

Отражатели и линзы для использования в системах с твердотельными источниками света (SSL)

➔ Светодиодные точечные источники света коренным образом изменили индустрию оптики. Проектировщикам, работающим с системами на основе твердотельных источников света SSL (англ. SSL — solid-state lighting), необходимо принимать во внимание не только отражатели и линзы как самостоятельные компоненты, но и их сочетание в конструкции конечного изделия.



От обычных источников света, к которым все привыкли за долгие годы, светодиоды отличаются значительно, в том числе и особенностями применения в них оптических элементов. Так, устаревшие источники излучают свет во всех направлениях и для формирования светового потока требуют отражатель, а светодиодные точечные источники излучают световой поток лишь в одной полусфере. Поэтому им часто необходимы коллиматоры в виде линзы полного внутреннего отражения, в современной технической литературе известной под аббревиатурой TIR (англ. TIR — total internal reflection optics) и предназначенной для направления их светового потока. Но конструкция конечного оптимального твердотельного излучателя требует особого понимания совместного действия таких гибридных систем, выполненных на основе отражателей и линз (рис. 1). Здесь мы опишем физическую основу такого вида оптики и дадим некоторые рекомендации не только для их оптимального выбора, но и для самого процесса проектирования подобной оптики.

Из-за обычно слоистой структуры светодиодных кристаллов и встроенной в их корпус первичной оптики излучение света светодиодами весьма близко к распределению по закону Ламберта. Светодиод представляет собой приближенный полусферический Ламбертовский излучатель¹. Иногда это основное базовое излучение светодиода преобразуется под влиянием дополнительных оптических средств, интегрированных в светодиод, но в таком случае очень часто наблюдается уменьшение угла распространения его лучей. Задачей для разработчика твердотельных источников света становится последующее управление этим предварительно сформированным потоком светового излучения.

Задание необходимых оптических характеристик часто реализуется при помощи коллиматорных линз, использующих эффект полного внутреннего отражения. Второй вариант — хорошо известные и широко распространенные в обычных осветительных системах зеркальные отражатели-рефлекторы. Доля таких решений на рынке, похоже, возрастает по весьма уважительным причинам — повышению плотности потока мощности излучения и увеличению размеров современных светодиодов. Настоящая статья представляет обзор свойств различных

¹ Ламбертовский излучатель — это излучатель, яркость которого постоянна и не зависит от направления.

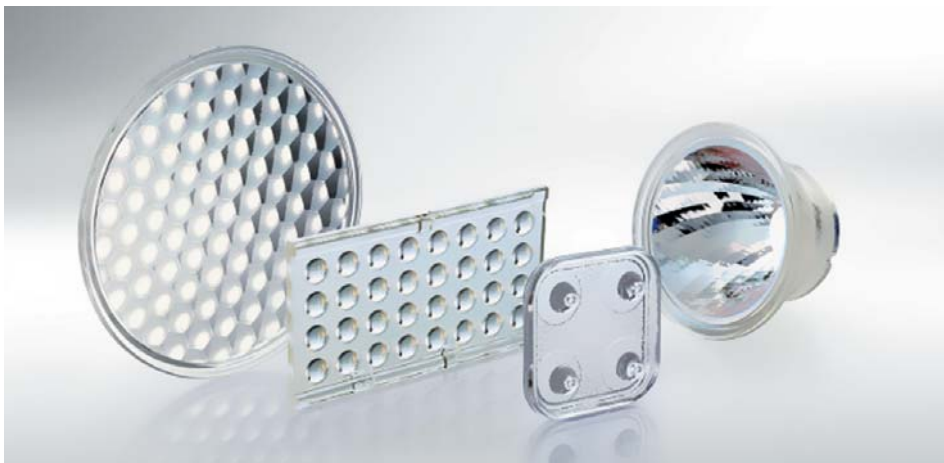


Рис. 1. Стекланные отражатели и линзы от компании Auer Lighting

видов оптики и дает описание преимуществ и недостатков каждого из них, в том числе и относительно используемых материалов. Особое внимание будет уделено материалам, из которых эти оптические устройства могут быть изготовлены.

Варианты оптики

Оптические компоненты могут быть классифицированы по физическим принципам, на основании которых они функционируют. Воздействие на распространение света достигается различными способами. Цель всех манипуляций со свойствами света, а предлагаемая статья и посвящена этому вопросу, — формирование необходимого направления потока светового излучения. В соответствии с положениями геометрической оптики, излучение источников света представлено отдельными лучами видимого света, линзы осуществляют преломление света, в то время как отражатели используются, чтобы изменить его направление распространения путем отражения от зеркальной поверхности.

В случае линз можно воспользоваться тем фактом, что поведение света при распространении через материалы зависит от их оптической плотности и является детерминированным, то есть имеет причинно обусловленную зависимость. Самый простой, но, тем не менее, достаточно общий случай этого варианта, когда одной из сред является воздух с показателем преломления $n \approx 1$, а второй средой может быть, например, такой материал, как полиметилметакрилат (англ. PMMA — polymethyl methacrylate)

или поликарбонат (англ. PC — polycarbonate). С успехом также может быть использовано и стекло, поскольку оно имеет чрезвычайно хорошие оптические характеристики. Показатели преломления обычно применяемых в оптике стекол находятся в диапазоне 1,3–2,2. Боросиликатное стекло, которое используется компанией Auer в системах освещения под торговым названием Suprax, имеет показатель преломления 1,482, а его число Аббе² равно 64,5. Последний показатель говорит об очень хороших свойствах этого типа стекла в части передачи видимой области светового спектра. Рис. 2а, б наглядно показывают ход лучей в некоторых типовых линзах.

Отражатели

Есть несколько способов реализации эффективной отражающей поверхности, начиная с металлов с высоким коэффициентом отражения. Другим вариантом является применение специальных отражающих покрытий, нанесенных на материал подложки. Для этих целей стекло в качестве подложки также будет достаточно хорошим вариантом. Так, стекло Suprax имеет весьма низкий коэффициент теплового расширения ($4,3 \times 10^{-6}$) и легко поддается нанесению покрытий. Для систем освещения в компании Auer используется нанесение покрытий методом осаждения отражающего материала из паровой фазы его плазмы — технология PICVD (англ. PICVD — Plasma Impulse Chemical-Vapor Deposition). Этот процесс позволяет легко нанести необходимое покрытие, причем достаточно быстро и экономно.

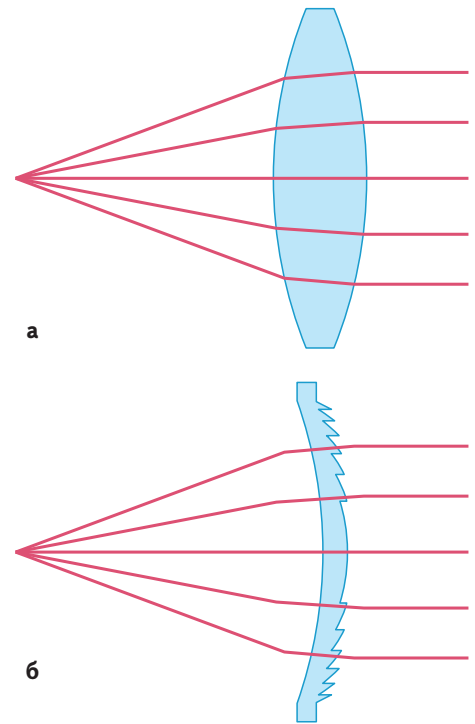


Рис. 2. Ход лучей: а) в двояковыпуклой линзе; б) вогнуто-выпуклой линзе Френеля

С помощью данного метода слои окислов кремния и титана SiO_2 и TiO_2 осаждаются из парогазовой фазы плазмы поочередно. Спектральные характеристики покрытия могут быть эффективно predeterminedены

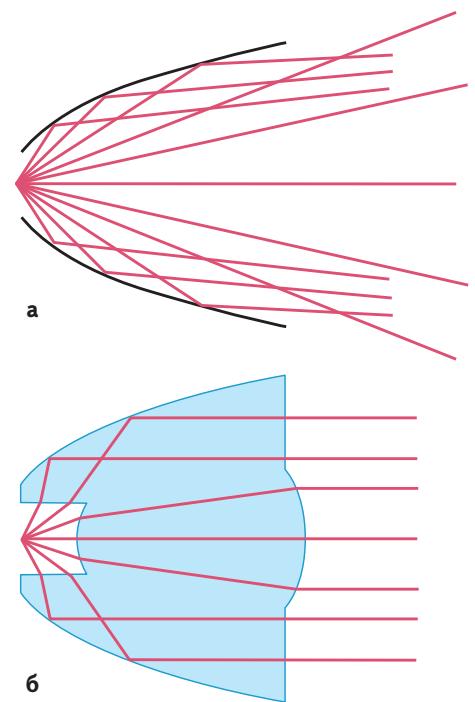


Рис. 3. а) Отражатель рассеивает лучи и направляет их в заданном направлении лишь частично; б) коллиматор направляет лучи в строго определенном направлении

² Число Аббе (V-число) — безразмерная величина, используемая в оптике как мера дисперсии света в прозрачных средах. Чем оно меньше, тем больше дисперсия и тем сильнее хроматическая aberrация среды. Названо в честь немецкого физика Эрнста Аббе.

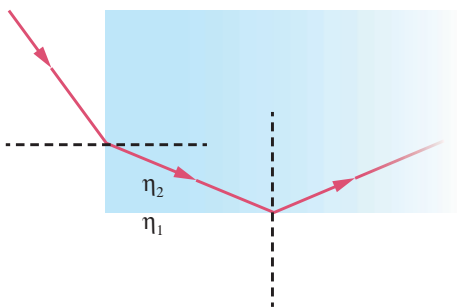


Рис. 4. Механизм полного внутреннего отражения TIR позволяет рассчитать траекторию лучей при их прохождении через оптическую среду

варьированием толщины нанесения покрытия, а при необходимости и числом таких слоев. Рис. 3а демонстрирует принцип и физику работы такого оптического отражателя.

Кроме того, есть решения для некоторых оптических задач, использующих преимущества и линзы, и отражателя путем их объединения в одно целое. Будем называть это гибридной оптикой. Специальная форма такой гибридной оптики — коллиматор, который широко применяется для светодиодных приложений. Такое устройство представлено на рис. 3б. Оно выполнено в виде линзы, но обладает свойствами как линзы, так и отражающей оптической поверхности.

Обычно в большинстве случаев отражающая способность достигается не за

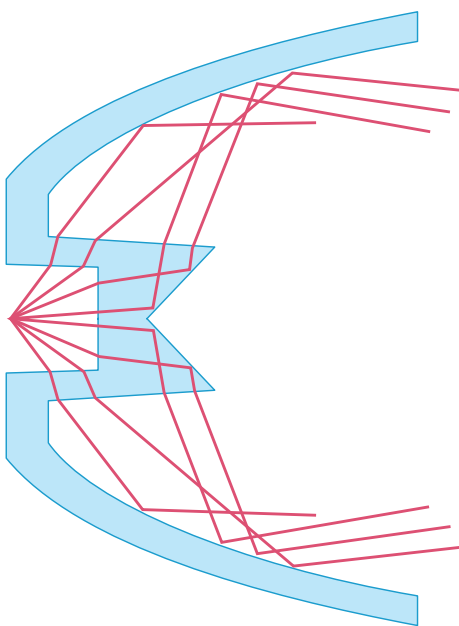


Рис. 5. Принцип работы гибридной оптики, использующей одновременно и коллиматор, и рефлектор

счет специального покрытия, а с помощью такого феномена, как эффект полного внутреннего отражения TIR. Этот эффект является следствием базовых физических принципов оптики и проявляется, когда световые лучи сталкиваются с поверхностью раздела сред. Лучи, поступающие из оптически более плотного вещества под углом не выше некоторого определенного свойствами вещества критического угла (рис. 4), эффективно отражаются. Призмы, нанесенные на внешней поверхности, обеспечивают данный эффект, даже если геометрия самого коллиматора не позволит лучам иметь угол падения выше критического. В принципе, этот эффект не имеет потерь на отражение³. Так коллиматоры могут рассматриваться как некоторая толстая линза с отражающими свойствами⁴.

Концепция рефлектора с использованием свойств линз работает в обратном порядке. Здесь структуру типа линзы добавляют в центральной области размещения светодиода по отношению к собственно отражателю, что дает возможность получить контроль над прямым лучом света от его источника — светодиода (рис. 5).

Аргументы за и против

Если сравнивать преимущества и недостатки линз и отражателей, то при решении конкретных оптических задач линзы и отражатели показывают весьма существенные различия. Это делает их более или менее пригодными для различных применений. Давайте рассмотрим эти моменты.

До сих пор в оптике существовало разграничение между линзами и отражателями. Тем не менее в светодиодных приложениях классические толстые линзы используются нечасто, еще реже — тонкие линзы Френеля. Вместо этого, как уже отмечалось, широкое распространение получают коллиматоры, поэтому сосредоточим внимание именно на них.

В общем случае, из-за своего основного оптического принципа простые отражатели ограничиваются лишь непосредственным взаимодействием между светом и отражающей поверхностью. Если взвешивать все про и contra, эффект может быть положительным. Поскольку свету не нужно проходить через материал подложки, он взаимодействует непосредственно с поверхностью отражателя, а коэффициенты

отражения до 98% можно легко получить путем напыления соответствующих отражающих покрытий. Это справедливо и для описанного выше метода осаждения паров вещества из плазмы (PICVD), который на таких диэлектрических материалах, как стекло или пластик, дает покрытия с очень высокой отражающей способностью.

Прямое взаимодействие между светом и отражающим веществом позволяет также ограничить и уменьшить влияние неизбежных производственных допусков (геометрических отклонений и шероховатости поверхности), держать их под контролем или даже компенсировать. Другим важным критерием для эффективного производства и качества оптического элемента являются его размеры и, следовательно, количество материала, используемого для него. Для отражателя на основе стекла важен только материал, примененный для нанесения покрытия, а потому есть возможность минимизировать толщину отражателя. Прямое следствие данного факта — простая масштабируемость такого решения в соответствии с габаритами первичного источника света.

Поскольку многие новые светодиоды имеют относительно большую светоизлучающую поверхность, масштабируемость в последнее время становится важным преимуществом при использовании стекла. Действительно, тенденция к распространению светодиодов типа «чип-на-плате», именуемых в технической литературе аббревиатурой COB, делает решения с применением отражателей еще более привлекательными.

Ограничивающие факторы для использования отражателей

Несмотря на все преимущества отражателей, у них есть и недостатки. Только прямое, непосредственное взаимодействие между светом и поверхностью, будучи положительным аспектом, ограничивает возможности в изменении направления лучей, когда дело доходит до допусков. Это означает, что многие оптические функции должны быть реализованы лишь на одной поверхности. Здесь имеются в виду такие функциональные возможности, как заданное отклонение лучей, которое обычно реализуется путем нанесения фасетов (специальных граней),

³ В геометрической оптике явление объясняется в рамках закона Снеллиуса.

⁴ Толстая линза — это линза, толщина которой сравнима с ее фокусным расстоянием.

управляющих рассеянием, и (или) фильтрация спектра через покрытие. Все это приводит к значительному увеличению сложности изделия.

Недостатком открытой и облегченной конструкции отражателя является ее неспособность использовать световой поток, в частности тот поток, который излучается от светодиода в прямом направлении. С поверхностью рефлектора будет взаимодействовать лишь та часть светового потока которая излучается в боковые стороны от направления прямого светового потока и только этой частью можно манипулировать при помощи рефлектора. Данный факт негативно влияет на характер конечного излучения такого светильника, использующего в качестве первичного источника светодиода, его характеристика светового излучения (плотность светового потока) будет иметь заметный уклон к центру луча. Подобные негативные моменты в части характеристики распределения света, как нередко можно видеть, приводят к нежелательным эффектам, связанным с распределением цвета, или к нежелательной размытой, ослабленной паразитной боковой подсветке. Последний эффект особенно заметен в системах с небольшим телесным углом светового пучка (например, в лампах), образованным плоским углом менее 20° по уровню половины максимальной силы света, что описано в спецификациях как FWHM (англ. FWHM — Full Width at Half Maximum). Одна из возможностей противодействовать такому явлению — повышение отношения глубины к диаметру отражателя для ограничения телесного угла прямого излучения и сокращения бокового рассеивания. Поскольку это не всегда удается выполнить из-за физических или производственных ограничений, определенный негативный эффект все равно сохраняется. Открытая апертура отражателя также может потребовать дополнительных мер по инкапсулированию (закрытию) в случае, когда необходима защита светильника от вредного влияния окружающей среды.

Преимущества коллиматоров

С другой стороны, коллиматоры, когда они разработаны соответствующим образом, имеют неотъемлемое преимущество в возможности защищать источник света от вредного воздействия окружающей среды. Концепция коллиматора опирается

на способность его объемной оптической структуры захватить большую часть (если не все) излучения светодиода и, соответственно, получить полный контроль над ним. Формирование замкнутого пространства вокруг точечного источника света обеспечивает его экранирование от внешнего воздействия. При таком подходе уже две поверхности готовы взять на себя управление распределением и направлением света (речь идет о двух отражающих поверхностях, имеющих на входе и выходе коллиматора). Это осуществляется посредством геометрии самого коллиматора, микролинз или линз Френеля.

Еще одну важную роль в этом процессе играет то, что оптически активной является и отражающая способность границ коллиматора. Чаще всего полное внутреннее отражение TIR используется для обеспечения высокоэффективного отклонения лучей. Для этого все поверхности должны быть изготовлены очень точно и тщательно, чтобы достичь максимальной эффективности без нежелательных внутренних потерь света или его рассеивания. Описанная здесь сложность изготовления и есть потенциальный недостаток коллиматоров.

Кроме того, свет должен войти в среду с более высокой оптической плотностью, а затем покинуть ее. Оба процесса характеризуются таким параметром, как потери Френеля, или потери на поглощение. Они могут быть уменьшены только с помощью дополнительных просветляющих покрытий, которые должны охватывать две различные поверхности, — а это потенциально дорогостоящая процедура. Разработчикам подобных систем также нужно принять во внимание следующее: световым лучам необходимо пройти и относительно большие расстояния в самом оптическом материале, что неизбежно приводит к их внутреннему поглощению. Таким образом, разумно достигаемая эффективность в части себестоимости может обернуться их недостатком.

Весь излучаемый светодиодом свет позволяет собрать включенный в систему светоизлучателя такой оптический элемент,

как коллиматор, но требуется, чтобы его размеры по меньшей мере были настолько же большими, как и сам конечный источник света. Как уже говорилось, коллиматоры представляют собой разновидность толстой оптики. Однако вместе с увеличением размера современных светодиодов это приведет к еще большему росту габаритов оптических систем, которые будет очень сложно отрегулировать, снизить общие затраты, а также повысить производительность труда при их изготовлении.

Еще один важный момент, о котором стоит упомянуть, — яркие блики. Поскольку в основном используются малоразмерные линзы, то имеют место очень высокие уровни яркости, что приводит к дискомфорту или к неспособности что-либо видеть. В то же время можно легко создать достаточно большие отражатели, чтобы распределить световой поток и, следовательно, снизить общий уровень яркости до комфортной степени.

Настоящее и будущее твердотельных источников света

Опираясь на опыт в реальных проектах на базе твердотельных излучателей SSL с использованием отражателей и линз, мы можем поделиться некоторыми наблюдениями о современном состоянии решений в части конструкции оптики и ее будущего. Одна из главных целей проекта — развитие семейства отражателей, которые будут использоваться в Zhaga⁵-совместимых светодиодных источниках света. Это семейство отражателей разработано для 10, 15, 25 и 40° углов светового пучка соответственно. Авторы проекта стремились использовать такие рефлекторы для светодиодов и их оформление, чтобы они могли заменить обычные лампы MR16.

Граничные условия, заданные в виде общей высоты и диаметра, были специфицированы для четырех систем оптики. Излишне говорить, что требуется и уменьшение негативных цветовых эффектов светодиода. В конце концов мы пришли к предложениям, которые выполнили все поставленные задачи и выявили интересные

⁵ Zhaga Consortium — это международная организация (консорциум), основанная с целью разработки отраслевых стандартов для сменных светодиодных модулей источников света. Консорциум является членом программы IEEE (IEEE-ISTO). IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Институт инженеров по электротехнике и электронике) — международная некоммерческая ассоциация специалистов в области техники, мировой лидер в сфере разработки стандартов по радиоэлектронике и электротехнике. Стандарты консорциума Zhaga включают стандарты для физических, электрических, тепловых и фотометрических параметров интерфейса светодиодного светового оборудования с целью дать возможность для клиентов и производителей быстро освоить светодиодные технологии освещения как для коммерческих, так и для жилых помещений за счет использования унифицированных сменных частей.

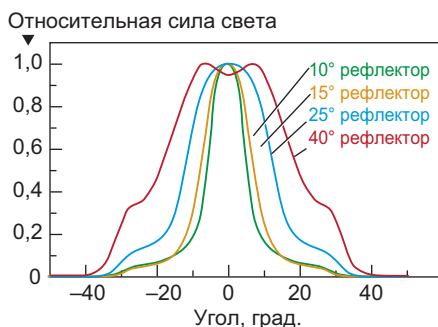


Рис. 6. Сила света по отношению к ширине телесного угла луча изменяется в зависимости от ширины луча, для которой предназначен отражатель

детали в части ограничения применения отражателей, как описано в разделах этой статьи, приведенных выше.

Рис. 6 иллюстрирует силу света различных отражателей в зависимости от телесного угла луча. Все эти оптические системы показали высокую степень смешивания цветов и превосходную эффективность. Отражатели на 40 и 25°, например, демонстрируют очень хорошие характеристики в распределении интенсивности света, с успехом превосходя стандартные лампы MR16. Даже притом что оптика на 10 и 15° также показывает выраженный пик и хороший спад интенсивности света, с меньшими углами излучения все же становится заметным небольшой ореол паразитной боковой засветки (рис. 7). Это эффект вызван светом, излучаемым от светодиода, той части его светового пучка, которая не попадает на поверхность рефлектора и выходит из лампы непосредственно без отражения.

Мы также наблюдали аналогичный эффект ореола и в другом нашем проекте с телесным углом луча в 10°. Проводили

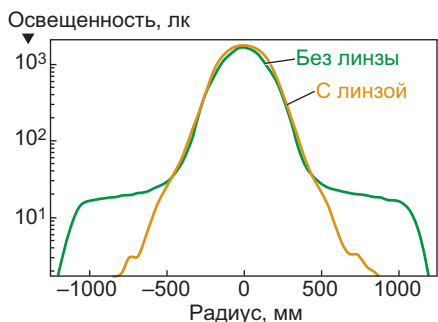


Рис. 7. Гибридная оптика уменьшает рассеяние света в конструкциях с узким световым лучом

исследования и работали над тем, чтобы преодолеть эту проблему. Когда дело доходит до больших, более мощных светодиодных модулей, таких как COB, состоящих из светодиодов с несколькими десятками отдельных чипов под общим слоем люминофора, оптика с полным внутренним отражением TIR становится менее пригодной из-за ее большого веса. Хотя отражатель в данной ситуации будет лучшим выбором, наличие прямого света от светодиодов всегда ограничивает его применение при малых углах луча из-за присутствия паразитной боковой подсветки.

Гибридная оптика

Одним из способов решения этой дилеммы является ранее упомянутый гибридный оптический элемент, которому в последнее время уделяется повышенное внимание. Именно он позволит сделать шаг вперед в ее решении. Отражатель, служащий в качестве основного оптического элемента, модифицирован добавлением к нему передающей толстой линзы, расположенной непосредственно при световом входном отверстии. Основная идея заключается в том, чтобы оказать влияние на прямое излучение света светодиодом, сохраняя без изменений общий световой поток на заданном пониженном уровне. Если конструкция разработана и выполнена правильно, то гибридные оптические элементы могут быть изготовлены как единое целое, что делает их максимально удобными для использования в качестве отражателя или TIR-линзы.

В отличие от выходной линзы, помещенной в верхней части отражателя (на выходе светового пучка), эта гибридная конструкция оказывает влияние на различные части светового пучка раздельно. Выходная линза передает весь световой поток независимо, исходит он от поверхности отражателя или от светодиода. Из-за разницы в углах падения на такую линзу очень трудно спроектировать ее геометрию с заданными свойствами. Линзе, расположенной в нижней части рефлектора, может быть придана такая форма, что свет, как правило, попав на отражатель, пройдет практически свободно. Оставшаяся часть светового потока (прямого от светодиода), не попадающая прямо на отражатель, первоначально будет отражена линзой, и эти лучи станут предварительно

преломляться в нужном направлении, а уже потом могут быть или отражены, или еще раз соответствующим образом преломлены совместно с лучами основного светового потока.

Есть два пути создания подобной гибридной оптики. Линза может либо сфокусировать прямой свет от светодиода в достаточной степени так, чтобы он попал в телесный угол отраженного света, или направить всю энергию светового потока на отражатель. Оба принципа имеют свои преимущества и недостатки. Выполнить непосредственную фокусировку светового потока становится все труднее из-за увеличения размеров светодиодных источников, что связано с таким параметром, как используемый в англоязычной технической литературе *étendue* («ограничение»)⁶. Направление света на отражатель требует либо достаточно громоздкой оптики, если используется принцип TIR, либо дополнительной стадии нанесения покрытия. Кроме того, свет должен быть направлен на отражатель под правильным углом, чтобы он отражался таким же образом, как и часть светового потока, не проходящая через толстую линзу.

Хотя оба приведенных способа и создают некоторые проблемы в процессе проектирования, результат стоит приложенных усилий. С такой системой, как «отражатель-линза», хорошо коллимированное пятно может быть реализовано таким образом, что приведет к значительному сокращению паразитного рассеяния света, и мы получим результат, практически сравнимый с засветкой от классического прожектора, содержащего лампу накаливания. Пятно не только не будет иметь выраженного светящегося круга от действия прямых лучей светодиода, но и достигнет более высокой мощности, измеряемой в канделах (рис. 7).

В то время как линзы и отражатели и даже их гибридные разновидности имеют свои плюсы и минусы, все большее распространение в качестве первичных источников структуры типа COB также приводит к еще одной важной проблеме — материалы. Еще недавно было достаточно применять относительно дешевые прозрачные пластики для коллиматоров и металлы или пластмассы с покрытием

⁶ Etendue, или étendue, является свойством света в оптической системе, которое характеризует как расходимость пучка лучей света по области засветки, так и угол наклона лучей.

для отражателей. Но последние достижения в области технологии изготовления светодиодов привели к более плотной упаковке их кристаллов и повышению плотности излучаемой ими энергии, которая будет все более выходить за рамки привычных спецификаций. Как результат, в основном это окажет влияние на температурные характеристики используемых материалов.

Например, в автомобильной промышленности распространены высокопроизводительные светодиоды, способные генерировать достаточно мощный световой поток, что требуется в системах автомобильных фар. Здесь применяются световоды длиной в несколько сантиметров. Но малейшие вариации характеристик поглощения внутри такого световода, выполненного из полиметилметакрилата (PMMA) или поликарбоната (PC), приведут к локальной аккумуляции мощности и, как следствие, к повышению температуры материала, которая легко может оказаться выше его точки плавления.

С другой стороны, стекло может с успехом работать при температурах до нескольких сотен градусов по Цельсию

и, следовательно, будет легко выдерживать указанные явления. Все изложенное также верно и для систем, предназначенных для индустрии развлечений, где производители стараются использовать все более мощные светодиоды.

С началом широкого распространения светодиодов можно ожидать, что в ближайшее время будут востребованы только дешевые оптические системы, поскольку эти приборы в основном настолько малы и маломощны, что едва нагреваются. Однако они постепенно совершенствуются, и никто не сомневается в том, что их яркость и мощность в дальнейшем будут только повышаться. Кроме того, они увеличиваются по габаритам, одновременно производя все больше тепла. Эта тенденция может привести к тому, что твердотельные источники света, используемые в промышленности, снова вернутся к традиционным отражателям и стеклу как к наиболее приемлемому выбору в части их оснащения вспомогательной оптикой. ●

*Оригинал статьи опубликован
на <http://ledsmagazine.com>*