

# Расчет печатных плат для светодиодов Cree серий XP и MX

Одна из наиболее важных задач при разработке конструкции светодиода — отведение от светодиода тепла, возникающего в процессе их работы. Высокие рабочие температуры *p-n*-переходов негативно воздействуют на характеристики светодиодов, в результате чего снижается светоотдача и срок службы. Чтобы правильно управлять этим теплом, в конкретных применениях следует придерживаться определенных правил проектирования, так как особенности работы светодиодных светильников принципиально отличаются от светильников на традиционных источниках света.

В данном материале излагается методика по разработке недорогих печатных плат, рассчитанных для работы с мощными светодиодами. Предлагается использование стеклотекстолита типа FR-4, который стоит дешевле, но имеет большее тепловое сопротивление по сравнению с печатными платами на металлическом основании. Наличие металлизированных отверстий под светодиодами является способом дополнительного отвода тепла через стеклотекстолит к внешнему радиатору. Эта технология доступна при использовании светодиодов серий XLamps благодаря фирменной отличительной особенности корпусов американской фирмы Cree — наличие электрически изолированной тепловой площадки (теплоотвода). Для некоторых проектов разработка плат на основе стеклотекстолита с использованием тепловых отверстий может обеспечить существенную экономию, ускорить процесс изготовления прототипов при мелкосерийном и серийном производстве. Данная статья может послужить практическим руководством, так как опирается на основные принципы теплотехники, но не является догмой. Инженеры Cree написали этот материал для примерной оценки возможности применения платы из стеклотекстолита и рекомендуют пользоваться дополнительными данными,

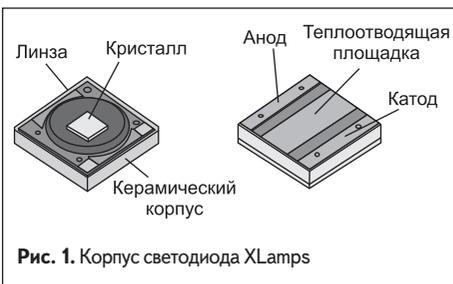


Рис. 1. Корпус светодиода XLamps

ми, чтобы при практической разработке оценить все параметры. Для удобства отечественных разработчиков материал переведен на русский язык, оригинал доступен на сайте www.cree.com.

## Корпуса светодиодов

Все типы корпусов светодиодов XLamps имеют электрически изолированные площадки для отвода тепла, которые можно припаять или закрепить на земляной проводник платы или на радиатор системы (рис. 1).

Печатная плата (ПП) должна быть смонтирована на радиаторе таким образом, чтобы передаваемое на нее через контактные площадки и теплоотвод тепло от корпуса светодиода отводилось в окружающую среду. В табл. 1 приведены типовые значения теплового сопротивления (от *p-n*-перехода до точки пайки) для различных серий светодиодов XLamp.

Таблица 1. Значения теплового сопротивления для различных серий светодиодов XLamp

Цвет	XP-C	XP-E	XP-G	MX-6
	Тепловое сопротивление, °C/Вт			
Белый	12	9	6	5
Синий	12	9	—	—
Зеленый	20	15	—	—
Красный, желтый	15	10	—	—

## Тепловые характеристики печатных плат из различных материалов

Стеклотекстолит типа FR-4 является одним из наиболее часто используемых материалов при изготовлении печатных плат, однако обладает очень низкой теплопроводностью.

Используя значения теплопроводности, указанные в табл. 2, общее тепловое сопротивление для ПП из FR-4 можно вычислить

Таблица 2. Значения для ПП из FR-4

Материал слоев	Толщина, мкм	Теплопроводность, Вт/м·К
Паяльная паста SnAgCu	75	58
Верхняя фольга Cu	70	398
Стеклотекстолит FR-4	1588	0,2
Нижняя фольга Cu	70	398

путем суммирования тепловых сопротивлений каждого из слоев.

$$\theta_{PCB} = \theta_{layer1} + \theta_{layer2} + \theta_{layer3} \dots + \theta_{layerN}$$

Для ПП, показанной на рис. 2, тепловое сопротивление слоя определяется по формуле:

$$\theta_{layer} = l / (k \times A),$$

где *l* — толщина слоя, *k* — коэффициент теплопроводности, *A* — площадь контактной площадки, отводящей тепло. Для платы из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм и имеющей форму «звезды» с площадью поверхности 270 мм<sup>2</sup> тепловое сопротивление составит примерно 30 °C/Вт.

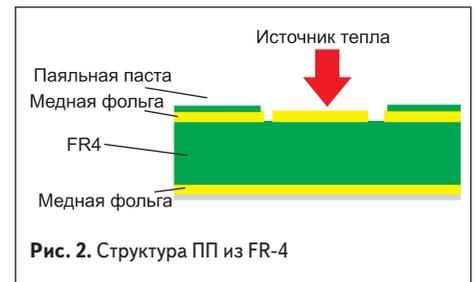


Рис. 2. Структура ПП из FR-4

Для этого и всех последующих расчетов мы предполагаем, что используется теоретически идеальный радиатор, который поддерживает температуру нижнего слоя платы 25 °C. Следует также иметь в виду, что эти расчеты не учитывают размеры источника тепла, условия конвекции и проч.

Теперь рассчитаем тепловое сопротивление аналогичной ПП из фольгированного алюминия (MCPCB). Обычно MCPCB имеет 4 слоя: паяльная маска, слой медной фольги, теплопроводящий диэлектрический слой и металлическая основа (рис. 3). Наиболее часто в качестве металлической основы используется алюминий, реже используются сталь и медь.

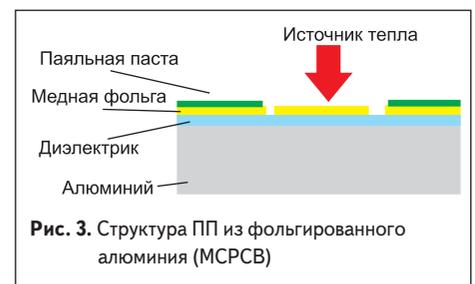


Рис. 3. Структура ПП из фольгированного алюминия (MCPCB)

Таблица 3. Значения для ПП МСРСВ

Материал слоев	Толщина, мкм	Теплопроводность, Вт/м·К
Паяльная паста SnAgCu	75	58
Верхняя фольга Cu	70	398
Диэлектрик	100	2,2
Алюминий	1588	150

Используя значения теплопроводности слоев МСРСВ, указанные в табл. 3, можно рассчитать общее тепловое сопротивление ПП формы «звезда» на МСРСВ. Оно составляет 0,2 °С/Вт.

## Проектирование тепловых отверстий

Давно известен следующий способ улучшения теплопроводности платы из стеклотекстолита типа FR-4: просверливание отверстий (рис. 4) и последующее их омеднение (рис. 5). Эти отверстия могут быть использованы для электрического соединения между слоями фольги.

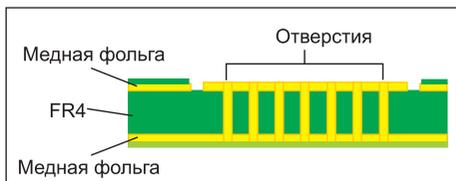


Рис. 4. Тепловые отверстия в ПП из FR-4

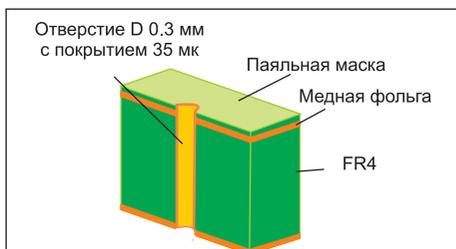


Рис. 5. Омедненное отверстие диаметром 0,3 мм

Используя значения, приведенные в табл. 4, по формуле  $\theta = l/(k \times A)$  вычисляем сопротивление одиночного металлизированного отверстия  $\varnothing 0,6$  мм:

$$(1,588 \times 10^{-3}) / (58 \times (\pi \times (0,5 \times 0,6 \times 10^{-3})^2)) = 96,8 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Таблица 4. Значения для ПП из FR-4 с тепловыми отверстиями

Материал слоев	Толщина, мкм	Теплопроводность Вт/м·К
Паяльная паста SnAgCu	75	58
Верхняя фольга Cu	70	398
Стеклотекстолит FR-4	1588	0,2
Отверстие, заполненное пастой SnAgCu	1588	58
Нижняя фольга Cu	70	398

В случае использования  $N$  отверстий на некой площади результирующее сопротивление рассчитывается по формуле:  $\theta_{vias} = 1/(N_{vias} \times k \times A)$ . Надо иметь в виду, что необходимо обеспечить плотное прилегание источника тепла к площадке с металлизированными отверстиями, в противном случае сопротивление будет увеличиваться из-за неравномерного распределения тепла. Можно рассчитать общий эквивалент сопротивления в области теплоотводящей площадки светодиода, включающий в себя тепловое сопротивление диэлектрического слоя и металлизированных отверстий. Упрощенно оба сопротивления рассматриваются как параллельное применение формулы:

$$\theta_{vias\ FR-4} = [(1/\theta_{vias}) + (1/\theta_{FR-4})].$$

Для платы размером 270 мм<sup>2</sup> с пятью отверстиями  $\varnothing 0,6$  мм общее тепловое сопротивление приблизительно составит 12 °С/Вт, что значительно лучше, чем первоначальное значение сопротивления той же платы без отверстий — 30 °С/Вт.

## Сравнение пустых и залитых припоем отверстий

Полое металлизированное отверстие отводит тепло только благодаря тонкому слою меди и имеет более высокое тепловое сопротивление по сравнению с отверстием, заполненным припоем. Тепловое сопротивление полого отверстия рассчитывается так:

$$A = \pi \times (D \times t - t^2),$$

где  $D$  — диаметр отверстия, а  $t$  — толщина покрытия. Для отверстия  $\varnothing 0,6$  мм с толщиной омеднения 35 мкм площадь медного колечка покрытия всего 0,06 мм<sup>2</sup>. А если это отверстие будет заполнено припоем, то его площадь увеличится до 0,28 мм<sup>2</sup>, а тепловое сопротивление уменьшится с 441 до 96,8 °С/Вт соответственно.

Для аналогичной ПП и такого же количества переходных отверстий, но не залитых припоем, как в предыдущем примере, общее тепловое сопротивление будет ~28 °С/Вт.

Конечно же, увеличение толщины омеднения отверстий при производстве печатных плат улучшит тепловое сопротивление отверстия. Проконсультируйтесь с вашими поставщиками-изготовителями, чтобы узнать, какую максимальную толщину металлизации отверстий они смогут обеспечить. Полые отверстия заполняются припоем во время пайки.

Однако, в зависимости от ряда факторов, это заполнение не всегда происходит полностью. И рассчитывать на то, что заполнение однозначно улучшит теплоотвод, было бы не совсем правильно.



Рис. 6. Пример незаполненных отверстий

## Заполнение отверстий

На рис. 6 показан пример некачественной пайки и образовавшихся пустот под запаянным светодиодом (выделено красным). Пустоты увеличивают тепловое сопротивление, а с другой стороны, излишки припоя могут переполнять отверстия, что приведет к неровностям ПП под теплоотводом светодиода и уменьшению площади теплового контакта.

Можно добиться равномерного заполнения отверстий припоем при сверлении отверстий диаметром менее 0,3 мм. В этом случае сила поверхностного натяжения расплавленного припоя внутри отверстия противостоит воздействию силы тяжести, что способствует равномерному распределению припоя. Недостаток этого способа в том, что уменьшение диаметра отверстий приводит к уменьшению площади тепловых контактов, и, как следствие, увеличивается тепловое сопротивление платы. Можно заполнять отверстия и любыми другими теплопроводящими материалами, например эпоксидными смолами. Но все это продлевает процесс изготовления ПП и увеличивает их стоимость. В общем, фирма Cree придерживается мнения, что полые металлизированные отверстия более практичны и эффективны, нежели отверстия, заполняемые припоем.

## Моделирование тепловых характеристик

Приведем результаты тепловых испытаний для ряда конфигураций печатных плат. Первая (рис. 7) ПП имеет форму «звезды» из стеклотекстолита FR-4, с различной шириной тепловых площадок, со сплошным нижним слоем фольги и без тепловых отверстий. Исследовались

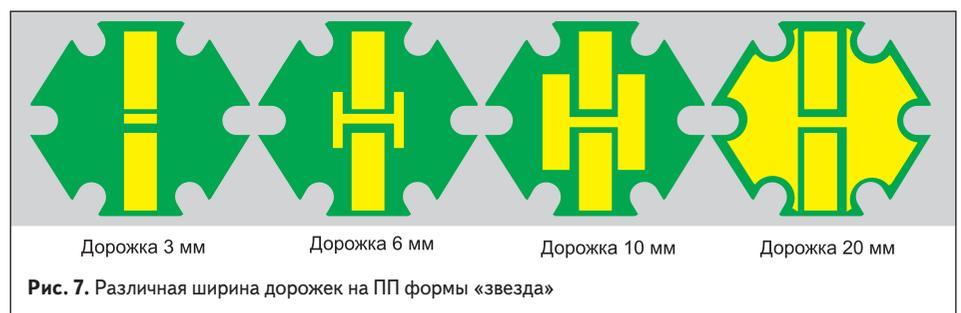


Рис. 7. Различная ширина дорожек на ПП формы «звезда»

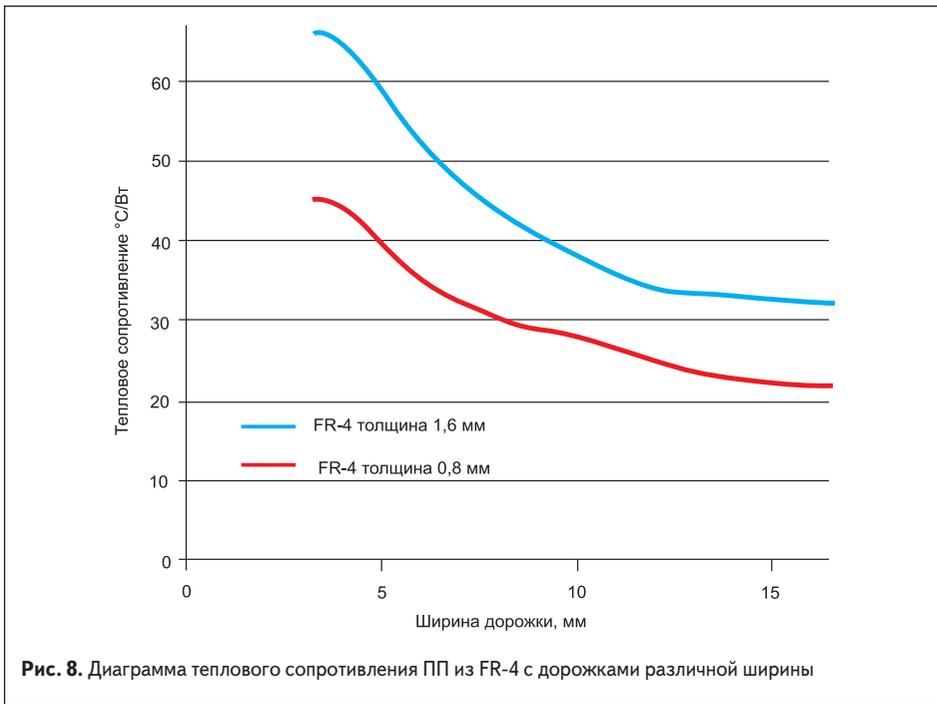


Рис. 8. Диаграмма теплового сопротивления ПП из FR-4 с дорожками различной ширины

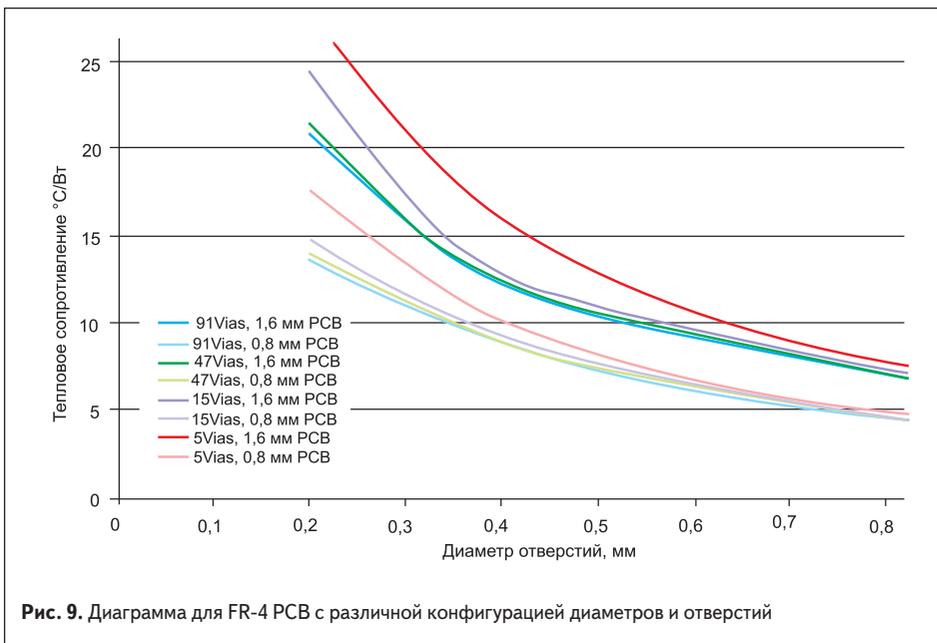


Рис. 9. Диаграмма для FR-4 PCB с различной конфигурацией диаметров и отверстий

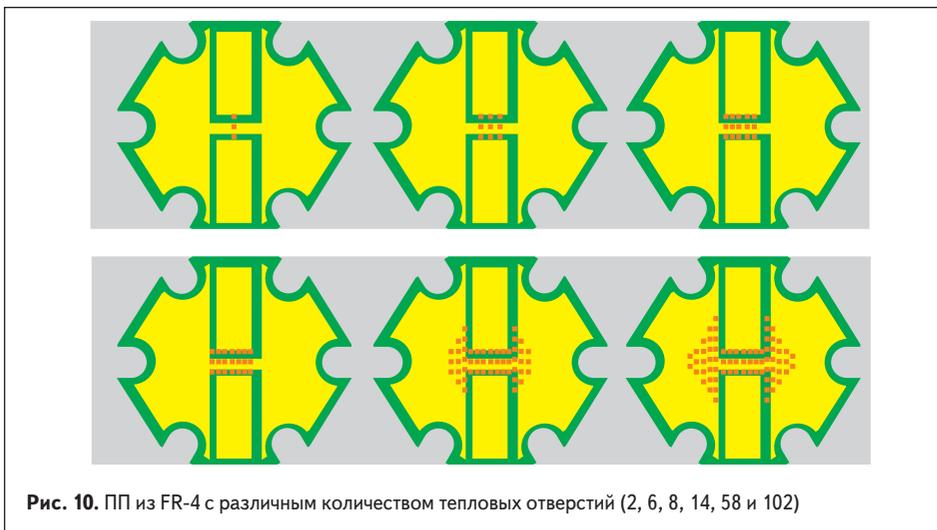


Рис. 10. ПП из FR-4 с различным количеством тепловых отверстий (2, 6, 8, 14, 58 и 102)

ПП с толщиной 0,8 и 1,6 мм. Результаты измерений приведены на диаграмме (рис. 8).

### Добавление отверстий

Диаграмма на рис. 9 иллюстрирует зависимость теплопроводности от изменения диаметра и количества отверстий. В этом эксперименте все отверстия были заполнены припоем SnAgCu. Как и ожидалось, чем больше диаметр, тем меньше тепловое сопротивление.

В следующем случае рассматривалось влияние количества тепловых отверстий (рис. 10). Омедненные отверстия  $\varnothing 0,254$  мм расположены на расстоянии 0,635 мм друг от друга. Результаты эксперимента иллюстрирует диаграмма (рис. 11): увеличение числа отверстий свыше 14 не приводит к существенному уменьшению теплового сопротивления. Очевидно, это связано с тем, что такое количество отверстий — максимум достижимой плотности на пластине, расположенной под теплоотводящей площадкой светодиода.

### Комбинации увеличения поверхности и количества отверстий

В этом эксперименте исследовались варианты исполнения ПП с 14 отверстиями  $\varnothing 0,25$  мм с различной шириной медных дорожек. Нижний слой фольги на ПП не просверлен. Данные, приведенные на рис. 12, 13, показывают, что увеличение ширины дорожки свыше 6 мм не приводит к улучшению теплового сопротивления ПП.

Было выяснено также, что изменение ширины нижней дорожки несущественно влияет на общее тепловое сопротивление.

#### Итоги теплового моделирования

- Результаты теплового моделирования показывают, что для достижения минимально возможного теплового сопротивления для ПП из FR-4 необходимо использовать стеклотекстолит с толщиной диэлектрика 0,8 мм.
- При определении количества тепловых отверстий с целью уменьшения теплового сопротивления необходимо принимать во внимание стоимость их изготовления. Отверстия большого диаметра могут остаться незаполненными при пайке, что приведет к изменению расчетных тепловых характеристик. Омедненные отверстия малого диаметра являются наилучшим решением.
- Наконец, увеличение количества тепловых отверстий и ширины токопроводящих дорожек в какой-то момент прекращает влиять на уменьшение теплового сопротивления.

Основываясь на этих выводах, инженеры Cree предлагают оптимальный вариант ПП в форме «звезда» из стеклотекстолита с выверенными размерами дорожек и отверстий, что является следствием компромисса между требованиями по отводу тепла и простотой технологии производства.

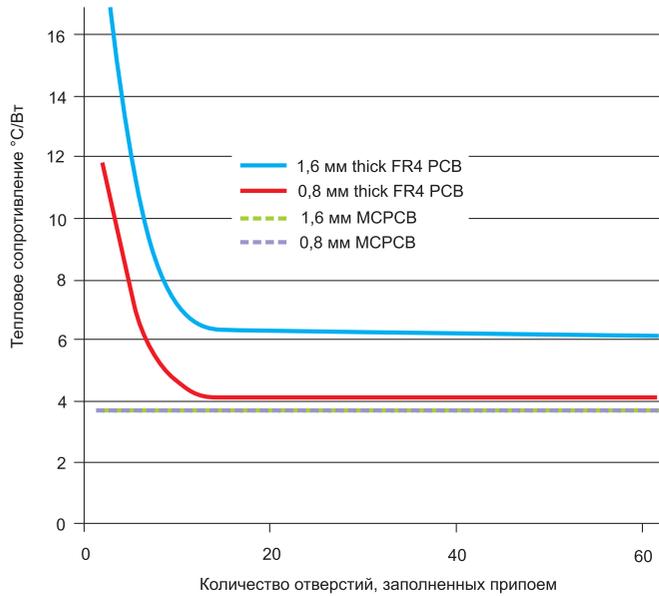


Рис. 11. Диаграмма теплового сопротивления ПП из FR-4 с различным количеством тепловых отверстий и MCPCB

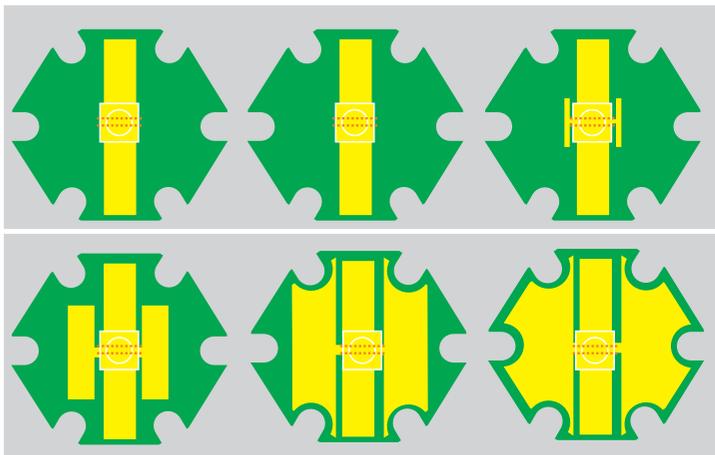


Рис. 12. ПП из FR-4 с 14 тепловыми отверстиями и различной шириной дорожек (3,3; 4,0; 6,0; 10,0; 14,0; 20,0 мм)

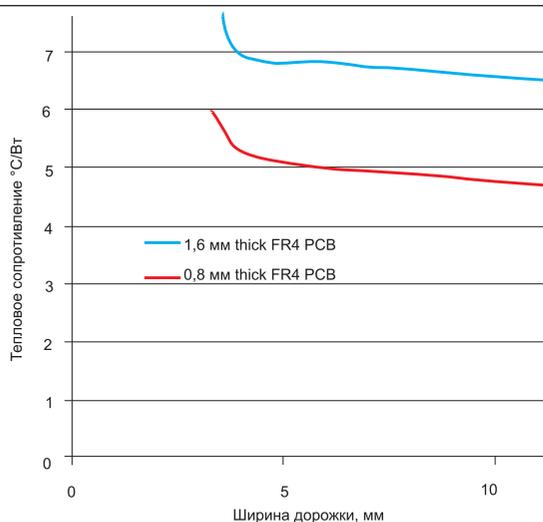


Рис. 13. Диаграмма теплового сопротивления FR-4 PCB с 14 отверстиями и различной шириной дорожек

## Измерения температуры. Проверка

Поскольку температура *p-n*-перехода светодиода влияет на все его важнейшие параметры, Cree рекомендует выполнять проверку тепловых режимов в обстановке, максимально приближенной к реальным условиям работы будущего устройства. Приведем практические результаты измерений тепловых режимов светодиодов, проведенных с помощью термопар. Эти данные подтверждают теоретические выводы, сделанные выше. На рис. 14 показана термопара типа К, расположенная на верхней медной токопроводящей дорожке в непосредственной близости от теплоотвода светодиода.

Паяльная маска (если таковая имеется) должна быть удалена, чтобы термопара непосредственно прилегала к меди. Если мы используем большее количество светодиодов, то располагаем термопару у светодиода, находящегося в максимально тяжелом тепловом режиме. Вторая термопара *hs1* находится на фронтальной поверхности радиатора, непосредственно прилегающего к ПП со светодиодом. Третья термопара *hs2* прилагается к тыльной стороне радиатора. Четвертая термопара используется для оценки окружающей среды (воздуха) — она не показана на этом рисунке. В эксперименте измерялись два одинаковых комплекта через один час после прогрева до нормального теплового режима. Для расчета фактического теплового сопротивления между радиатором и окружающей средой нужно разделить разницу между  $T_{hs}$  и  $T_a$  на мощность источника тепла. Расчетное значение сопротивления радиатора в этом эксперименте было 14,7 °C/Вт.

Как правило, температуру *p-n*-перехода нельзя измерить непосредственно, но это значение может быть вычислено из температуры, измеренной на выводе светодиода или на ближайшей к выводу точке медной дорожки. В табл. 5 приводятся данные испытаний двух комплектов светодиодов XLamp XP-C, запаянных на радиатор типа «звезда». Первый комплект — три светодиода, установленных на ПП толщиной 1,6 мм из стеклотекстолита типа FR-4 с 5 отверстиями (рис. 15); второй комплект — три светодиода на ПП толщиной 1,6 мм на алюминиевой основе. «Звезды» были приклеены на радиатор клеем Chomerics THERMATTACH T411.

Измерения проводились при токе 350 мА и температуре окружающей среды  $T_a = 20$  °C.

За основу взяты формулы:

$$P = I \times V_f; T_j = T_c + \theta_{jc} \times P;$$

$$\theta_{ca} = (T_c - T_a) / P;$$

$$\theta_{pcb} = \theta_{ca} - \theta_{hs-a}$$

Видно, что результаты довольно близки к предсказанным в диаграммах на рис. 11 (тепловое сопротивление около 3,5 °C/Вт для MCPCB) и рис. 9 (тепловое сопротивление около 9 °C/Вт для ПП из FR-4 с толщиной 1,6 мм и 5 отверстиями диаметром  $\varnothing 0,7$  мм, заполненными припоем).

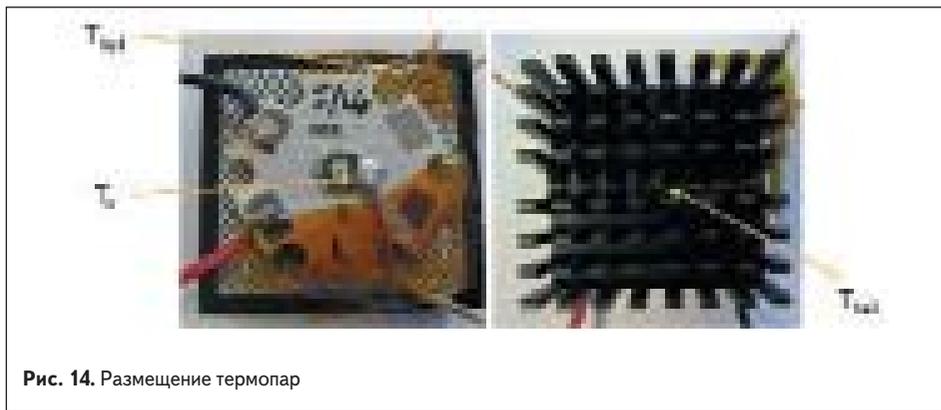


Рис. 14. Размещение термопар



Рис. 15. «Звезда» с 5 отверстиями

### Рекомендуемые варианты дизайна печатных плат

Инженеры Cree рекомендуют сверлить отверстия  $\varnothing 0,254$  мм, располагая их по прямоугольной сетке с шагом между центрами  $0,635$  мм. Они предполагают, что эта технология будет сочетать в себе разумный компромисс между

производительностью и технологичностью. Отверстия обязательно должны быть омедненными. Можно рассчитывать, что такая технология позволит снизить тепловое сопротивление до  $4$  °C/Вт при использовании ПП на основе стеклотекстолита толщиной  $0,8$  мм типа FR-4. Для светодиодов серий MX-6 и XR инженеры Cree разработали набор GERBER-файлов

для изготовления радиаторов формы «звезда» на стеклотекстолите типа FR-4. Эти файлы можно свободно скачать с сайта [www.cree.com](http://www.cree.com). Надеемся, что данный материал поможет российским разработчикам и инженерам в успешном применении светодиодов Cree. Специалисты ООО «НЕОН-ЭК» всегда готовы предоставить необходимую техническую документацию. ●

Таблица 5. Измерение температуры ПП

	$I_f$ , мА	$V_f$	$P$ , Вт	$T_{ср}$ , °C	$\theta_{jср}$ , °C/Вт	$T_{jр}$ , °C	$\theta_{hs-aр}$ , °C/Вт	$T_{aр}$ , °C	$\theta_{caр}$ , C/Вт	$\theta_{pcb(calc)}$ , °C/Вт
ПП из FR-4 1,6 мм с 5 отверстиями										
1	350	3,40	1,16	49,4	12	63,6	14,7	20	25,3	10,6
2	350	3,32	1,17	46,6	12	60,6	14,7	20	22,7	8
3	350	3,33	1,17	47,2	12	61,2	14,7	20	23,3	8,6
Среднее										9,1
ПП на алюминии 1,6 мм										
1	350	3,34	1,17	39,3	12	53,3	14,7	20	16,5	1,8
2	350	3,37	1,17	41,7	12	55,7	14,7	20	18,5	3,8
3	350	3,34	1,15	41,4	12	55,2	14,7	20	18,6	3,9
Среднее										3,2