочкой. Расположение диодов по периметру лампы позволило отказаться от алюминиевого теплоотвода и тем самым уменьшить массу лампы и, что важнее, сократить затраты на ее производство.

Световой поток А19 лампы SlimStyle с регулируемой яркостью свечения – 800 лм при мощности 10,5 Вт. Излучает она мягкий белый свет (цветовая температура – 2700К). Несмотря на необычную форму, SlimStyle излучает свет равномерно во все стороны, как обычная лампа накаливания. Согласно оценкам, стоимость ежегодно затрачиваемой энергии (из расчета

ежедневной работы в течении 3 ч) составляет 1,26 долл., или 11 центов/кВт·ч, эффективность – 76,2 лм/Вт.

Лампа SlimStyle на один доллар дешевле активно обсуждаемой СД-лампы для замены 60-Вт ламп накаливания компании Cree (в сообщениях о выпуске SlimStyle указывается 9 долл., хотя в рекламных сообщениях приводится цена в 3–4 долл. за лампу). Правда, гарантируемый срок службы ламп Cree составляет 10 лет, SlimStyle – 25000 ч, или три года.

По утверждению разработчиков, новая СД-лампа найдет применение для освещения жилых помещений, в настольных, напольных и подвесных светильниках. Однако на вопрос сможет ли SlimStyle успешно конкурировать с другими СД-лампами однозначного ответа нет. По мнению аналитиков, относительно малый срок службы и потребляемая мощность в 10,5 Вт сравнимы с аналогичными параметрами других СД-ламп, а коэффициент цветопередачи, равный 80, ставит ее в один ряд с большинством СД [8, 9].

Правда, компания Philips не первая предложила такой способ регулировки нагрева. В начале сентября 2013 года малая startup компания NliteN, занимающаяся разработкой средств для твердотельных осветительных систем, на сайте Indigogo* начала поиск финансирования для освоения производства разработанной СД-лампы (или диска) 2D-Lite с яркостью 800 лм для замены 60-Вт ламп накаливания (рис.7а). Диммируемые 2D-Lite СД-диски светят ярче и потребляют примерно на 80% меньше энергии, чем 60-Вт лампы накаливания. При этом разработчики утверждают, что стоит диск менее 10 долл. Низкая стоимость достигнута благодаря необычной плоской конструкции СД-диска, позволяющей его собирать с помощью автоматизированных систем. Плоская конструкция светодиодного медного диска позволяет монтировать СД по замкнутому контуру и получать точечный всенаправленный источник света. Модель СД-диска 2D-Lite-d содержит блок ориентации, переключатель которого отключает светодиоды, расположенные на верхней поверхности диска, при использовании его в потолочном светильнике.

* Indigogo – открытый в 2008 году крупный мировой сайт по поиску и привлечению финансовых и материальных ресурсов для реализации различных проектов, допускающий прямое финансирование проекта физическими лицами

Позже, тоже в сентябре, компания NliteN описала на сайте Indiegogo диммируемый смарт СД-диск 2D-Lux. Интеллектуальная СД-лампа оснащена микроконтроллером семейства AVR компании Atmel, USB-интерфейсом, контактными штырьковыми выводами для аппаратуры расширения функций лампы (рис.7б), позволяющей дистанционно управлять работой лампы с помощью смартфонов.

Полученные ассигнования компания планирует затратить на создание следующего поколения диммируемых СД-дисков, замещающих 60-Вт лампы накаливания, и освоения производства дисков стоимостью 6 долл. к 2015 году и "световых дисков для всего человечества" ценой в 3 долл. к 2017 году.

Обе фирмы – Philips и NliteN – подали заявки на патентование новых светодиодных источников света. Поживем, увидим, кто получит патент.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СД ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

Согласно общепринятому мнению, для обеспечения равномерного освещения СД-светильника без мерцания необходимо применять источники питания светодиода по постоянному

току (DC-источники) с защитой от перепадов напряжения, коротких замыканий и перегрева. Но в последнее время наметилась тенденция к питанию светодиодов от источников переменного тока (AC-источники). Последние, в сравнении с DC-блоками, проще и содержат меньше компонентов (в DC-источнике питания их может потребоваться до 50). Благодаря применению AC-источников СД постепенно избавляются от ранее присущих им недостатков: высокого коэффициента нелинейных искажений, низкого коэффициента мощности и мерцания.

Первоначально внимание разработчиков привлекли светодиоды, непосредственно работающие от источника переменного тока – AC LED. В предложенных компанией Seoul Semiconductor светодиодах серии Acriche* использовались две различные полярности линейки последовательно соединенных СД. СД одной линейки пропускали ток при положительной полярности импульса, СД другой – при его отрицательной полярности. С помощью дополнительного резистора на СД-лампу можно было непосредственно подавать переменное напряжение питания. Этот метод питания СД по переменному току использовала и компания Lynk Labs в СД серии Tesla. Но этот

* В дальнейшем компания несколько переименовала серию в Acrich, что очевидно означает AC Rich – интенсивный переменный ток.

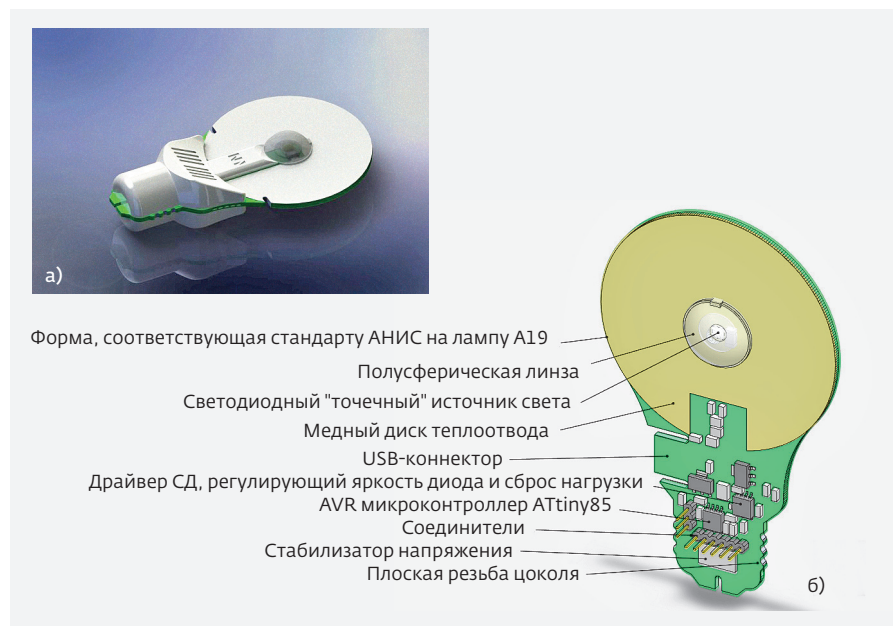


Рис.7. Светодиодные диски 2D-Lite (а) и 2D-Lux с "начинкой" (б)

простой метод построения AC LED, позволяющий устранить обширную норму расходов материалов, требующихся для изготовления источника питания СД, не избавил свет от мерцания, не обеспечил диммирования и полного использования всех светодиодов в светильнике (в любой момент работала только половина установленных диодов).

Поэтому Seoul Semiconductor и Lynk Labs, несмотря на успех созданных ими AC LEDs на рынке, перешли к варианту питания обычных СД-модулей с помощью встроенной интегральной схемы дополнительного источника, работающего от сети переменного тока. В июле 2012 года Seoul Semiconductor выпустила СД-модуль с источником питания по переменному току серии Acrich2. По толщине модуль сопоставим с монетой в 25 центов и не занимает большой площади лампы. Интегральная схема источника питания выпрямляет напряжение переменного тока (110 или 220 В), измеряет мгновенное значение постоянного тока и с помощью встроенного МОП-транзистора выборочно задает питание нескольким независимым последовательно включенным светодиодам. По мере прохождения переменного сигнала интегральная схема включает все большее число линий в модуле. Поскольку в любой момент свет по техническим условиям светильника излучается наименьшим числом СД, эффективность системы освещения высокая, а ее стоимость приемлемая.

Цветовая температура модулей серии Acrich2 составляет 4700–6000К (холодный белый свет), 3700–4200 (естественный белый) и 2600–3200 (теплый белый), индекс цветопередачи – не менее 80. Мощность – от 4,3 до 30 Вт.

Как уже указывалось, одна из проблем, затрудняющих замену обычных ламп в системах освещения ретрофитными светодиодными лампами, – несовместимость с СД существующих диммеров с симистором или с отсечением фазы. Выпущенный Seoul Semiconductor в мае текущего года новый светодиодный модуль с интегральной схемой Acrich3, создание которого заняло четыре года, может

работать с большинством типов симисторных диммеров без ухудшения качества и эффективности светильника (рис.8). Acrich3 позволяет с помощью планшета или смартфона через беспроводные сети Zigbee, WiFi, Bluetooth регулировать мощность СД, его цветовую температуру, выполнять зонирование и составлять график включения/отключения светильника, оптимизируя тем самым энергосбережение и эстетическое достоинство светильника. Интегральная схема источника питания Acrich3 предоставляет пользователям интеллигентную систему управления освещением и позволяет подключать модуль непосредственно в электрическую сеть.



Рис.8. Обычная светодиодная лампа (а) и лампа на основе модуля ACRICH 3 (б)

Помимо интегральной схемы источника питания по переменному току модуль содержит комплект СД серии Acrich MJT 2525 размером 2,5×2,5 мм с коэффициентом оптического регулирования 15 лм/мм². В модуль также входит вспомогательный источник питания датчиков энергии, подключенных к смарт-блокам управления освещением. Диоды совместно с интегральной схемой источника питания размером 6×6 мм смонтированы на плате диаметром 38 мм, что позволяет применять модуль Acrich3 в лампах A19. Вместе с модулем компания поставляет оптический рефлектор для обеспечения максимального угла рассеивания света и опционально-термический мост для отвода тепла.

В октябре 2013 года корпорация Texas Instruments, производящая популярные импульсные источники питания, представила AC источник питания светодиодов нового типа, который она характеризует как "плавающий ключ для непосредственного питания светодиода с малой пульсацией тока от электрической сети" (рис.9).

Специализированная микросхема TPS92411, содержащая 100-В ключ с регулируемым порогом срабатывания и линейный стабилизатор, позволяет себез трансформатора или дросселя.

СД с питанием по переменному току компаний Seoul Semiconductor и Texas Instruments, по-видимому, смогут найти применение в ряде осветительных устройств [10].

Цветные светильники

Светодиоды можно спроектировать для получения любого требуемого цвета излучения в видимом диапазоне. Синие или фиолетовые СД с различными люминофорами способны излучать полный спектр цветов, в том числе и белый любых оттенков. Но иногда у больших компаний просыпается желание сделать что-то простое, веселое и интересное в стиле start-up. А опытная компания может избавить продукт от "детских болезней". Кто сказал, что обычную лампочку в люстре или светильнике, нельзя превратить в полезный аксессуар?

Заменяет обратноходовые/понижающие/повышающие преобразователи

- Низкая стоимость: отсутствуют индуктивные элементы
- Низкая пульсация тока
- Коэффициент мощности >0.95
- Коэффициент нелинейных искажений < 15%
- Phase-dimmable

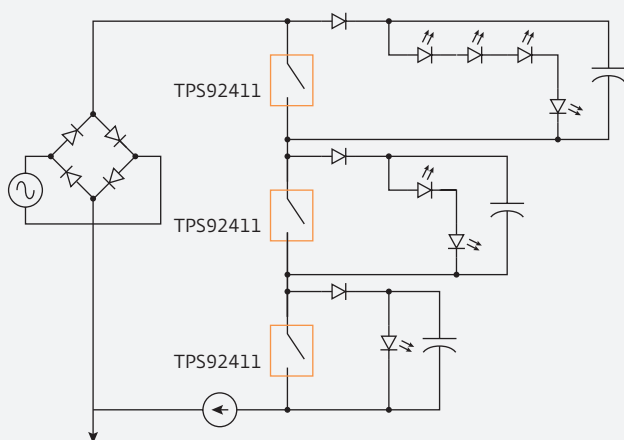


Рис.9. Достоинства микросхемы AC-источника питания, упрощающего питание СД от электрической сети компании Texas Instruments

Именно это и сделала компания Philips, представив комплект СД-ламп серии Hue (цветовой фон) (рис.10а), излучение которых пользователь может контролировать с помощью программного приложения смартфона iPhone или планшета iPad. С помощью комплекта можно изменять как интенсивность, так и цвет светильников, выполненных на его основе.

При этом доступны программируемые сценарии включения/выключения, настройка режимов работы для разных ситуаций (чтение, романтический ужин), функции будильника, когда светильник в установленное время заливает помещение ярким светом. Возможна и так называемая "настройка геозон" (рис.10б), когда система в зависимости от местонахождения мобильного телефона или планшета выключает или включает свет при приближении хозяина (с мобильником в кармане) или при удалении его из дома. Цвет излучения можно выбрать в базовой палитре или непосредственно с фотографии.

Philips выпустила комплект, содержащий три цветные СД-лампы с 11 RGB-светодиодами в каждой и позволяющий получать до 16 млн. цветов (рис.11). В комплект входит и сетевой концентратор для управления лампами, который подключается к роутеру. Лампы Hue имеют коническую форму, тело – матовое стеклянное с алюминиевым основанием, содержащим встроенный Wi-Fi-передатчик, который подключается к концентратору, способному поддерживать до 50 СД-лампочек, а также позволяющий объединять лампы в многосвязную сеть. Лампы и концентратор "общаются" друг с другом с помощью сетевого протокола ZigBee, IEEE 802.15.4. Кроме того, Philips опубликовала прикладной программный интерфейс, позволяющий пользователю составлять собственные управляющие программы.

Максимальная потребляемая мощность лампы составляет 8,5 Вт, световой поток – 600 лм, цветовая температура – 2000–6500К. Высота лампы



Рис.10. Комплект цветных ламп Hue компании Philips (а); "настройка геозон" лампой Hue (б)

равна 110 мм, диаметр – 62 мм, цоколь – E27. Номинальный срок службы лампы – 1500 ч. Однако цена комплекта составляет 200 долл., а каждая дополнительная лампа стоит 60 долл., так что оснастить весь свой дом лампами Hue будет весьма накладно.

Аналитики компании Strategies отметили, что автомобильные компании все больше используют СД-системы освещения с возможностью настройки цвета для лучшего стилистического оформления автомобиля и тем самым способствовать его продаже.

Ориентированное на человека освещение (Human Centric Lighting)

С развитием технологии светодиодного освещения появились возможности создания светильников с управляемыми не только интенсивностью, но и цветом излучения. Это не только светильники для декоративной подсветки, но и устройства благоприятно влияющего на здоровье человека освещения.

До сих пор считалось, что зрение человека обязано двум фоторецепторным клеткам: высокочувствительным палочкам и менее чувствительным колбочкам, обеспечивающих восприятие света в ночных и дневных условиях, соответственно. В последние десятилетия был открыт третий класс клеток, присущих сетчатке глаза человека, – фоточувствительные ганглионарные клетки (ipRGC-клетки), которые служат посредником при производстве мелатонина и, тем самым, контролируют суточный жизненный цикл зрения человека. Они также управляют зрачковым световым рефлексом и играют роль в цветоощущении.

Пик почти всех оттенков белого света, получаемого при преобразовании люминофором излучения синего СД, находится в синем диапазоне спектра, где чувствительность ipRGC-клеток максимальна. Поэтому интерес представляет влияние этого излучения на биоритмы человека, которые влияют на ожирение, диабет, образование раковых клеток. Это одно из направлений работ исследовательской и пропагандистской программы "Освещение, ориентированное на человека" (Human-Centric Lighting, HCL). Программа популярна в Европе, ее начали проводить в США. Она касается не только применения СД в осветительной аппаратуре для лечебных целей и, возможно, для изучения действия темноты на живые организмы (скотобиологии). HCL охватывает вопросы

повышения внимания и работоспособности, улучшения настроения, установления соответствия циклов сна/бодрствования, т.е. нацелена на решение визуальных, биологических и эмоциональных проблем человека. Как правило, обычные системы освещения постоянно распространяют свет в одном направлении, тогда как HCL-светильники управляют динамикой освещения путем сочетания освещаемых зон, цветовой температуры и освещенности.

Согласно прогнозам ассоциации LightingEurope, представляющей интересы европейской светотехнической отрасли, и консалтинговой компании А.Т. Kearney, к 2020 году объем продаж изделий, создаваемых в рамках программы HCL, в Европе составит 1,4 млрд. евро (1,8 млрд. долл.), или 7% рынка осветительных устройств (рис.11).

Сейчас большая часть HCL осветительной аппаратуры, используемой в медицинских учреждениях, на производстве и в школах выполнена на люминесцентных лампах. Но, согласно прогнозам, к 2020 году в 90% этой аппаратуры будут использоваться светодиоды, обеспечивающие независимое управление тремя

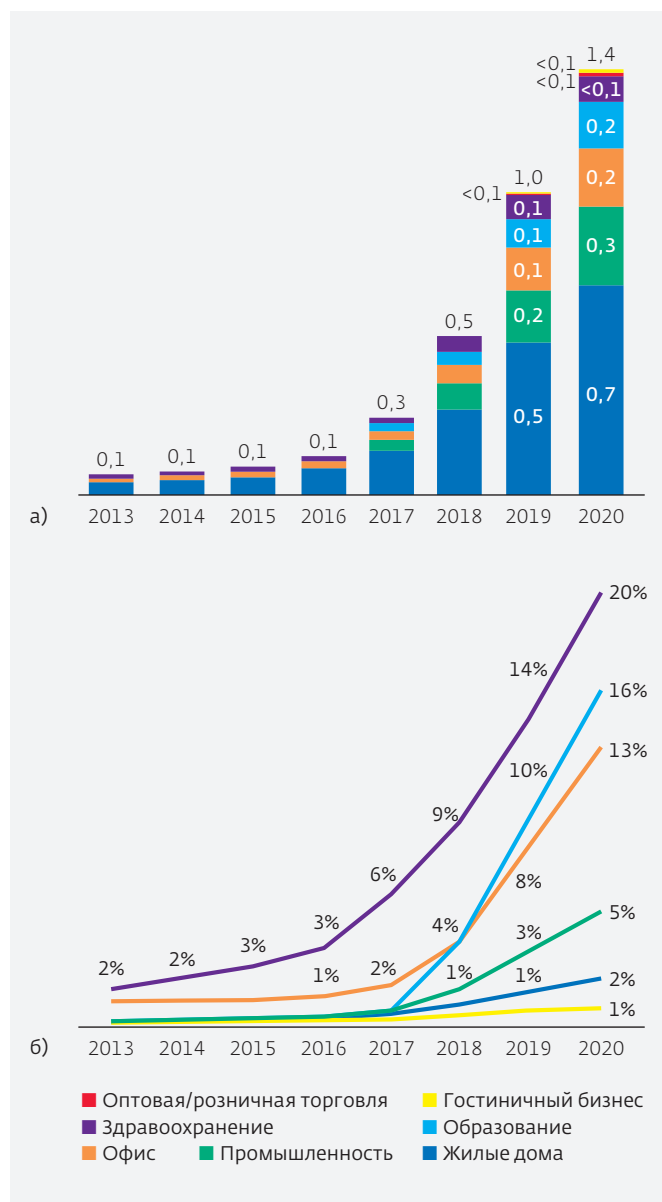


Рис.11. Динамика рынка (млрд. евро) осветительной аппаратуры, созданной по программе HCL (а) и применения в различных областях (доля от общего объема потребления систем освещения) (б)

параметрами излучения: световым потоком, цветовой температурой и его направлением.

* * *

Технология твердотельных систем освещения в последние десятилетия стремительно развивалась и очевидно будет еще активнее развиваться в последующие десятилетия. Можно предположить, что в будущем твердотельные системы освещения будут и интеллектуальными, и сверхэффективными (>150%). Появится большое число новых

применений – многофункциональная иллюминация, интегрированная иллюминация/отображение данных, системы поддержки здоровья/самочувствия/работоспособности, устройства, охватывающие сельскохозяйственное производство и т.п. В итоге возникнет огромный потенциал повышения мировой экономической эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Solid-State Lighting: Toward Smart and Ultra-Efficient Materials, Devices, Lamps and Systems. – www.sandia.gov/~jytsao/2013_02_wiley_photonics_ssl_final.pdf.
2. Research projects five years of growth for packaged LEDs and SSL. – www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-11/issue-4/features/markets/research-projects-five-years-of-growth-for-packaged-leds-and-ssl.html.
3. IHS Report: Lighting and LEDs Trends for 2014. – www.led-professional.com/business/reports/ihs-report-lighting-and-leds-trends-for-2014.
4. Looked like another record at LightFair. – ewweb.com/lighting/looked-another-record-lightfair-1?NL=EW-03&Issue=EW-03_20140609_EW-03_17&YM_RID=dgordon@channelmkt.com&YM_MID=1470514&sfvc4enews=42&cl=article_1.
5. LatticePower Commercializes GaN-on-Silicon LEDs; Launches Line Of High Performance Light Fixtures. – www.marketwatch.com/story/latticepower-commercializes-gan-on-silicon-leds-launches-line-of-high-performance-light-fixtures-2014-06-03.
6. Light-Emitting Diodes: GaN-on-GaN platform removes cost/performance tradeoffs in LED lighting. – www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-09/features/light-emitting-diodes-gan-on-gan-platform-removes-cost-performance-tradeoffs-in-led-lighting.html.
7. **Happich J.** Betting on GaN-on-GaN for efficient white light. – www.electronics-eetimes.com/en/betting-on-gan-on-gan-for-efficient-white-light.html?cmp_id=7&news_id=222919455.
8. SlimStyle 60W Equivalent Soft White (2700K) A19 LED Light Bulb. – www.homedepot.com/p/Philips-SlimStyle-60W-Equivalent-Soft-White-2700K-A19-LED-Light-Bulb-4-Pack-433227/204780591.
9. **Davies C.** SlimStyle 60W Equivalent Soft White (2700K) A19 LED Light Bulb. – <http://www.slashgear.com/philips-slimstyle-led-bulbs-get-trim-all-round-hands-on-16308930>.
10. **Dawson K.** AC Drivers for LEDs. – www.allledlighting.com/author.asp?section_id=560&doc_id=56175911.
11. **KIM E.** Philips Hue Connected Bulb. – www.pcmag.com/article2/0,2817,2417107,00.asp.