

Обзор современных светодиодных технологий источников света для общего освещения

Л.В. МОИСЕЕВ, М.А. ОДНОБЛЮДОВ¹

ЗАО «Оптоган», Санкт-Петербург, Россия; *Optogan Lighting GmbH*, Эргольдинг, Германия

Аннотация

Представлены основные тенденции, наблюдаемые в последнее время, в предпочтениях потребителей и технологиях светодиодных компонентов и светодиодных источников света.

Ключевые слова: светодиоды, кристаллы, технология, светодиодные лампы, светодиодные модули, рынок, тенденции.

Анализируя результаты продаж светодиодной продукции светотехнического назначения (СПСН) в 2012–2013 гг., практически все эксперты приходят к выводу об её активном проникновении практически во все без исключения сегменты рынка освещения, начиная со специальных приложений, таких как освещение железных дорог и автомагистралей и заканчивая прикладным сегментом бытовых ламп. По прогнозам агентства *McKinsey* (рис. 1), уже к 2016 г. более 40% мирового светотехнического рынка будет занимать СПСН. Разумеется, продажи в разных регионах растут разными темпами с учётом предпочтений и платёжеспособности клиентов, а также общего состояния экономики данного региона. Тем не менее общий мировой рынок СПСН показывает поразительную динамику роста: в среднем порядка 30% годовых. Такая динамика, возможно, с локальными корреляциями сохранится по крайней мере до 2016–2017 гг.

Анализируя поведение покупателей, можно с уверенностью говорить, что за последний год-два доверие покупателей к СПСН по сравнению с предыдущим периодом значительно возросло. Этому способствует её активное проникновение во все сегменты общего освещения, оттеснение некачественных производителей на основных мировых рынках, повы-

шение качества и надёжности этой продукции с параллельным активным снижением её цены.

Одновременно подросли требования и ожидания клиентов в отношении параметров и цены продукции. Так, в странах Центральной Европы и США цена и энергоэффективность уже не единственные доминирующие критерии при выборе СПСН покупателями: они рассматриваются только в сочетании с качеством света, в частности, определяемом рекомендованной коррелированной цветовой температурой (КЦТ) для данной области применения и достаточно высоким индексом цветопередачи R_a . Доминирующим требованием является биннинг в пределах 3-ступенчатого эллипса МакАдама для каждой КЦТ. В освещении магазинов и интерьеров уже не редкость запрашиваемый R_a на уровне 95–97. За качество света клиенты часто готовы платить меньшей световой отдачей и достаточно большим (3–5 лет) сроком окупаемости СПСН.

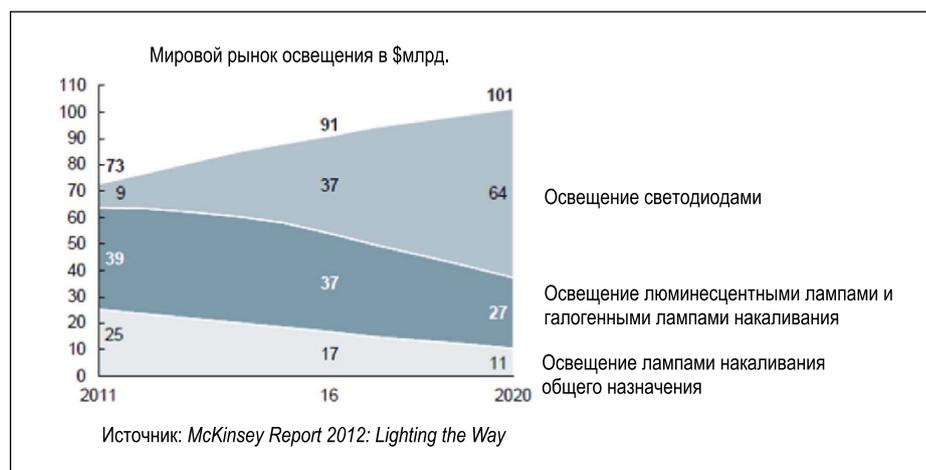
В странах же Восточной Европы и в России, несмотря на повышение требований, покупатели в основном ориентируются на прибыльность и срок окупаемости. В этих регионах цена часто рассматривается как доминиру-

ющий критерий выбора. Окупаемость СПСН в основном ожидается на уровне 2–3 лет. В связи с этим и предъявляемые требования к качеству света ниже, чем в Центральной Европе и США. Так, при выборе продуктов R_a на уровне 70 (и даже иногда 60) считается приемлемым, если подходит по цене. Типичным биннингом является 7-ступенчатый эллипс МакАдама для каждой КЦТ.

Свой вклад в повышение доверия к СПСН привносят и официальные регуляторы. В 2013 г., наконец, были введены в действие специальные нормы именно для СПСН. И если до этого СПСН условно подгонялась производителями под существующие нормы для обычных светотехнических изделий, порождая как массу проблем, так и возможность манипуляции параметрами, то теперь производители должны выполнять новые нормы, учитывающие светодиодную специфику.

Например, такой ключевой нормативный документ как директива Европейского парламента и Европейского совета N 2009/125/ЕС от 21.10.2009, учреждающая систему установления требований к экологическому проектированию продукции, связанной с энергопотреблением, с ноября 2013 г. устанавливает минимальные требования как к техническим характеристикам СПСН, так и к её маркировке. В директиве содержатся прямые требования к таким параметрам этой продукции как R_a , коэффициент мощности, количество циклов «вкл.-выкл.» до отказа, спад светового потока после 6000 ч работы, время пуска и выхода на режим и др.

Что же касается территории Таможенного союза (России, Беларуси



¹ E-mail: maxim.odnobyudov@optogan.com

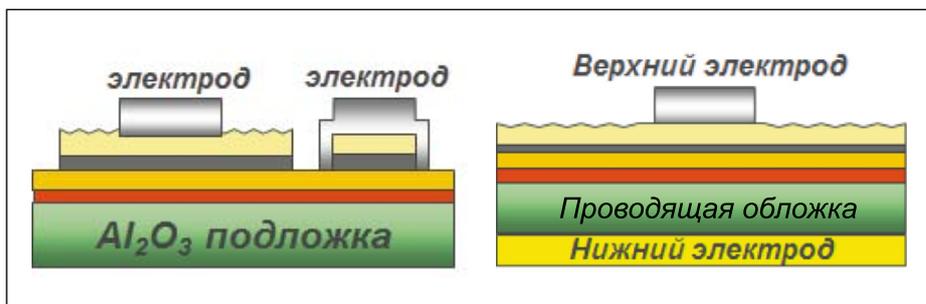


Рис. 2

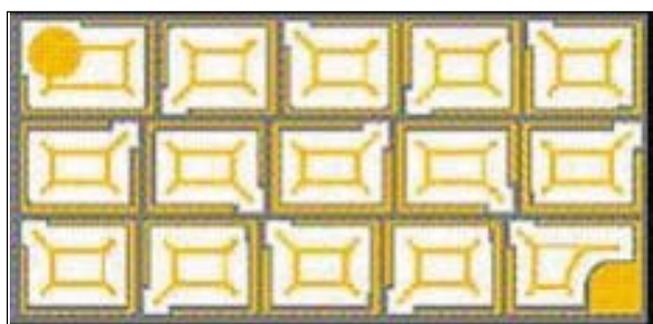


Рис. 3

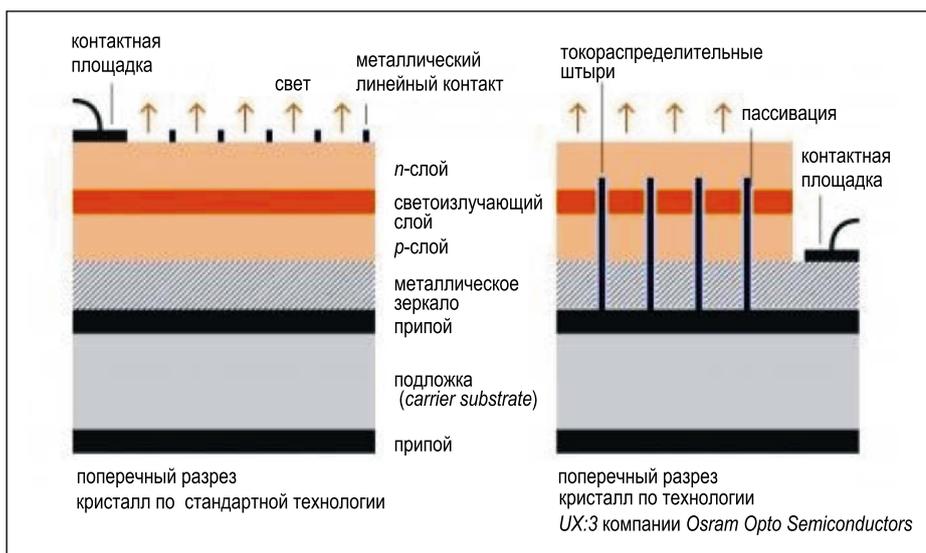


Рис. 4

и Казахстана), то на данный момент на ней, помимо обязательных требований по безопасности, отдельных нормативных документов, устанавливающих единые критерии и требования к параметрам СПСН, не существует. Подобные требования содержатся только в локальных нормативных актах, таких как Постановление правительства, СНиПы, СанПиНы и т. п.

Тем не менее в свете вступления России в ВТО вопрос применения и адаптации международных и европейских стандартов на территории нашей страны – лишь вопрос времени. Те российские производители, которые стремятся обеспечить себе конкурентные преимущества и открыть для

своей продукции выход на рынок ЕС, уже сейчас ориентируются на международные стандарты и требования по качеству и безопасности.

Рассмотрим теперь подробнее технологические тренды светодиодной индустрии от отдельных компонентов к конечным продуктам.

Как известно, основа любого светодиода – светодиодный кристалл. В основном в производстве светодиодов (СД) используются кристаллы двух типов (рис. 2) – латеральные, с обоими контактами на поверхности, и вертикальные, у которых один контакт находится на поверхности, а второй на нижней части кристалла.

Производители латеральных кристаллов развернули в 2012–2013 гг. настоящую ценовую войну, пытаясь вытеснить друг друга с рынка на фоне кризиса перепроизводства. В настоящий момент идёт жёсткий передел рынка, в результате которого многие традиционные поставщики кристаллов из Тайваня попали в тяжёлое финансовое положение, а на рынок вышли «агрессивные» производители из КНР.

С технологической точки зрения эффективность латеральных кристаллов близка к насыщению. Для улучшения КПД производители используют профилированные подложки, внесение шероховатостей на поверхности эпислоёв, травление боковых граней сапфировых подложек. На сегодня с помощью этих ухищрений производители довели коэффициент вывода света до 80%. Дальнейший прогресс здесь в основном ожидается от снижения внутренних потерь: за 6 мес на уровне 3%.

Несомненным преимуществом латеральных кристаллов в современных условиях является их дешевизна, что позволяет за ту же цену, что и раньше использовать кристаллы большего номинального размера в недогруженном режиме, обеспечивающем максимум световой отдачи.

Наиболее существенный недостаток латеральных кристаллов – предельное ограничение по используемому току и отсутствие эффективных кристаллов больших размеров (60 мм и более). Оба ограничения связаны с технической невозможностью равномерно распределять токи по поверхности как на кристаллах большого размера, так и при больших (> 0,75 А) токах.

Несмотря на эти ограничения, латеральные кристаллы активно используются в многокристалльных СД и СД-модулях по технологии «кристалл-на-плате» (COB).

Латеральная топология позволяет создавать кристаллы, адаптированные под высокое входное напряжение, в том числе и допускающие прямое AC-подключение. Но, несмотря на преимущества, такие кристаллы в настоящий момент редко находят практическое применение, поскольку по цене оказывается выгоднее соединять в цепочку обычные кристаллы (рис. 3), чем применять более дорогие высоковольтные (HV).

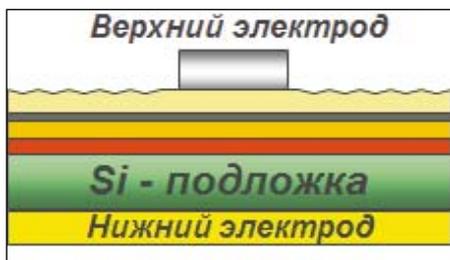


Рис. 5



Рис. 6

В сегменте вертикальных кристаллов за последний год произошло массовое внедрение в производство кристаллов с интегрированными в объём контактами (кристаллов, в которых распределительные контакты на поверхности отсутствуют) (рис. 4).

Благодаря внедрению указанной технологии, позволяющей чрезвычайно равномерно распределять токи непосредственно в зону рекомбинации, типичный размер кристаллов был увеличен производителями с 1 до 2 мм². Такие вертикальные кристаллы не только могут работать на повышенных токах (порядка 3 А) и при этом демонстрировать отличную эффективность, но также устойчивы при работе при больших температурах *p-n*-перехода.

Единственный существенный недостаток таких кристаллов – значительная цена. Тем не менее вертикальные кристаллы просто незаменимы в высокоомощных однокристалльных СД, используемых в настоящее время, в частности, в прожекторах, а также во всех остальных светильниках и лампах, где источник света ограничен заданной геометрией.

Отдельно стоит упомянуть кристаллы на кремниевой подложке (рис. 5), активная популяризация которых на-



Рис. 7

блюдалась все последние годы. Несмотря на большие ожидания от кристаллов, непосредственно выращенных на кремнии, их применение на сегодня сильно ограничено – они практически не используются в наиболее распространённых типах СД. Основная причина этого – отставание по эффективности не только от классических вертикальных, но и от латеральных кристаллов, а также общий кризис перепроизводства кристаллов в мире, спровоцировавший резкое удешевление латеральных кристаллов. Тем не менее активное улучшение технологии продолжается, и, возможно, кристаллы на кремнии займут достойное место на рынке уже в ближайшем будущем.

Обратимся теперь к СД и посмотрим, какие технические новшества появились здесь за последний год.

СД малой мощности (0,1–0,2 Вт), в основном представленные классическими СД, с компактным корпусом *PLCC2* (рис. 6), практически не изменились по своей форме за последние 10 лет. Производители уже долго не меняли «внешних» световых параметров, так как приложения для подобных СД уже давно устоялись. Тем не менее ценовая борьба продолжается, и в настоящий момент в данных приборах используются кристаллы существенно меньшего размера. Если несколько лет назад в СД с корпусом *PLCC2* в основном использовался кристалл с размерами 0,254×0,584 мм², то сейчас те же световые параметры обеспечиваются меньшим кристаллом: 0,203×0,381 мм². Почти 50%-ное уменьшение размеров кристалла вместе с резким сокращением стоимости снизило стоимость маломощных СД до единиц центов за штуку.

В сегменте СД средней мощности (0,3–0,7 Вт), в основном ранее при-

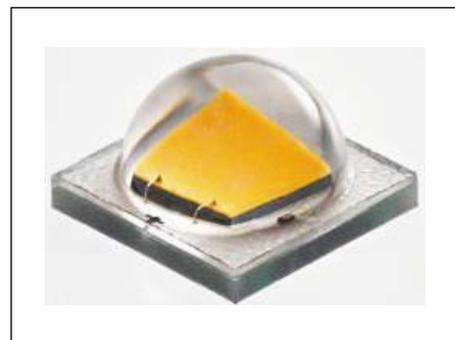


Рис. 8

менявшихся для заднего освещения мониторов, а также активно внедряемых в общее освещение, очевидна та же тенденция агрессивного снижения цены. Здесь кроме использования кристаллов меньших размеров также происходит смена классического корпуса 5630 на гораздо более компактный 3020 (рис. 7). При выигрыше в цене использование последнего экономит также место при монтаже, что немаловажно для компактных изделий. Так, подавляющее большинство новых дешёвых СД-ламп прямой замены (СДЛПЗ), выпускаемых в Азии, содержат СД с корпусом 3020.

В сегменте однокристалльных СД большой мощности (1–3 Вт) происходят следующие изменения: производители СД на керамической основе на базе вертикальных кристаллов фокусируются на переходе к кристаллам большего размера (2 мм²), произведённым по технологии с интегрированными в объём кристалла контактами (рис. 8). Данные изменения позволяют повышать мощность СД (ранее составлявшую около 1 Вт) до 3 Вт и использовать их при высоких рабочих температурах.

Производители СД с пластмассовыми корпусами с традиционно используемыми латеральными кристал-



Рис. 9

лами фокусируются в основном на оптимизации цены при увеличении энергоэффективности и сохранении мощности СД в пределах 1 Вт. Общее улучшение качества эпитаксии латеральных кристаллов позволяет сдвигать напряжение на СД с ними к 3 В и ниже при токе в 350 мА, в то время как у вертикальных кристаллов этот параметр остаётся более высоким.

Из мощных СД отдельного внимания заслуживают растущие в популярности многокристалльные. Данные изделия, преимущественно на мощность в 1 Вт и высокое напряжение (10–12 В и более) всё чаще используются в светотехнике как эффективные и в то же время дешёвые комплекты (рис. 9). Использование в СД малых ($0,203 \times 0,381 \text{ мм}^2$ и $0,254 \times 0,584 \text{ мм}^2$) или средних ($0,559 \times 0,559 \text{ мм}^2$) кристаллов энергоэффективнее, чем одного большого. Низкая стоимость латеральных кристаллов создаёт возможность многокристалльных решений с «недогруженными» кристаллами, что легко обеспечивает высокую эффективность, как у СД с вертикальными кристаллами (150–180 лм/Вт), но при гораздо меньшей стоимости. С другой стороны, при жёстких требованиях к себестоимости СД, возможна конфигурация, позволяющая максимизировать световой поток прибора, добываясь минимально возможных соотношений \$/лм при сравнительно высокой световой отдаче (СО) – порядка 140–150 лм/Вт. Многокристалльные 1-ваттные СД сегодня особо востребованы в СДЛПЗ, где высокие напряжения на СД вместе с компактным высоковольтным ЭПРА для СД позволяют создавать компактные и эффективные решения.

Остановимся теперь несколько подробнее на двух параметрах СД, тре-

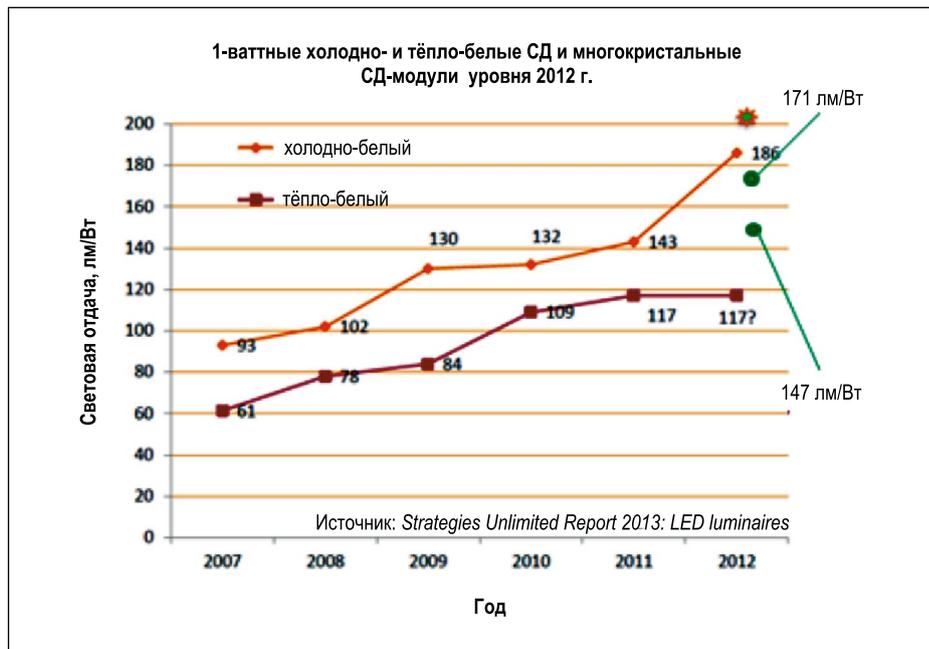


Рис. 10

бования к которым особо интересуют клиентов: СО и бининг.

Вопрос повышения СО СД вызывает в последнее время много споров и спекуляций.

При этом основную проблему оценки СО СД на сегодня представляет, в частности, слишком большое разнообразие вариантов исполнения СД. При оценке изменения СО из года в год необходимо обязательно выбирать СД сходных классов и параметров. Но проблема и состоит в том, что максимальные значения СО получают на СД, ранее не существовавших, что делает сравнения нерелевантными.

Типичным примером является график роста СО холодно-белых и тепло-белых СД, представленный агентством *Strategies Unlimited* в своём последнем отчёте (рис. 10). Следуя своему принципу сравнивать лучшие из доступных на рынке бинов, аналитики агентства столкнулись с тем, что в 2012 г. первые показали сильный рост СО, а вторые – его практическое отсутствие. На самом же деле всё определяется тем, какие именно СД сравнивались. Как уже говорилось, внедрение нового типа вертикальных кристаллов, способных работать на токах в 3 А и имеющих в два раза большую площадь, чем ранее использовавшиеся кристаллы, в формально 1-ваттных СД, и объясняет резкий рост СО при измерениях на токе 350 мА. В то же время в сегменте тепло-белого света к СД

стали применяться куда большие требования по цветопередаче. Удовлетворение повышенных требований к качеству света и привело к формальному отсутствию роста СО тепло-белых СД. Просто то, что подразумевалось под «качественным тёплым светом» даже в 2011 г. (не говоря уже о 2007-м) параметрически сильно отличается от подразумеваемого сейчас. Для сравнения на рис. 10 также добавлены средние значения СО белых СД компании «Оптоган» с КЦТ 4000 и 2700 К и R_a 80; как видим, разница по СО между ними сравнительно невелика (171 против 147 лм/Вт).

В общем и целом, стоит отметить, что, несмотря на анонсированные в начале 2013 г. рекорды по СО, полученные в лабораторных условиях на 1-ваттных СД (4000 К) – на уровне 270 лм/Вт, СО массово доступных СД существенно ниже. При этом наблюдается тенденция к существенному замедлению темпов роста из года в год СО тепло-белых СД. Что касается холодно-белых СД (КЦТ 4000 К, R_a 70), то уже в ближайшие годы реально достижение психологически важного значения 200 лм/Вт для коммерчески доступных СД. В то же время наибольший прогресс для коммерческих тепло-белых СД выразится в повышении качества света (R_a до 97, узкий бининг) при достаточно скромной ожидаемой СО: до 140 лм/Вт.

Стоит также отметить, что для большинства потребителей важна не

абсолютная СО СД, а соотношение её и цены СД. Как видно из рис. 11, стоимость 1 клм (1-ваттный белый СД, 4000 К, R_a 80) достаточно быстро стремится к \$2 – важному экономическому уровню, принимаемому комиссиями по энергоэффективности и аналитиками за достаточный для начала лавинообразного внедрения СД-оборудования в сегмент общего освещения.

Коснёмся теперь другого важного технологического аспекта – бининга СД.

Как известно, появившийся благодаря неидеально стабильной ростовой технологии кристаллов бининг сильно затруднял внедрение СД в повседневную жизнь. Сама идея того, что СД, формально имеющие одну определённую КЦТ, могут достаточно сильно различаться по этому параметру, и ни один производитель не гарантировал поставку СД исключительно только одной КЦТ, сильно тормозило внедрение СД как проектировщиками освещения, так и разработчиками изделий с СД.

На сегодня проблема бининга, по сути, представляется решённой, по крайней мере на уровне мировых лидеров.

При этом, поскольку большинство людей не различает цветности, расположенные внутри 3-ступенчатого эллипса МакаАдама, выпуск СД, «падающих» исключительно в него (для каждой стандартизованной КЦТ), и служил целью производителей СД в последние годы.

К настоящему моменту достигнут существенный прогресс в достижении этой цели и можно ожидать, что проблема бининга, своей сложностью сильно раздражавшая рядового клиента, в ближайшие пару лет полностью исчезнет.

Выпуск СД в пределах «малого бина» в основном стал возможен благодаря годами отточенной технологии эпитаксии, которая теперь позволяет получать чрезвычайно равномерный выход кристаллов «по длине волны». У ведущих производителей даже на 6-дюймовых (152,4 мм) пластинах более 80% кристаллов имеют длину волны в пределах одного бина в 2,5 нм (и практически все кристаллы попадают в 2 бина). Фиксированная длина волны и подобранный под неё состав люминофора позволяют попадать в 3-ступенчатый эллипс МакаАда-



Рис. 11

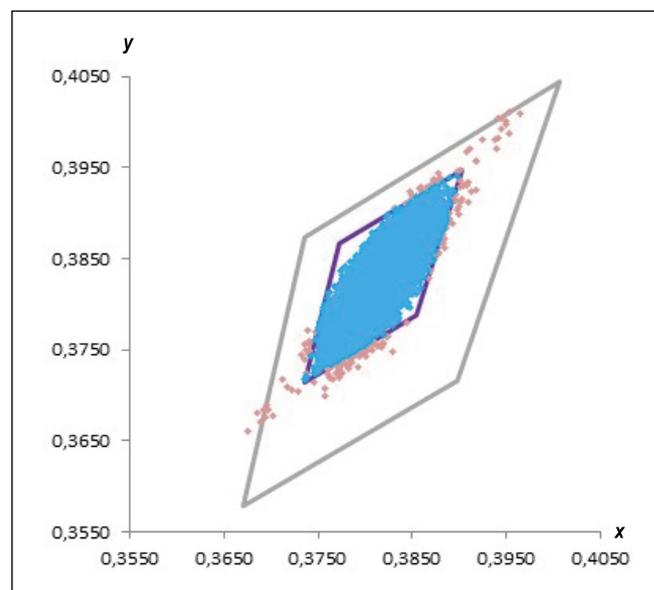


Рис. 12

ма даже при использовании объёмной заливки СД. В случае использования тонких слоёв люминофора (*transfer layers*) попадание становится практически 100%-ным.

Кроме того, ещё ранее была развита технология утилизации крайних бинов путём цветосмешения в многокристалльных СД (*easy white*). Внедрение *COB*-модулей также решает проблему бининга, так как отклонение длины волны кристаллов нивелируется общим слоем нанесённого люминофора. То же самое достигается использованием удалённого люминофора.

На рис. 12 приведено характерное распределение цветностей СД массового производства на цвето-

вом графике. Серым ромбом показана область, ограниченная 7-ступенчатым эллипсом МакаАдама, а фиолетовым – 3-ступенчатым.

Благодаря вышеуказанным технологическим достижениям, уже сейчас при покупке у лидеров рынка клиенты получают СД с разбросом по цветности исключительно в пределах малого бина (3-ступенчатого эллипса МакаАдама), то есть меньшем, чем у люминесцентных ламп.

Рассмотрим теперь динамику развития многокристалльных СД-модулей по технологии *COB*.

Исторически первые появившиеся *COB*-модули с медной основой до сих пор активно применяются, однако преимущество по теплоотводу

Рис. 13

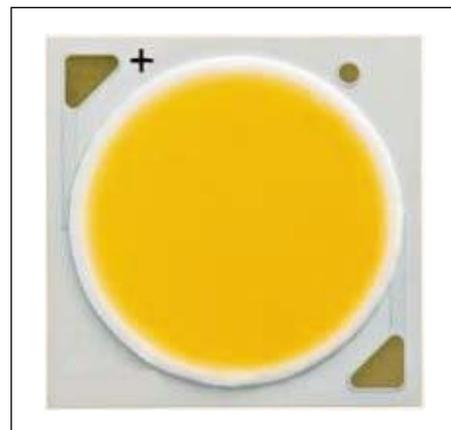


Рис. 14

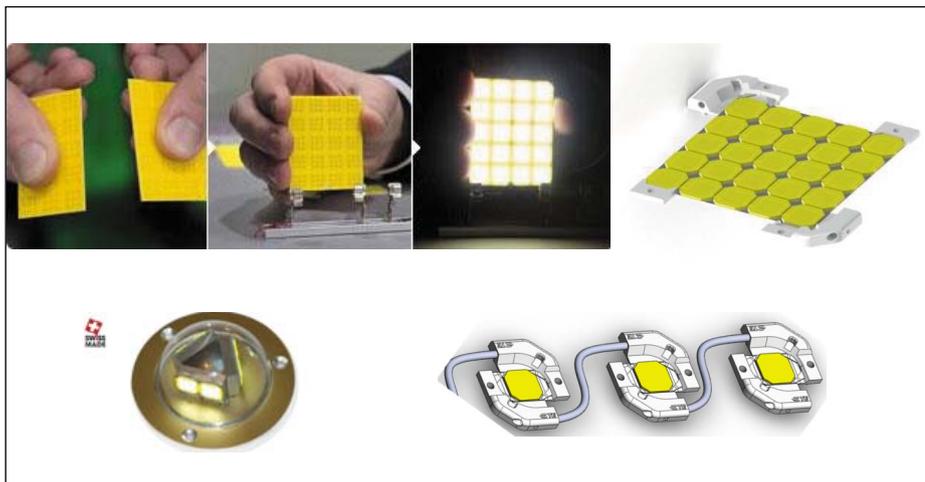


Рис. 15



Рис. 16

создаёт большие проблемы при монтаже таких изделий – именно из-за очень хорошего теплоотвода трудно добиться хорошего качества пайки контактов, а иные способы крепления без пайки, такие как на пружинных зажимах, пока не нашли широкого распространения. Предварительный прогрев платы для пайки представляет собой утомительную и не всегда реализуемую процедуру. Поэтому именно надёжное контактиро-

вание *COB*-модулей данного класса – пока слабое место в их применении. Из-за ценового давления со стороны *COB*-модулей с керамической основой в металлических *COB*-модулях малой и средней мощности (до 30 Вт) всё чаще в качестве основы вместо меди применяют алюминий (рис. 13). Недостатком крупных *COB*-модулей является практическое отсутствие на рынке подходящей коллимирующей оптики, в основном в изделиях

с *COB*-модулями используют отражатели, что не всегда эффективно. Тем не менее *COB*-модули с медной основой – по сути, доминируют в диапазоне мощностей ≥ 50 Вт.

2012 и 2013 гг. стали знаменательными для *COB*-модулей с керамической основой – множество компаний выпустило свои модели подобных изделий (рис. 14). Основная масса их покрывает диапазон мощностей 3–15 Вт, и существует несколько 30-ваттных моделей. *COB*-модули с керамической основой отлично паяются и обеспечивают надёжную электробезопасность даже очень компактных устройств. Именно изолирующие свойства керамики позволяют производить *COB*-модули с керамической основой небольшого размера. Кроме того, они в некотором роде позволяют унифицировать производство керамических СД. Недостаток подобных *COB*-модулей – сложность реализации источников света большой мощности (>30 Вт), поскольку теплоотвод через керамику с небольшой площади при таких мощностях уже практически невозможен.

Учитывая недостатки *COB*-модулей с керамической основой, компания «Оптоган» разработала собственное масштабируемое решение, покрывающее диапазон мощностей от 4 до 500 Вт. Теплоотвод при больших мощностях становится возможным благодаря относительно большой площади поверхности, а возможности использования нитридных керамик. Модули «X10» и «X4» и разработанные под них крепёжные устройства позволяют легко организовывать практически любую конфигурацию по запросу разработчиков светотехнических изделий (рис. 15).



Рис. 17



Рис. 18

Перейдем теперь к рассмотрению конечных источников света. Что нового произошло здесь за последний год?

Конец 2012 г. и особенно 2013 г. стали переломными для внедрения СДЛПЗ (рис. 16) на потребительский рынок: розничная цена на СДЛПЗ 60-ваттных ламп накаливания общего назначения впервые упала ниже \$10 в США и €10 в Европе, что вплотную приблизило СДЛПЗ к качественным КЛЛ. Также появились СДЛПЗ люминесцентных ламп T8 с CO > 100 лм/Вт, что позволило им активно замещать люминесцентные лампы даже несмотря на несоизмеримо большую цену.

Прорыв стал возможен в основном благодаря стабильной работе СД «на высоких температурах», что позволило создавать компактные и умеренные по цене конструкции ламп без массивных радиаторов. Кроме того, произошёл существенный прогресс в разработке недорогих ЭПРА для этой категории изделий сразу несколькими электронными компаниями.

По прогнозам агентства McKinsey (рис. 17), СДЛПЗ займут к 2016 г.

22 % мирового рынка источников света, при этом есть страны, где замещение идёт очень быстрыми темпами. Например, в Японии большая часть ламп уже заменена на СДЛПЗ и внутренний рынок последних уже переходит в стадию стагнации. В Западной Европе светодиодные лампы продаются опережающими темпами и уже в 2012 г. заняли > 2 % рынка ламп (вместо планируемого 1 %).

Кроме того, быстрыми темпами развиваются разработка и внедрение различных СД-модулей. Существенных успехов достигли компании, продвигающие модули на основе удалённого люминофора. Подобные решения с высоким качеством света (цветопередача и равномерность светораспределения) особенно востребованы в производстве светильников для освещения товаров.

Многие компании также уже задумываются о новых СД-источниках света, которые придут на смену всё-таки неидеальным с технической точки зрения СДЛПЗ. Как раз для разработки и внедрения стандартов для вновь разрабатываемых СД-модулей

с целью их унификации и обеспечения простоты использования в как можно большем ряде осветительных приборов и установок светодиодными компаниями было создано объединение Zhaga. Несмотря на организационные успехи Zhaga, всё ещё не создана принципиально новая концепция источников света следующего поколения. СД-модули Zhaga в какой-то мере, как и СДЛПЗ, скорее приведут уже существующие COB-модули и СД к некому стандартному «интерфейсу» (рис. 18), который, однако, тоже не идеален по оптическим и термическим характеристикам.

Тем не менее технологии развиваются и в течение ближайших пяти лет на рынке скорее всего установится некоторое понимание нового стандарта для модульных СД-источников света, наиболее эффективным образом использующих все преимущества, которые даёт СД-техника.



Моисеев Леонид Владимирович, кандидат физ.-мат. наук (2006 г.). Окончил в 1998 г. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по

специальности «Физика твердого тела». Директор по направлению «Лампы прямой замены» (лампы-ретрофиты) компании Optogan Lighting GmbH



Одоблюдов Максим Анатольевич, кандидат физ.-мат. наук (1998 г., ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Выпускник 1996 г. кафедры оптоэлектроники СПбГТУ (ЛЭТИ).

В 1995–1996 г. работал в российских подразделениях компаний Cree и TDI. С 1998 по 2003 г. – приглашённый учёный в области оптоэлектроники в университетах и исследовательских центрах Швеции, Японии, Тайваня, Финляндии, Норвегии и США. Автор свыше 60 научных публикаций. Один из основателей компании Optogan Oy (2004 г., Финляндия). С 2009 г. – генеральный директор ЗАО «Оптоган»