

Денис Николаев | nikolaev@ledcommunity.ru
Анатолий Феопентов | feopentov@ledcommunity.ru

Основы теплового менеджмента при конструировании ПСП

Сегодня, в первой статье цикла публикаций о конструировании полупроводниковых световых приборов (ПСП), речь пойдет о тепловом менеджменте. Под этим термином подразумевается набор конструктивных решений, принимаемых на этапе проектирования и разработки светового прибора, целью которых является обеспечение требуемого теплового режима работы. Примерами результатов теплового менеджмента являются: применение радиаторов, улучшение тепловых интерфейсов, оптимизация конвекционного охлаждения. Кроме того, важной подзадачей теплового менеджмента является оптимизация стоимости конструкции светового прибора.

Поиск теплового решения конструкции светового прибора начинается с исходных данных: внешних условий эксплуатации, допустимого теплового режима работы светодиодов, а иногда и источника питания. На втором этапе инженер определяет параметры конструкции в части, отвечающей за отвод тепла от его источников (светодиодов). Расчет можно выполнить разными путями: используя подход тепловых сопротивлений и формулы приближенного расчета радиатора, с помощью специального программного обеспечения и комбинируя эти подходы. В некоторых случаях опытный инженер может приступить к изготовлению макета ПСП, практически не проводя предварительных расчетов. Результаты любых тепловых расчетов требуют обязательной проверки путем

замеров температуры. Измерения позволяют убедиться, что принятое тепловое решение, с одной стороны, обеспечивает охлаждение перехода светодиодного чипа до требуемой температуры, а с другой — что решение не является избыточным, что важно с экономической точки зрения.

Основными исходными данными при решении задач теплового менеджмента являются температура светодиода, а точнее — $p-n$ -перехода (активной области) светодиодного кристалла, и температура окружающей среды. Известно, что температура перехода, а также сила тока влияют на срок службы светодиода. Такие зависимости указывают для своих светодиодов уже многие производители. На рис. 1 показан пример такой зависимости для светодиода XLamp XR-E производства компании Cree.

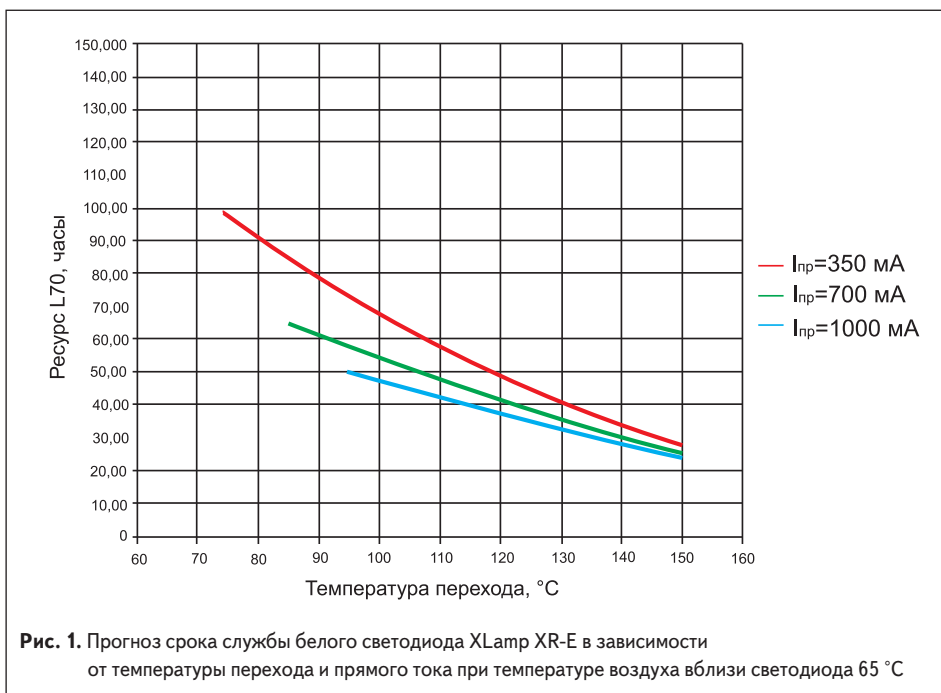


Рис. 1. Прогноз срока службы белого светодиода XLamp XR-E в зависимости от температуры перехода и прямого тока при температуре воздуха вблизи светодиода 65 °C

Таблица 1. Аналогия между электрическими и тепловыми величинами

Электрические величины	Тепловые величины
Напряжение — U , В	Тепловой напор (разность температур) — ΔT , К
Сила тока — I , А	Тепловая мощность (тепловой поток) — P , Вт
Сопротивление — R , Ом	Тепловое сопротивление — R_{th} , К/Вт
Удельная проводимость — σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	Теплопроводность — k , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
$U = I \cdot R$	$\Delta T = P \cdot R_{th}$

Если известно значение тока, при котором будет эксплуатироваться светодиод (например, 700 мА), а также желаемый ресурс (например, 50 тыс. часов), то из графика становится понятно, что в таком случае температура перехода должна поддерживаться не выше 110 °C. От этой «точки» мы и начнем расчет тепловых параметров конструкции.

Перед началом расчета рассмотрим модель светового прибора с точки зрения распространения тепла. В такой модели участвуют сам светодиод, печатная плата и радиатор. Самым простым описанием модели и расчета тепловых характеристик является метод тепловых сопротивлений. Под термином «тепловое сопротивление» понимается разность температур, возникающая между двумя точками при протекании теплового потока в 1 Вт от одной точки к другой. При этом тепловая модель строится аналогично электрической цепи, где падение напряжения соответствует разности температур, сила тока — тепловому потоку, а электрическое сопротивление — тепловому. Связь между тепловыми величинами определяется аналогично закону Ома (табл. 1).

На рис. 2 показан один из самых простых случаев построения эквивалентной схемы. Мы видим три участка, каждый из которых характеризуют своим тепловым сопротивлением, и четыре «точки», разделенные этими тепловыми сопротивлениями. Первое — R_{js} — тепловое сопротивление между переходом светодиода и местом пайки. Это, по сути, и есть тепловое сопротивление самого светодиода, значение именно этой величины обычно приводится в спецификациях (datasheets) на светодиодах. Значения для некоторых типов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Тепловые сопротивления некоторых мощных светодиодов

Изготовитель	Тип светодиода	Типичное тепловое сопротивление между переходом и тепловым контактом (местом пайки), К/Вт
Cree	XLamp XP-C	12
Cree	XLamp XP-G	6
Philips Lumileds	LUXEON Rebel	10
Osram OS	OSLON SSL	7
Osram OS	Golden DRAGON Plus	6,5
Helios Crew	HCC P20	10

Предположим, что в нашем случае тепловое сопротивление светодиода составляет 10 К/Вт. Для того чтобы рассчитать разность температур между переходом и местом пайки, нам потребуется значение тепловой мощности, выделяемой светодиодом. Как правило, ее принимают равной полной потребляемой мощности, то есть $P = U \times I$. При токе 700 мА и прямом напряжении 3,5 В (значение, которое мы найдем в спецификации светодиода) мощность составит 2,5 Вт, а разность температур — 25 К. Здесь сразу стоит отметить, что в случае светодиода, в основе конструкции которого лежит алюмооксидная керамика, тепловое сопротивление заметно увеличивается с ростом температуры (т. е. ухудшаются теплопроводные свойства). Тепловое сопротивление обычно указывается для номинальной температуры 25 °С, а при 100 °С оно увеличится примерно на 20% и составит, например, 12 вместо 10 К/Вт (у светодиодов на керамической основе наиболее существенный вклад в тепловое сопротивление вносит именно керамика). Поэтому в нашем случае разность температур следует оценивать значением 30 °С, а не 25 °С. Следующий шаг — расчет теплового сопротивления платы. Мы будем рассматривать плату с металлической основой (МСРСВ). В качестве основы в таких платах обычно используются алюминиевые сплавы. Металлизация выполняется стандартной медной фольгой, а для изготовления диэлектрического слоя между основанием и фольгой используется материал с улучшенными теплопроводящими свойствами. Толщина этого материала обычно составляет от 50 до 200 мкм, теплопроводность — от 1 до 3 Вт/м·К. Тепло от светодиода проходит через интерфейс (припой) к медной металлизации. Из-за того, что она обычно имеет небольшую толщину (35 мкм),

тепло по металлизации вдоль платы растекается слабо и проходит ниже через диэлектрический слой к алюминиевой основе. По диэлектрику тепло не растекается из-за низкой теплопроводности. Растекание тепла от места установки светодиода благодаря высокой теплопроводности (около 150 Вт/м·К) обеспечивает алюминий. Исходя из этих предпосылок, будем считать, что площадь, через которую будет проходить тепло от светодиода до алюминиевой основы, практически равна площади контакта его основания с платой. Пусть в нашем примере площадь контакта будет составлять 10 мм². Тогда тепловое сопротивление платы:

$$R = \frac{1}{k} \times \frac{L}{S} = \frac{1}{\frac{2}{mK}} \times \frac{100\mu m}{10mm^2} = 5 \frac{K}{W}$$

Разность температур между местом пайки и алюминиевой основой при таком тепловом сопротивлении составит около 12 К. Итак, мы уже знаем, что для обеспечения температуры кристалла не выше 110 °С температура алюминиевой основы платы не должна превышать 110–30–12 = 68 °С. Допустим, что тепло от платы будет отводиться через теплоотвод светильника (радиатор) на воздух. Для этого нам потребуется подобрать такой теплоотвод, который обеспечит температуру на плате не выше 68 °С при допустимой температуре окружающей среды. Как правило, температура радиатора практически равна температуре установленной на нем металлической платы и может отличаться по поверхности примерно на 2–5 °С, поэтому примем температуру радиатора равной 65 °С. В случае внутреннего применения ПСП в офисных помещениях мы рекомендуем ориенти-

роваться на температуру среды 30–35 °С (из-за того, что тепло может «скапливаться» над подвесными потолками), в промышленных помещениях температура может быть еще выше. А вот с уличным освещением все не так однозначно. С одной стороны, на улице почти всегда есть легкий ветер. Даже небольшие дуновения могут снизить температуру корпуса, например, с 80 до 70 °С. При этом среднегодовая температура в зоне умеренного климата составляет 10–15 °С [см. ГОСТ 15150-69]. С другой стороны, надо учитывать, что светильник могут установить и в помещении (ангаре), эксплуатироваться он может в районах с теплым климатом (например, на юге России), а ускоренная деградация при повышенных температурах практически не будет компенсироваться снижением скорости деградации при эксплуатации в холодные периоды времени. К другим факторам, ухудшающим охлаждение, относятся: постепенное загрязнение светильника, экранирование теплоотвода, ухудшающее естественную конвекцию, использование прибора не по назначению (например, в горячих цехах). Таким образом, для наружных применений светильников можно рекомендовать опираться в расчетах на температуру окружающей среды 20 °С. Итак, приняв, что температура воздуха составляет 20 °С, получим разность температур между воздухом и радиатором в 45 °С. Перед оценкой необходимых размеров радиатора рассмотрим механизмы отвода тепла. Их два: конвекция и излучение. Конвекцию рассматриваем только естественную, то есть воздух изначально неподвижен и приводится в движение только от нагрева светильником. Конвекция сильно зависит от конфигурации радиатора, его положения и разности температур между ним и воздухом. Например, плоский радиатор, развернутый рабочей поверхностью вниз, охлаждается примерно в 2 раза хуже радиатора, у которого рабочая поверхность находится сверху. Излучение зависит прежде всего от степени черноты радиатора и, как и в случае конвекции, разности температур. Чистая полированная поверхность алюминия имеет степень черноты около 0,2, а черная или лакированная — около 0,85. Для того чтобы оценить теплоотводящие способности радиатора, мы провели расчет для случая простейшего плоского теплоотвода. Его результаты представлены в таблице 3. Радиатор с поверхностью 1 кв. дм позволяет в нашем примере при температуре воздуха 20 °С отводить порядка 5 Вт, обеспечивая температуру перехода светодиодного кристалла не выше 110 °С (эта температура была рассчитана выше). Разумеется, при разработке ПСП размер радиатора следует минимизировать. Это требование продиктовано прежде всего целями снижения себестоимости и облегчения конструкции. Рассеивание мощности, составляющей около 1 Вт, при заданной температуре перехода, согласно полученным результатам, должен обеспечивать алюминиевый радиатор площадью порядка 0,25 кв. дм (4 кв. дюйма). Эту цифру можно использовать в качестве

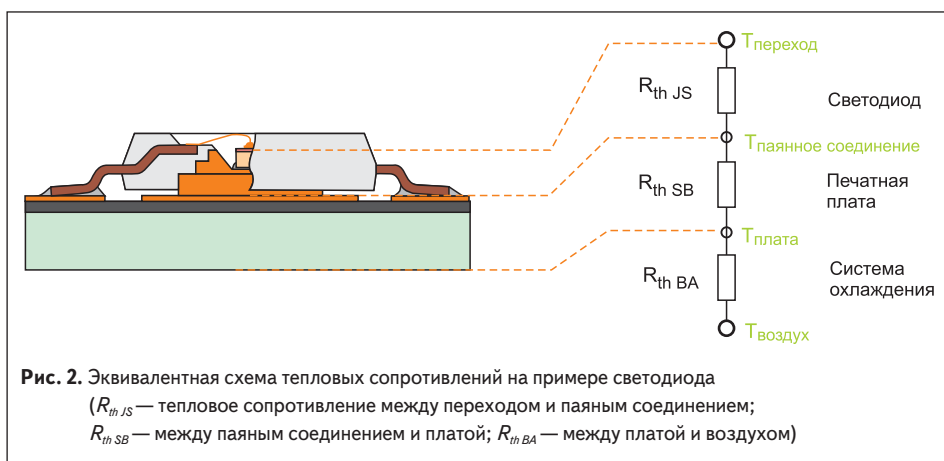


Таблица 3. Мощность, рассеиваемая плоским радиатором площадью 1 кв. дм при температуре окружающей среды 20 °С. Рабочая поверхность расположена сверху

Степень черноты	Рассеиваемая мощность при температуре радиатора 65 °С	Рассеиваемая мощность при температуре радиатора 100 °С
0,00 (без учета излучения)	4,0	8,0
0,20	4,6	9,3
0,85	6,7	13,7

отправной точки на предварительном этапе проектирования ПСП.

Во многих случаях применения плоского радиатора оказывается недостаточно, поэтому перед изготовлением макета может понадобиться проведение более точного расчета. Для этого можно воспользоваться простыми эмпирическими и теплофизическими методами расчета радиатора, а также специальными программами, например SolidWorks или QLED, которые позволяют детально проанализировать тепловое решение.

Однако все тепловые расчеты требуют обязательной проверки. Разработчик должен убедиться, что радиатор обеспечивает необходимое охлаждение. В идеальном случае для этого следует измерить температуру *p-n*-перехода светодиода. Но такое измерение требует специального оборудования, которое есть не в каждой лаборатории. Для получения надежных данных изготовители светодиодов дают собственные рекомендации по измерению температуры.

Согласно рекомендациям Lumileds для светодиода Rebel, измерение температуры следует проводить на медной металлизации печатной платы в непосредственной близости от корпуса светодиода — на так называемой «solderability indicator pad». В рекомендации сообщается, что тепловое сопротивление между переходом и этой точкой составляет 16 К/Вт (а между переходом и нижней стороной корпуса — 10 К/Вт). Измерение температуры проводится с помощью термопары, изготовленной из как можно более тонкой проволоки, это необходимо для снижения погрешности измерения — толстая проволока действует как теплоотвод, из-за чего спай термопары будет дополнительно охлаждаться, и вы получите более оптимистичные результаты, чем есть на самом деле. Для качественного измерения необходимо обеспечить надежный тепловой контакт между измеряемым объектом и термопарой: очевидно, что спай термопары, который имеет шарообразную форму, будет контактировать с платой всего в одной точке. А в худшем случае контакта вообще может не быть, что можно не заметить из-за малых размеров. Надежный контакт необходимо создать. Первый способ — использовать теплопроводящий компаунд (рис. 3), с теплопроводностью около 1 Вт/м·К. Второй — припаять термопару к контактной площадке. Один из недостатков такого способа заключается в наличии гальванической связи с цепью питания светодиода, что может вызвать помехи при измерении температуры.

Существенно менее трудоемким и технически более простым является измерение температу-

ры алюминиевого основания платы, на которой установлены светодиоды, или радиатора в непосредственной близости от светодиода. Для определения температуры перехода это вполне допустимо и очень удобно, конечно, если вы уверены в тепловом сопротивлении между переходом и точкой, в которой проводится измерение. Если вы используете одни и те же материалы, компоненты и технологии монтажа, то для отработки этого метода полезно проводить несколько измерений на нескольких светодиодах и использовать эти результаты в будущем. Проводя измерения температуры, всегда следует помнить, что в большинстве случаев результаты измерения оказываются несколько заниженными. Это особенно важно в случае, когда измерения проводятся на малых объектах и на материалах с низкой теплопроводностью. Другой ошибкой является недостаточная выдержка светодиода после подачи питания: в случае светодиодов больших размеров время выхода в установившийся режим может составлять более часа. Т.е. показания можно записывать в протокол после того, как они практически перестали изменяться. Здесь стоит упомянуть и другой, пожалуй, наиболее точный метод измерения температуры перехода, который основан на изменении прямого напряжения светодиода в зависимости от температуры. Оборудованием, необходимым для такого измерения, сегодня располагают несколько лабораторий в Москве и Санкт-Петербурге.

Кроме оборудования и качества теплового контакта, на результаты измерения температуры существенное значение оказывают условия измерения температуры. Во-первых, это пространственное положение радиатора. Мы рекомендуем располагать светодиод в наихудшем из допустимых при эксплуатации положений. Вообще, с точки зрения отвода тепла самым невыгодным является расположение радиатора

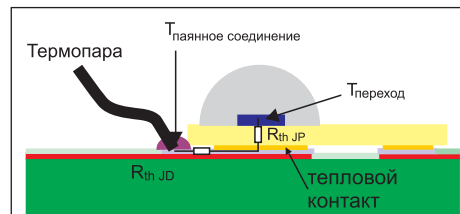


Рис. 3. Измерение температуры светодиода с помощью термопары на примере Luxeon Rebel ($R_{th,JP}$ — тепловое сопротивление между переходом и тепловым контактом; $R_{th,PC}$ — между тепловым контактом и контрольной точкой)

снизу либо когда его ребра находятся в горизонтальном положении, перпендикулярно восходящему воздушному потоку, появляющемуся при естественной конвекции. Во-вторых, это обдув. Сквозняки или движение воздуха, вызванное работой вентиляции (особенно приточной), даже очень слабые, оказывают заметное влияние на результаты измерений, охлаждая светильник. Например, снижение температуры примерно на 5 °С вызывает поток воздуха, который человек практически не замечает. Это, казалось бы, хорошая новость для разработчика уличного светильника, который в процессе эксплуатации почти всегда обдувается ветром. Но важно не забывать, что подобная оценка (при наличии обдува воздухом) может сыграть против светильника, если его повесят, например, в крытом ангаре. Нельзя забывать и о нагреве солнечным излучением, от которого страдают, прежде всего светофоры. В жаркий солнечный день температура корпуса может достигать 60 °С и выше. Отдельный случай — светильники для подвесных потолков, где следует учитывать не только отсутствие какой-либо вентиляции, но даже наоборот, возможность установки ПСП в малых замкнутых пространствах, где температура воздуха при наличии источника тепла — самого светильника — может со временем несколько увеличиться. Эти примеры говорят о том, что кроме лабораторных измерений целесообразно проводить измерения в реальных условиях эксплуатации.

Немного о тепловых решениях

Печатные платы на металлической основе (МСРСВ) сегодня уже ни для кого не являются секретом. За 5 лет стоимость таких плат снизилась чуть ли не на порядок. Цена квадратного дециметра однослойной платы на алюминиевой основе толщиной 1,5 мм составляет около 100 руб. Это примерно в 2 раза дороже аналогичной двусторонней текстолитовой платы. Еще недавно предлагались решения на подобных платах, когда отвод тепла от верхнего слоя металлизации, на котором установлен светодиод, на нижний слой, прижимаемый к радиатору, осуществлялся через множество металлизированных отверстий (рис. 4). В некоторых случаях такой подход оказывается более эффективным по сравнению с металлической платой (особенно при малых габаритах светодиода). Но при этом требуется более толстая металлизация (70 мкм вместо распространенных 35 мкм) на плоскости платы и в отверстиях (35 мкм вместо 20 мкм), и, иногда, специальное заполнение отверстий. Все это, скорее всего, приведет к увеличению стоимости заказа.

Разные металлические платы отличаются прежде всего диэлектрическим слоем: не только его толщиной, но и материалом, от которого зависит теплопроводность. Теплопроводность диэлектриков составляет обычно от 0,5 до 5 Вт/м·К, типичное значение около 1,5 Вт/м·К. Хотя некоторые изготовители, предлагающие платы по самым низким ценам, также предлагают платы с диэлектриком, теплопроводность которого выше 3 Вт/м·К, относиться к таким высоким показателям следует осторожно. Толщина диэлектриче-

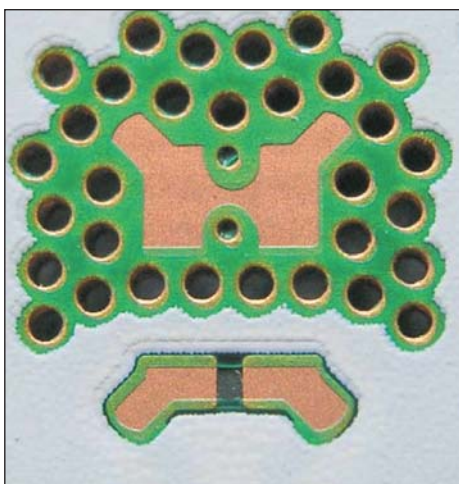


Рис. 4. Стеклотекстолитовая печатная плата с металлизированными отверстиями для светодиода Luxeon Rebel (источник Philips Lumileds)

ского слоя составляет обычно от 50 мкм и выше, типичным значением можно назвать 100 мкм. От платы тепло, как правило, передается на радиатор, являющийся элементом корпуса светильника. Но иногда встречаются решения, когда радиатор «спрятан» внутри металлического или пластмассового корпуса, не имея с ним теплового контакта. Хотя такое решение имеет право на жизнь, особенно в условиях изготовления малых партий светильников, когда разработка собственного корпуса невоз-

можно, назвать удачными подобные решения нельзя. В некоторых случаях, когда применение металлического корпуса невозможно или нежелательно, отвод тепла можно организовать через стенки пластмассового корпуса. Для этого плату со светодиодами необходимо плотно прижать к корпусу. Для улучшения теплопроводности между платой и корпусом следует использовать теплопроводящую пасту или силиконовый теплопроводящий материал (с теплопроводностью около 1 Вт/м·К). Рассмотрим пример, когда плата отделена от окружающей среды пластмассовой стенкой толщиной 2 мм. Типичная теплопроводность пластмассы составляет примерно 0,2 Вт/м·К, что в 100 раз лучше, чем у воздуха. Если размер платы равен 25 кв. см, то при выделяемой тепловой мощности в 1 Вт температура платы будет всего на 4 °С выше температуры внешней поверхности пластмассового корпуса.

Другим интересным примером теплового решения можно назвать отвод тепла от светильника через элемент конструкции здания (стена или потолок), на который он устанавливается. В случае железобетонной перегородки, когда слой штукатурки не слишком толстый, светильник с плоским радиатором может охлаждаться примерно на 10–20 градусов по сравнению с измерениями, выполненными «на воздухе». В некоторых случаях для отвода тепла от светодиодной платы к радиатору имеет смысл применять тепловые трубки, такие примеры существуют. При этом решение, скорее всего, окажется эффективным с точки зрения отвода тепла, однако могут

возникнуть вопросы с повышением себестоимости светильника. Неудачным, с нашей точки зрения, подходом является размещение радиатора внутри герметично закрытого корпуса. Однако и так поступают в случае использования готового герметичного корпуса от обычного светильника. Для лучшего охлаждения в таком случае следует обязательно обеспечить тепловой контакт между платой и корпусом. Его можно создать, например, с помощью гнутых деталей из алюминиевого листа толщиной примерно 1,5–3 мм, а иногда и более.

Заключение

В статье были изложены основы теплового менеджмента — принципиальные подходы к обеспечению корректного теплового режима работы светодиодного светильника. Конечно, многие тонкие моменты остались за рамками публикации, но при этом были охвачены основные аспекты и особенности обеспечения процесса эффективного отвода тепла от светодиодов, в частности, уделено особое внимание расчету теплового режима с помощью метода тепловых сопротивлений. Ведь именно основные особенности процесса теплоотвода нужно учитывать в первую очередь, решая в ходе проектирования вопрос теплового менеджмента. Мы полагаем, что предоставленные материалы будут полезны для тех, кто только начинает знакомиться с проблемой теплоотвода в ПСП, и тем, кто постоянно занят разработкой светодиодных светильников. ●