

Альбрехт Лопер (Albrecht Lohrer) | Йоханнес Шафер (Johannes Schafer)

Проектирование мощных интегрированных светодиодных систем

Взяв за основу для сравнения нынешнее поколение светодиодов Citizen (серию CLL050-1825), авторы анализируют успехи производителей светодиодов в деле оптимизации тепловых характеристик и повышения надежности мощных светодиодов.

Светодиодные источники света играют все более важную роль в нашей жизни. Поначалу предъявляемые требования сводились главным образом к достаточной надежности, но теперь на первый план вышли и другие факторы, в частности световая отдача, точность цветопередачи, стабильность цвета и, разумеется, экономические соображения, такие как стоимость одного люмена светового потока. Некогда нижним порогом стоимости считалось 0,005 евро за 1 лм. Сейчас же некоторые производители предлагают продукцию с гораздо меньшей стоимостью люмена — даже при цветовых температурах около 2700 К.

Бурное развитие сегмента мощных светодиодов в последние годы привело к появлению ряда интересных новаторских продуктов. За светодиодами мощностью 1–3 Вт последовали еще более эффективные решения в так называемом многокристальном исполнении. Они представляют собой несколько соединенных между собой светодиодов на подложке из алюминия или керамики. Такой подход позволяет получить очень высокий световой поток. Светодиоды этого типа нашли особенно широкое применение в сфере наружного освещения, так как с их помощью можно создавать большое разнообразие недорогих решений. Что касается цветовых температур, спрос не ограничивается холодным белым светом, который используется главным образом в уличном освещении: многим покупателям требуются источники нейтрального и теплого белого света в диапазоне цветовых температур 3000–4000 К для подсветки различных объектов.

Упомянутые многокристальные светодиоды Citizen, относящиеся к последнему поколению, имеют максимальный световой поток 17 600 лм при максимальном токе 3 А. Такой поток создается 450 светодиодными кристаллами, и для его выработки нужна мощность около 178 Вт.

Продукты со столь высоким световым потоком, имеющиеся сегодня на рынке, расширяют возможности эффективного применения светодиодов. Данные устройства предлагают множеством производителей, но используются пока что не слишком активно из-за отсутствия

системно-интеграционных решений для питания этих светодиодов и отвода тепла от них. До сих пор многие потенциальные пользователи не решаются эксплуатировать их на максимальной мощности и придерживаются в основном номинального диапазона токов.

Поскольку светодиодный источник света заменить не так легко, как лампу накаливания, важную роль в процессе выбора играет фактор долговечности. Рынок требует срока службы в 50 000 ч со снижением светового потока не более чем на 30%.

Ключом к достижению таких показателей является надлежащее охлаждение. Каждый мощный светодиод необходимо соответствующим образом испытать в составе каждого изделия, чтобы убедиться, что он достаточно эффективно охлаждается и его рабочая температура не превышает максимально допустимой температуры $T_{junction}(T_j)$.

К измеренной температуре светодиода T необходимо добавить произведение теплового сопротивления светодиода R_j и рассеиваемой мощности P_d : $T_c = T_j + R_j \times P_d$.

Если температура T_j остается ниже максимально допустимой, можно гарантировать, что светодиод прослужит требуемый срок.

Расчет радиатора

Согласно формуле, чем выше мощность, тем ниже эффективность радиатора ($R_{thermal(heat\ sink)}$). Отсюда возникает потребность во все более громоздких радиаторах, чтобы обеспечить устойчивость и нужную долговечность системы. Поскольку возможности повлиять на $T_{junction}$ (максимально допустимую температуру $p-n$ перехода) и $T_{ambient}$ (окружающую температуру) крайне ограничены, необходимо доступными средствами минимизировать $R_{thermal(total)}$ и P_{total} чтобы использовать меньший по размерам и, следовательно, более дешевый радиатор.

$$R_{thermal(heatsink)} = \frac{(T_{junction} - T_{ambient})}{P_{total}} - R_{thermal(total)}$$

$$R_{thermal(total)} = R_{thermal(LED)} + R_{thermal(PCB)}$$

Снижение P_{total}

Снизить P_{total} можно за счет применения эффективных светодиодов. В этом случае для повышения световой отдачи целесообразно питать очень мощный светодиод током, меньшим номинального. Упомянутый светодиод вырабатывает световой поток 3600 лм при токе 500 мА со световой отдачей 145 лм/Вт. Столь высокая световая отдача открывает новые перспективы для эксплуатации ярких светодиодов при недостаточной эффективности охлаждения: она компенсирует вынужденное уменьшение рабочего тока светодиода. Многие пользуются этим вариантом и намеренно выбирают более мощный и дорогой светодиод, чтобы установить более компактный и дешевый радиатор.

Влияние $R_{thermal(LED)}$

Заметно снизить тепловое сопротивление светодиода $R_{thermal(LED)}$ позволяют конструктивные решения, подобные тому, которое предусмотрено в светодиодах Citizen.

Такая конструкция схематически показана на рис. 1: светодиодные кристаллы крепятся непосредственно на алюминиевой подложке клеящим составом, проводящим тепло, но не электрический ток.

Технология, показанная на рис. 2, дает лучшее распределение тепла в радиаторе по сравнению с обычным светодиодом. Причина тому — более низкое сопротивление термического контакта между кристаллом и подложкой.

В ходе испытаний даже через 46 000 ч эксплуатации при $T_j = 120$ °С сила света таких светодиодов снизилась всего на 16%. Это стало возможным только благодаря выдающимся свойствам материала светодиодных кристаллов и высокому качеству изготовления.

Параметр $R_{thermal(total)}$

$R_{thermal(total)}$ — это полное тепловое сопротивление отдельных светодиодных кристаллов вплоть до соединения с радиатором. $R_{thermal(LED)}$ обозначает тепловое сопротивление светодиода (светодиодный кристалл — подложка), а $R_{thermal(PCB)}$ — тепловое сопротивление между светодиодом и радиатором (рис. 2).

Практические подходы

Хотя модули типа «кристалл-на-плате» (chip-on-board, COB) имеют ряд преимуществ, обусловленных равномерным рассеянием тепла, их практическое использование сопряжено с некоторыми проблемами. Решать эти задачи лучше всего в сотрудничестве с компетентным партнером системотехнического профиля.

Мощные многокристалльные модули «кристалл-на-плате» довольно громоздки: их длина по краю может достигать 38 мм. Большая площадь поверхности для рассеяния тепла — это плюс, но безопасное крепление такой поверхности к радиатору с плотным прилеганием может быть затруднительным.

Ввиду того что крепежные винты располагаются достаточно далеко друг от друга, а толщина модулей достигает всего 0,9 мм, их чрезвычайно сложно закрепить на радиаторе при очень малой толщине связующего слоя (рис. 4). Даже если толщина теплопроводящей прокладки или слоя термопасты составляет менее 100 мкм, прижатие зачастую выходит существенно неоднородным, что приводит к плохому термическому контакту. Особенно это касается центральных областей модуля, где минимально допустимая прочность термического контакта более не гарантируется. К сожалению, такая проблема выявляется не на этапе присоединения кристалла, а только в ходе последующих тепловых измерений.

Эксперименты с различными материалами показали, что это может приводить к отклонениям температуры, по величине превышающим 30 °C при T_c , а потому трудно обеспечить безопасность проектируемой системы.

Светодиодный модуль крепится безопасным и термически эффективным способом к медной пластине, большей по размерам, чем сам модуль. Эта медная пластина не только образует механическую основу для прочного крепления, но и используется для распределения тепла и монтажа других компонентов. Так называемые прокалывающие контакты обеспечивают простое и надежное проводное соединение, избавляя от необходимости припаивать светодиодный модуль на пластину (чтобы при этом

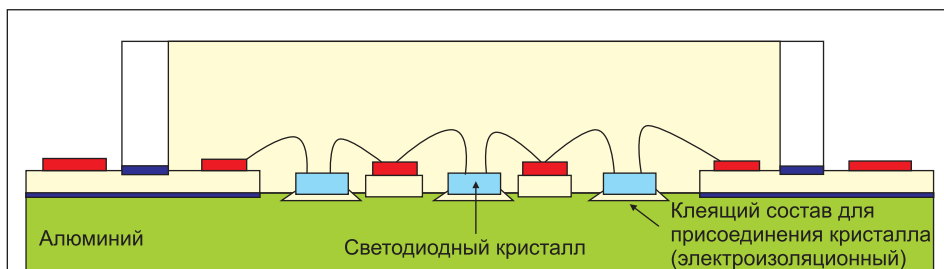
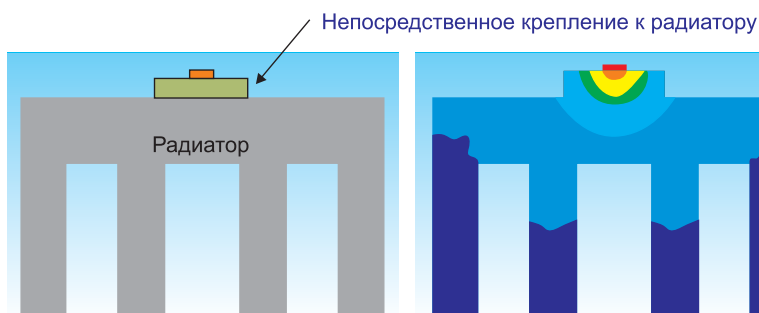


Рис. 1. Непосредственное присоединение светодиодных кристаллов электроизоляционным клеящим составом обеспечивает преимущества по сравнению с другими технологиями

Светодиод Citizen



Другие светодиоды

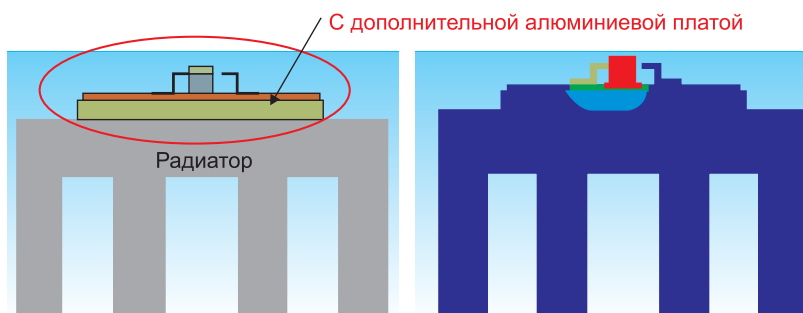


Рис. 2. При непосредственном креплении светодиодов на радиаторе тепловое сопротивление оказывается ниже, чем при использовании дополнительных алюминиевых пластин

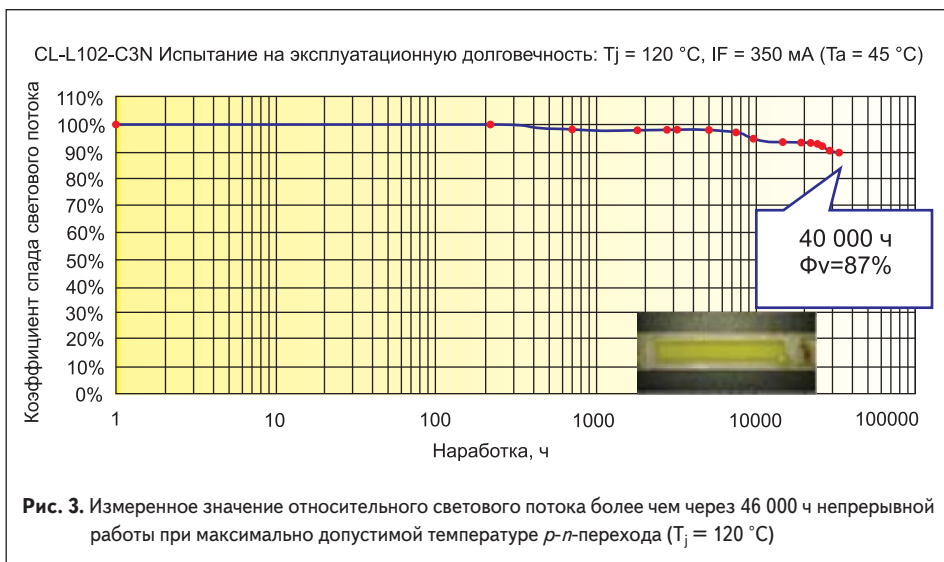


Рис. 3. Измеренное значение относительного светового потока более чем через 46 000 ч непрерывной работы при максимально допустимой температуре р-п-перехода ($T_j = 120\text{ °C}$)

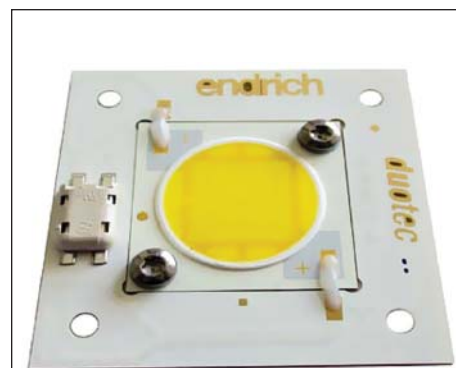
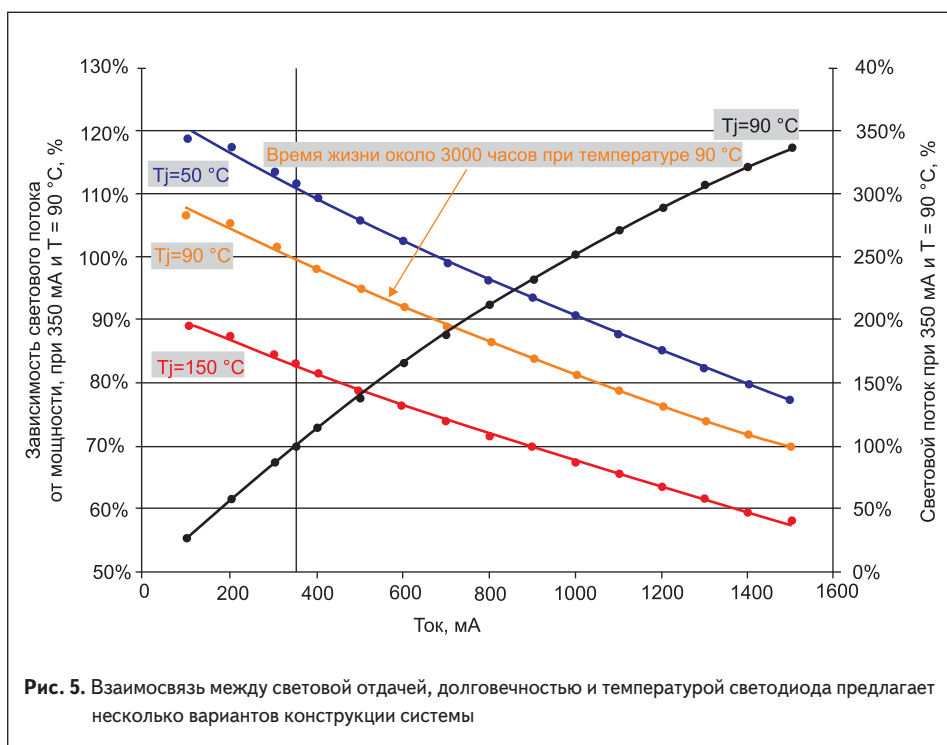


Рис. 4. Соединители с так называемыми прокалывающими контактами обеспечивают простое и надежное проводное соединение



не повредить модуль, потребовались бы очень специфичные и повторяемые условия).

В этой ситуации особенно эффективен проволочный способ присоединения, при котором модуль соединяется с платой, удерживающей прокалывающие контакты, посредством толстой алюминиевой проволоки. В отличие от пружинных контактов данная технология дает очень прочное, газонепроницаемое и стойкое к загрязнению электрическое соединение, дополнительно защищенное шаровидной верхней частью. Добавив датчики температуры, можно усилить защиту светодиодных модулей от повреждений, вызванных перегревом. В результате получается надежный и прочно присоединенный модуль, который легко монтируется и заменяется производителем или конечным пользователем светотехнического изделия.

Существует множество технологий изготовления печатных плат для светодиодных конструкций. Они заметно различаются по техническим характеристикам и стоимости: это могут быть печатные платы из материала FR4 с тепловыми каналами и ламинированной металлической основой или без таковых, керамические печатные платы, печатные платы с изолированной металлической основой и радиаторы, одновременно играющие роль печатных плат.

Какой тип платы выбрать в том или ином случае? Какой светодиод лучше всего подходит для тех или иных нагрузок? Чтобы ответить на эти вопросы, прежде всего необходимо прояснить, как ведут себя светодиоды при различных нагрузках. Здесь нужно учитывать такие факторы, как интенсивность излучаемого света, световая отдача системы, потребный срок службы и, что немаловажно, планируемая себестоимость (рис. 5). Как правило, интенсивность излучаемого светодиодом света возрастает с увеличением тока. К сожалению, одновременно снижается световая

отдача светодиода. Следовательно, чем выше ток, тем выше температура системы и светодиода, если не предусмотрено дополнительное охлаждение. Потратиться на него необходимо для стабилизации температуры.

С ростом температуры срок службы светодиода сокращается, а его световая отдача снижается еще сильнее.

Например, можно создать систему с высокой световой отдачей, низким энергопотреблением и низкой температурой *p-n*-перехода. Ее плюсами, помимо световой отдачи, будут низкие затраты на охлаждение и длительный срок службы светодиода. Минусы же будут состоять в необходимости использовать более дорогие и громоздкие светодиоды.

Можно, напротив, сконструировать систему из недорогих светодиодов, установив для них большие рабочие токи. Здесь преимуществом будет низкая стоимость одного люмена, а недостатком — пониженная световая отдача и повышенные затраты на охлаждение. Без дополнительного охлаждения температура в системе станет расти, вследствие чего снизится световая отдача и сократится срок службы светодиодов.

В идеале специалисты и пользователи должны совместно выработать индивидуальное решение, наилучшим образом соответствующее требованиям, предъявляемым к изделию, и условиям его эксплуатации. Для создания оптимальной конструкции светотехнического изделия важно рассматривать всю систему как единое целое.

С точки зрения охлаждения лучше всего, когда токопроводящие дорожки проходят непосредственно по радиатору. Здесь это реализовано с помощью так называемой гибридной толстопленочной технологии, а соединение с радиатором выполняется методом спекания (рис. 6).



Другой вариант — использовать светодиодные кристаллы без корпуса, что улучшает тепловые характеристики системы. При обработке чистых полупроводников без корпусов (по технологии «кристалл-на-плате») дополнительное преимущество состоит в том, что полупроводники и керамика имеют подходящие коэффициенты расширения, и поэтому механические напряжения невелики (рис. 7).

Классические решения для обеспечения эффективного рассеяния тепла — применение SMD-светодиодов на толстопленочных гибридных керамических печатных платах или на печатных платах с изолированной металлической основой (рис. 8). Обе технологии позволяют получить одинаково низкое тепловое сопротивление. При толстопленочной гибридной керамической технологии токопроводящая дорожка напрямую соединяется путем спекания с керамическим изолятором, который служит подложкой для электрической цепи. Такая конструкция обеспечивает великолепную теплопроводность и надежную электрическую изоляцию благодаря использованию керамики. Изготовленная по этой технологии печатная плата толщиной 0,65 мм может иметь электрическую прочность около 13 кВ.

Модули с высокой степенью интеграции питаются непосредственно переменным напряжением 230 В. Дополнительных компонентов (внешнего источника питания) не требуется. При этом источник света независимо контролирует свою температуру, автоматически



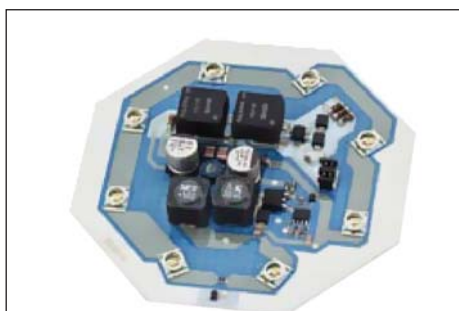


Рис. 8. Модули с высокой степенью интеграции, такие как Oktagon-25 Watt на базе толстопленочной гибридной технологии, особенно хорошо подходят для конструирования светотехнических изделий

уменьшая ток в случае перегрева (слишком высокая температура окружающей среды или неполадки в системе охлаждения). Тем самым предотвращается повреждение и преждевременное старение светодиодов.

При использовании печатных плат с изолированной металлической основой токопроводящая дорожка отделена от металлической пластины тонким изоляционным слоем. Теплопроводность и сопротивление изоляции определяются изоляционным слоем, который может быть разных классов и разной толщины. Однако любое увеличение сопротивления изоляции ведет к снижению теплопроводности.



Рис. 9. Тепловые каналы — еще один способ для более эффективного регулирования тепловых режимов

Если требования к изделию не слишком высоки, можно также применять печатные платы из материала FR4 и тепловые каналы (рис. 9). При соответствующих условиях эксплуатации и надлежащем охлаждении такой вариант становится экономически эффективной альтернативой.

Здесь тепло рассеивается с верхнего слоя меди через отверстия в металле (тепловые каналы) и передается на заднюю часть печатной платы, а затем на радиатор. При этом важно обеспечить хороший механический контакт между тепловыми каналами и радиатором, поскольку рассеяние тепла ограничено. Кроме того, слой меди на стороне светодиодного компонента часто используют для рассеяния тепла по механизму конвекции.

Еще один элемент на пути отвода тепла — сам светодиод. В зависимости от конструкции он может иметь разное тепловое сопротивление. Тепловое сопротивление светодиода описывает отношение разности температур в запирающем слое полупроводника и некоторой точке на корпусе (обычно точке пайки) к мощности, преобразуемой в светодиоде. Светодиоды, присоединяемые пайкой, могут иметь тепловое сопротивление в диапазоне от 2,5 до 250 К/Вт, в зависимости от конструкции. Но самое низкое тепловое сопротивление у светодиодных кристаллов без корпуса.

Выводы

Как правило, чем ниже тепловое сопротивление светодиода, тем выше его мощность. В конечном счете ключевым параметром является разность температур в запирающем слое полупроводника и в точке пайки во время работы изделия. Если эта разность мала, достаточно эффективное рассеяние тепла гарантировано.

При проектировании системы важно также знать максимально допустимую температуру *p-n*-перехода для каждого типа светодиода.

Когда все параметры известны, компетентный партнер-системотехник сможет порекомендовать компоненты, которые обеспечат устойчивую и безопасную работу светодиодной осветительной системы. ●

Оригинал статьи опубликован в «LED professional» www.led-professional.com