

Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC

Светодиоды SMD в корпусах типа PLCC имеют допустимую температуру *p-n*-перехода +110...+125 °С. Для построения эффективной осветительной системы необходимо провести точный тепловой расчет с учетом рабочих характеристик используемых светодиодов. В настоящей статье рассматриваются требования, рекомендации и расчеты для систем отвода тепла.

Требования к радиатору

Самый простой способ определения требований к радиатору — это использование модели теплового сопротивления.

Определение теплового сопротивления

Тепловое сопротивление $R\theta$ [°C/Wt] определяется как изменение температуры между двумя точками пути тепла при рассеивании 1 Вт тепла. Общая формула теплового сопротивления между точкой *x* и точкой *y*:

$$R\theta_{x-y} = (T_x - T_y) / Pd, \quad (1)$$

где T_x — температура в точке *x*; T_y — температура в точке *y*; Pd — общее рассеяние тепла.

При использовании модели теплового сопротивления делается предположение, что общее рассеяние тепла равно общей электрической мощности, подаваемой в светодиод. В действительности рассеяние тепла [Вт] меньше общей электрической мощности, так как определенное ее количество преобразуется в излучение фотонов (видимое и невидимое).

$$Pd = I_F \times V_F,$$

где I_F — прямой ток; V_F — прямое напряжение.

Тепловое сопротивление в светодиоде Avago SMD между *p-n*-переходом кристалла светодиода и точкой пайки [°C/Wt] может быть записано следующим образом:

$$R\theta_{\text{переход-точка пайки}} = R\theta_{J-P} = (T_J - T_P) / Pd, \quad (2)$$

где $(T_J - T_P)$ — разница между температурой *p-n*-перехода светодиода и температурой точки пайки; T_J — температура *p-n*-перехода кристалла светодиода; T_P — температура точки пайки.

Тепловое сопротивление $R\theta_{J-P}$ является важной характеристикой светодиода, и его значение может быть найдено в спецификации изделия. Например, типовое значение $R\theta_{J-P}$ для PLCC2 InGaN равно 280 °C/Wt. Это означает, что при питании светодиода с потреблением мощности 0,1 Вт темпера-

тура T_J увеличится на 28 °C по сравнению с температурой точки пайки.

Другими типами теплового сопротивления, представляющими интерес в этой статье являются:

- тепловое сопротивление между *p-n*-переходом светодиода и окружающей средой:

$$R\theta_{J-A} = (T_J - T_A) / Pd; \quad (3)$$

- тепловое сопротивление между точкой пайки светодиода и печатной платой:

$$R\theta_{P-PCB} = (T_P - T_{PCB}) / Pd; \quad (4)$$

- тепловое сопротивление между печатной платой и окружающей средой:

$$R\theta_{PCB-A} = (T_{PCB} - T_A) / Pd; \quad (5)$$

- тепловое сопротивление между радиатором и окружающей средой:

$$R\theta_{HS-A} = (T_{HS} - T_A) / Pd. \quad (6)$$

Другое предположение, сделанное при использовании модели теплового сопротивления, заключается в том, что все тепло, генерируемое в *p-n*-переходе светодиода, передается через единственный основной путь проводимости. Передача тепла через излучение и конвекцию игнорируется, так как здесь она обычно является довольно незначительной.

Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода

Основной путь тепла для светодиода PLCC: *p-n*-переход кристалла светодиода → точка пайки → печатная плата → радиатор → окружающая среда.

В этом случае тепловой путь может моделироваться с помощью последовательной цепи резисторов, как показано на рис. 1. Передача тепла через герметик и корпус светодиода

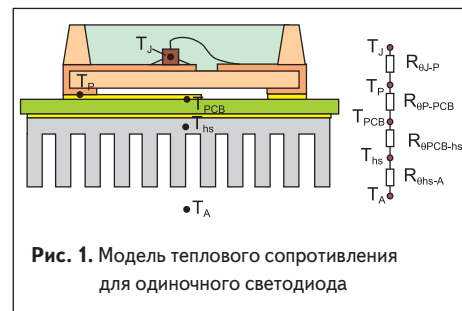


Рис. 1. Модель теплового сопротивления для одиночного светодиода

не учитывается из-за намного более низкой их теплопроводности по сравнению с металлической выводной рамкой. Общее тепловое сопротивление $R\theta_{J-A}$ может быть выражено суммой отдельных сопротивлений вдоль пути тепла от *p-n*-перехода в окружающую среду:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-PCB} + R\theta_{PCB-HS} + R\theta_{HS-A}. \quad (7)$$

В некоторых случаях, когда не используется дополнительный радиатор, модель может быть упрощена следующим образом:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-PCB} + R\theta_{PCB-A}. \quad (8)$$

Тепловое сопротивление $R\theta_{P-PCB}$ относится к термическому компаунду, который используется между точкой пайки светодиода и печатной платой. В отличие от других мощных светодиодных излучателей, которые требуют применения специального термического компаунда, такого как термическая густая смазка или термическая смола, светодиод Avago PLCC может непосредственно припаиваться к печатной плате. В связи с тем, что припой — это металлический сплав, его теплопроводность является очень хорошей. Таким образом, можно пренебречь ее тепловым сопротивлением $R\theta_{P-PCB}$ так как $T_P \approx T_{PCB}$. С учетом этого уравнение (8) преобразуется:

$$R\theta_{J-A} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-A}. \quad (9)$$

Модель теплового сопротивления для нескольких светодиодов на одном носителе

Если несколько мощных светодиодных излучателей смонтированы на одном носителе (печатной плате), то общее тепловое сопротивление изменится из-за дополнительного нагрева от соседних модулей. Это изменит значение $R\theta_{PCB-A}$. В связи с наличием нескольких светодиодов на печатной плате величина $R\theta_{J-P}$ нескольких светодиодов может быть упрощена до $R\theta_{J-P \text{ TOTAL}}$, использующей параллельную модель теплового сопротивления. Эта величина может быть получена алогично вычислению итогового сопротивления параллельно включенных резисторов:

$$R\theta_{J-P \text{ TOTAL}} = [(1/R\theta_{J-P1}) + (1/R\theta_{J-P2}) \times \dots + (1/R\theta_{J-Pn})]^{-1}, \quad (10)$$

где n — количество светодиодов на одной печатной плате.

В связи с тем, что $R\theta_{J-P1} = R\theta_{J-P2} = R\theta_{J-P3} = \dots = R\theta_{J-Pn}$,

$$R\theta_{J-P\text{ TOTAL}} = [(n/R\theta_{J-P})] - 1 = R\theta_{J-P}/n. \quad (11)$$

Если должна использоваться эта простая модель, то следует учитывать общую величину Pd всех светодиодов:

$$R\theta_{J-P\text{ TOTAL}} = (T_J - T_P)/Pd_{\text{TOTAL}}, \quad (12)$$

где $Pd_{\text{TOTAL}} = Pd_1 + Pd_2 + Pd_3 + \dots + Pd_n$.

Требования к характеристикам

Перед проектированием теплового управления для мощного светодиода пользователь должен задать следующие требования:

- максимальная рабочая температура окружающей среды $T_{A\text{max}}$, на основе условий приложения пользователя;
- максимальная температура p - n -перехода светодиода $T_{J\text{max}}$, может быть получена из технических требований на PLCC;
- максимальная мощность рассеивания на один излучатель Pd_{max} , где $Pd_{\text{max}} = I_{F\text{max}} \times V_{F\text{max}}$, может быть получена из технических требований PLCC.

При определении требуемых характеристик радиатора всегда должен рассматриваться наихудший случай.

Для системы без дополнительного радиатора требованием рассеивания тепла является $R\theta_{PCB-A}$. Путем подстановки уравнения (3) в уравнение (9) получаем:

$$(T_{J\text{max}} - T_{A\text{max}})/Pd_{\text{max}} = R\theta_{J-P} + R\theta_{P-A},$$

$$R\theta_{P-A} = (T_{J\text{max}} - T_{A\text{max}})/Pd_{\text{max}} - R\theta_{J-P}. \quad (13)$$

Так как все параметры на правой стороне уравнения (13) известны, то можно определить требование $R\theta_{PCB-A}$ к рассеиванию тепла.

Типы монтажных опций (носителя)

Всего имеются три типа монтажных опций для светодиодов Avago PLCC для различных диапазонов рассеивания тепла:

- тип I — односторонняя печатная плата FR4 с/без дополнительной медной площадки;
- тип II — двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями;
- тип III — печатная плата с внутренним металлическим слоем (MCPCB).

Тип I. Односторонняя печатная плата FR4 с/без дополнительной медной площадки

Этот тип опции носителя является самым дешевым и наименее эффективным для рассеивания тепла (рис. 2).

Тип II. Двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями

Монтажная опция типа II обеспечивает дополнительное рассеивание тепла от светодиода через отверстия к дополнительной медной площадке на нижней стороне печатной платы (рис. 3), которая может быть оставлена без

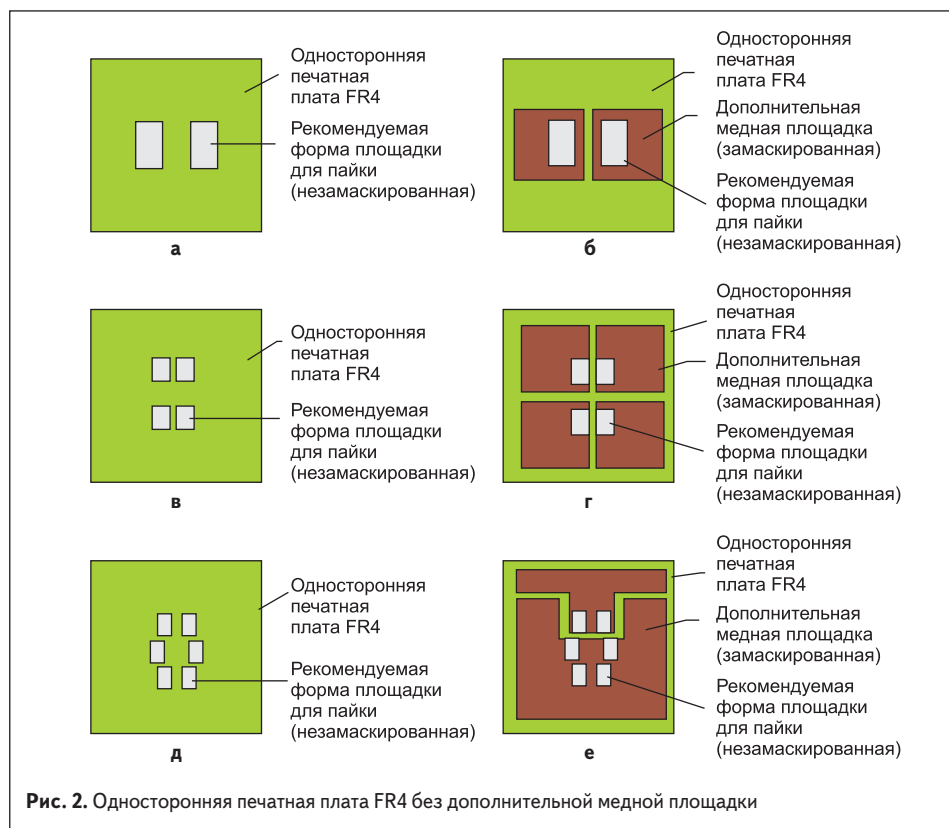


Рис. 2. Односторонняя печатная плата FR4 без дополнительной медной площадки

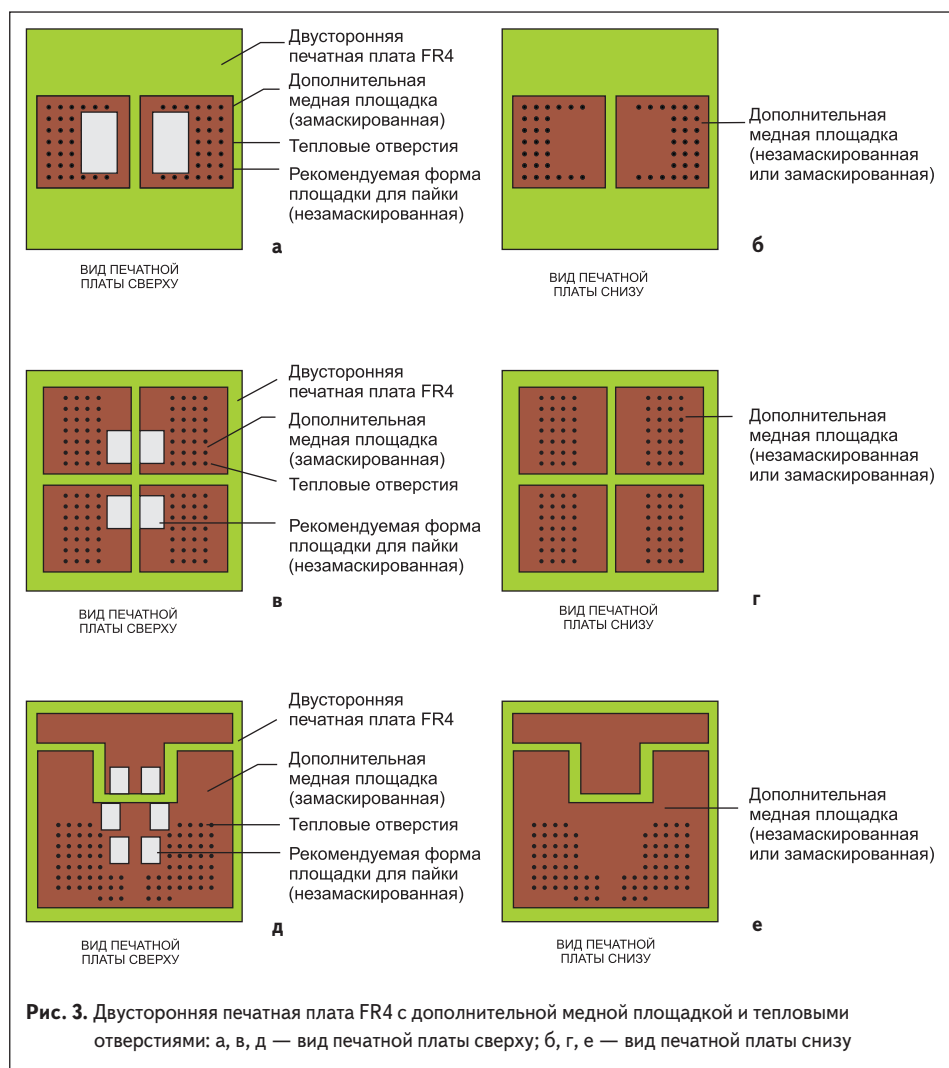


Рис. 3. Двусторонняя печатная плата FR4 с дополнительной медной площадкой и тепловыми отверстиями: а, в, д — вид печатной платы сверху; б, г, е — вид печатной платы снизу

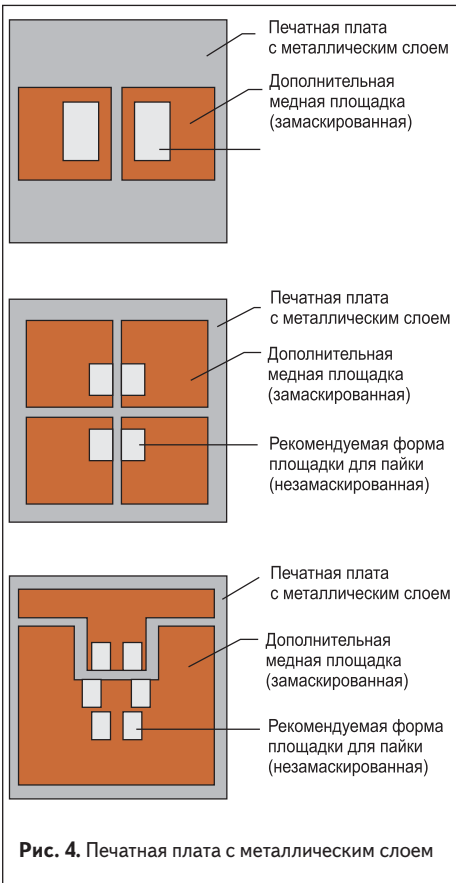


Рис. 4. Печатная плата с металлическим слоем

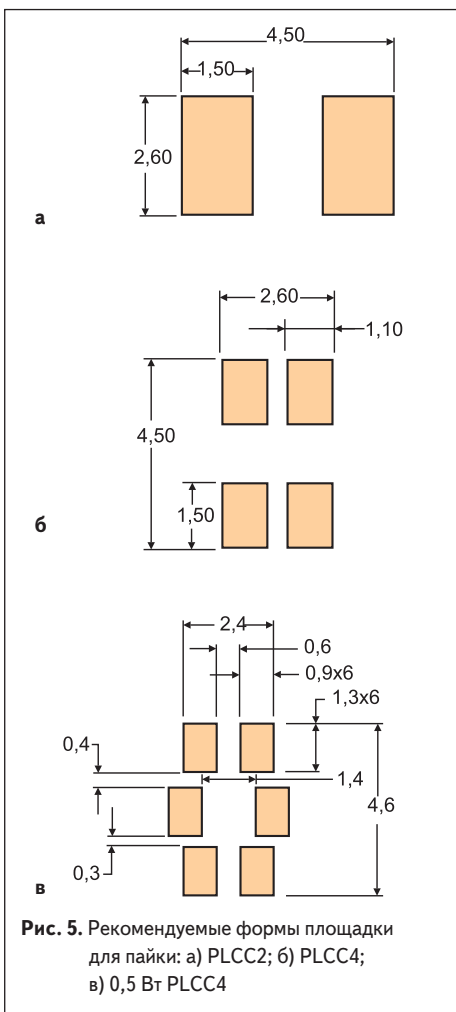


Рис. 5. Рекомендуемые формы площадки для пайки: а) PLCC2; б) PLCC4; в) 0,5 Вт PLCC4

Таблица. Параметры платы

Наружные размеры печатной платы	Переменные
Материал платы	FR4 и MCPCB
Размер ламелей	Приведен на рис. 7
Толщина платы	1,6 мм
Материал ламелей	Медь толщиной 35 микрон (1 унция)
Рассеиваемая мощность	0,1 Вт
Скорость воздуха	Неподвижный воздух (свободная конвекция)
Температура окружающей среды	25 °С

паяльной маски с помощью технологии выравнивания пайки горячим воздухом (HASL), если это приведет к лучшему рассеянию тепла в окружающую среду. Это также обеспечивает лучшее взаимодействие металла при присоединении дополнительного радиатора.

Тип III. Печатная плата с внутренним металлическим слоем

В печатной плате с внутренним металлическим слоем обычно в качестве внутренней основы используется алюминий (рис. 4). Он имеет хорошую теплопроводность (более 200 Вт/мК). Тепло, проводимое от светодиода, может эффективно распространяться через плату MCPCB в окружающую среду. По сравнению с подложкой FR4, MCPCB превосходно поддерживает низкую температуру р-п-перехода светодиода.

Рекомендуемые формы площадки для пайки

Рекомендуемые формы площадки для пайки, показанные на рис. 5, можно также найти в технических требованиях. Выводы (штырьки) модуля PLCC могут непосредственно припаиваться к площадкам с помощью процесса оплавления или ручной пайки.

Тепловое сопротивление для разных опций монтажа

Благодаря увеличенной площади передачи тепла печатная плата может действовать как радиатор, что приводит к более низкому тепловому сопротивлению между точкой пайки и окружающей средой. Для определения теплового влияния различных конфигураций пе-

чатной платы была выполнена тепловая имитация (рис. 6). Катодные ламели распространяют тепло над печатной платой в зависимости от их площади (см. спецификацию для маркировки модуля в виде указателя основного теплового пути). Материалы платы, площади ламелей и стандартные граничные условия перечислены в таблице.

Вычисления для спокойного состояния всегда выполняются с фиксированным рассеиванием мощности, равным 0,1 Вт. Другие источники тепла, например резисторы, регуляторы напряжения и т. д., не рассматриваются в анализе. Все результаты имитации справедливы в упомянутых предельных условиях. На рис. 7 показано имитированное тепловое сопротивление между точкой пайки и окружающей средой $R\theta_{p-a}$ для монтажных опций I, II и III. Однако реальное тепловое сопротивление может отличаться от имитированного значения и зависит от внешних условий, используемого материала и остальной тепловой нагрузки вокруг светодиода. Способ измерения реального теплового сопротивления $R\theta_{p-a}$ светодиодного модуля будет описан далее.

Определение требований к характеристикам радиатора

Для приложения ASMT-QWBC-Nxxxx свыше 0,5 Вт предъявляются следующие требования:

- ток источника питания $I_f = 150$ мА;
- максимальная температура окружающей среды $T_{Amax} = 25$ °С;
- 1 светодиод ASMT-QWBC-Nxxxx в модуле. Предельное ограничение вычисления:
- максимальная мощность рассеивания [Вт]: $Pd_{max} = I_f \times V_{Fmax} = 0,150 \times 3,8 = 0,615$;

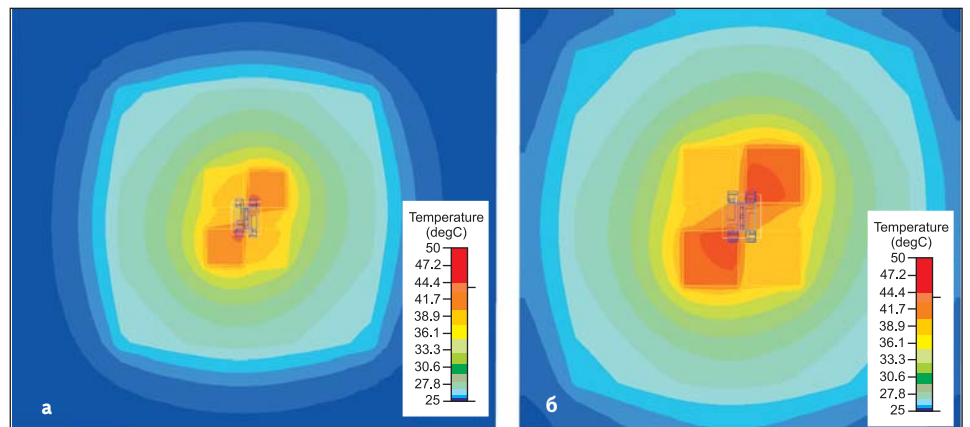


Рис. 6. Площадь площадки для каждого катода: а) 16 мм²; б) 12 мм²

- максимальная температура p - n -перехода светодиода [°C] $T_{jmax} = 125$;
- тепловое сопротивление ASMT-QWBE [°C/Вт] $R\theta_{j-p} = 40$.

Необходимо определить опции монтажа и размеры, необходимые для реализации требований приложения. С помощью формулы (13) можно вычислить требуемое тепловое сопротивление $R\theta_{p-A}$ [°C/Вт]:

$$R\theta_{p-A} = (T_{jmax} - T_{Amax}) / Pd_{max} - P\theta_{j-p} = (125 - 25) / 0,57 - 40 = 135,4.$$

На рис. 7 видно, что можно достичь теплового сопротивления, равного 102,6 °C/Вт, если использовать двустороннюю FR4 печатную плату с площадью 100 мм².

Методы измерения в реальном приложении

Из-за трудностей непосредственного измерения температуры p - n -перехода T_j она может быть оценена косвенно, путем использования модели внесенного теплового сопротивления. Для этой процедуры измеряется $R\theta_{p-A}$ между точкой пайки испытываемого устройства и окружающей средой. С помощью этого значения можно вычислить температуру p - n -перехода.

Ниже описаны процедуры для измерения $R\theta_{p-A}$ и последовательного вычисления T_j :

- Возьмите значение $R\theta_{j-p}$ светодиода из соответствующих спецификаций.
- Припаяйте к печатной плате светодиод, используемый в качестве испытываемого устройства (DUT).

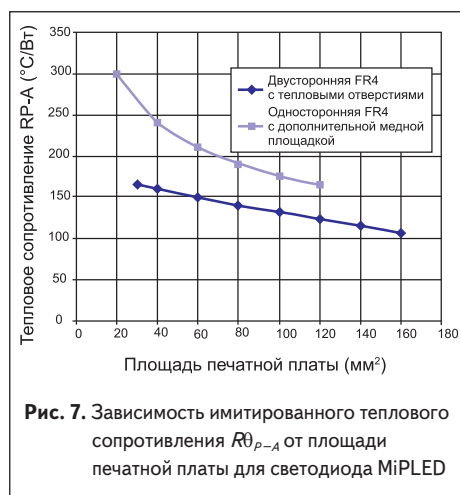


Рис. 7. Зависимость имитированного теплового сопротивления $R\theta_{p-A}$ от площади печатной платы для светодиода MiPLED

- Поместите небольшой термодатчик на штырек катода/анода DUT. Обратитесь к спецификации для получения маркировки (катода или анода) в виде указателя основного теплового пути.
- Подайте на светодиодный модуль необходимый прямой ток. Светодиодный модуль должен быть включен в течение примерно 30 минут, чтобы достичь его температурной стабильности.
- Запишите температуру точки пайки T_p , температуру окружающей среды T_A , ток I_F и соответствующее прямое напряжение V_F .
- Вычислите $R\theta_{p-A}$ системы и T_j для DUT с помощью уравнений (14) и (15):

$$R\theta_{p-A} = (T_p - T_A) / (I_F \times V_F), \quad (14)$$

$$T_j = T_p + (I_F \times V_F \times R\theta_{j-p}). \quad (15)$$

Пример вычисления

Для приложения PLCC2 HSMC-A100 конструктивный ток оценивается как $I_F = 20$ мА. В соответствии со спецификацией HSMC-A100 следует не допустить превышения температуры p - n -перехода, равной 110 °C. Таким образом, необходимо измерить температуру окружающей среды T_A , температуру точки пайки T_p и прямое напряжение V_F .

Результаты теста: $T_p = 28$ °C, $V_F = 2,0$ В.

В спецификации HSMC-A100 для величины $R\theta_{j-p}$ установлено значение 280 °C/Вт. Вычислим значение T_j [°C] для DUT с помощью уравнения (15):

$$T_j = 28 + (20 \times 2,2 \times 280) = 40,32.$$

Следовательно, $T_j < 110$ °C max.

Преимущества хорошей тепловой конструкции

Хорошая тепловая конструкция гарантирует, что ограничения для величины T_j не будут превышены; обеспечивает работу при более высоких токах, что приводит к получению большей световой отдачи от каждого светодиода; минимизирует снижение световой отдачи светодиода из-за самонагрева; уменьшает снижение световой отдачи со временем.