

Рекомендации по обеспечению теплового режима

При разработке светотехнических устройств с использованием мощных светодиодных ламп одним из важнейших требований является обеспечение адекватного отвода тепла от кристалла светодиода. Высокая рабочая температура перехода со временем приводит к деградации световых характеристик светодиодной лампы: снижается светоотдача кристалла, изменяются характеристики люминофора, у приборов ряда производителей дополнительно падает показатель светопропускания оптической системы. В результате уменьшается долговечность светодиодной лампы — один из основных показателей, выгодно отличающий ее от традиционных источников света.

Основным параметром при тепловых расчетах светотехнического устройства является так называемая температура перехода (T_j). При этом имеется в виду непосредственно температура области p-n перехода полупроводниковой структуры InGaN, в которой формируется и излучается поток фотонов с энергией $E=h\nu$, соответствующей основной частоте излучения ν . Максимальное значение температуры T_j обычно приводится в технической документации на светодиод.

Температура перехода в общем случае определяется тремя параметрами:

- температурой окружающей среды;
- теплопроводностью между переходом и теплоотводящим основанием корпуса светодиода;
- рассеиваемой электрической мощностью светодиода.

При разработке светотехнического устройства необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- Минимизация плотности распределения тепла на плате с установленным светодиодом или группой светодиодов.
- Минимизация температуры внутри объема устройства. Именно эта температура будет являться температурой окружающей среды для

светодиода.

- Увеличение теплопроводности между радиатором и теплоотводящим основанием корпуса светодиода. Ее величина непосредственно влияет на перепад температуры и эффективность отвода тепла, а следовательно, и размер радиатора.
- Расположение радиатора должно обеспечивать беспрепятственную естественную конвекцию воздуха, в противном случае эффективность теплосъема будет недостаточной.

Несмотря на всю очевидность рассмотренных положений, почему-то именно в светотехнических устройствах разработчики зачастую грубо пренебрегают элементарными правилами конструирования систем обеспечения теплового режима. Например, автору демонстрировалась конструкция головного взрывобезопасного светильника, в котором светодиодная лампа была ус-

тановлена на радиаторе внутри полностью герметичного пластмассового корпуса. При этом отвод тепла был возможен только за счет теплопередачи от нагретого воздуха внутри светильника через пластмассовые стенки, имеющие весьма низкую теплопроводность. Об эффективности такого решения, конечно же, не может быть и речи.

Тепловая модель

В основе любой тепловой модели лежит понятие теплового сопротивления. Если осуществляется передача тепла от тела с большей температурой T_1 телу с меньшей температурой T_2 , то тепловое сопротивление определяется как отношение разности температур тел к мощности P_d , рассеиваемой нагретым телом:

$$R\theta = \frac{T_1 - T_2}{P_d} \text{ (}^\circ\text{C/Wt)} \quad (1)$$

Такая модель удобна тем, что с тепловыми сопротивлениями можно оперировать аналогично электрическим сопротивлениям. Это делает модель очень наглядной и упрощает расчеты.

Для светодиодных ламп наиболее важной характеристикой является тепловое сопротивление между переходом и теплоотводящим основанием корпуса $R\theta_{j-p}$. Его величина всегда указывается в технической документации на прибор. Если светодиод устанавливается на теплоотвод, то в тепловой модели последовательно с $R\theta_{j-p}$ включаются тепловые сопротивления между светодиодом и теплоотводом $R\theta_{p-h}$ и теплоотводом и окружающей средой $R\theta_{h-a}$ (рис.1), а результирующее тепловое сопротивление имеет вид:

$$R\theta_{j-a} = R\theta_{j-p} + R\theta_{p-h} + R\theta_{h-a} \quad (2)$$

Если на теплоотводе установлены несколько светодиодов, то эквивалентная тепловая схема будет иметь вид, показанный на рисунке 2. При этом результирующее тепловое сопротивление будет вычисляться по формуле для параллельного соединения резисторов:

$$\frac{1}{R\theta_{(j-h)\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R\theta_{(j-h)i}} \quad (3)$$

В случае эквивалентных условий теплопередачи каждого светодиода формула (3) может быть упрощена:

$$R\theta_{(j-h)\Sigma} = \frac{R\theta_{(j-h)1}}{n} \quad (4)$$

Ориентировочные величины тепловых сопротивлений $R\theta_{p-h}$ и $R\theta_{h-a}$ в ряде случаев можно найти в статьях по применению производителей светодиодов. Однако на практике достоверные значения можно получить лишь в результате натурного моделирования, измеряя температуры теплоотводящего основания светодиода и всех остальных компонентов системы обеспечения теплового режима. Зная температуру окружающей среды и рассеиваемую прибором мощность, по формуле (1) можно вычислить соответствующие тепловые сопротивления. Не смотря на трудоемкость такого моделирования, его результатами можно пользоваться в дальнейшем для тепловых расчетов любых светотехнических систем, в которых используется аналогичная технология монтажа светодиодов, материалы и конфигурация элементов теплоотвода.



Рисунок 1

Последовательность теплового расчета

Исходными данными для расчетов являются максимальные температуры перехода T_{j_max} и окружающей среды T_{a_max} . Если тепловая система находится в замкнутом объеме, то в качестве T_{a_max} необходимо брать температуру внутри этого объема. Для ее определения можно воспользоваться методиками, которые приводятся во многих справочниках конструкторов РЭА. В качестве T_{j_max} рекомендуется взять максимальную температуру перехода из технической документации на светодиодную лампу, умноженную на коэффициент запаса K_T . Это позволит в реальных условиях снизить вероятность перегрева кристалла и обеспечить требуемый ресурс работы светодиодной лампы. Значение коэффициента K_T обычно выбирают равным 0,7...0,8.

По заданным значениям температуры перехода T_{j_max} и окружающей среды T_{a_max} определяется максимально допустимое результирующее тепловое сопротивление переход - окружающая среда:

$$R\Theta_{(j-a)\Sigma} = \frac{T_{j_max} - T_{a_max}}{P_d}, \quad (5)$$

где P_d – рассеиваемая мощность светодиодной лампы или кластером. Её значение можно определить по формуле:

$$P_d = I_f \cdot U_f, \quad (6)$$

где I_f и U_f – соответственно номинальные прямой ток и прямое напряжение на светодиодной лампе. Формула (6) не учитывает КПД по излучению светового потока, поэтому значение P_d получается с небольшим запасом.

Следующий шаг – определение теплового сопротивления радиатора $R\Theta_{h-a}$. При этом предполагается, что величины $R\Theta_{j-p}$ и $R\Theta_{p-h}$ известны ($R\Theta_{j-p}$ указано в технической документации на прибор, а $R\Theta_{p-h}$ берется из справочников или определяется экспериментально при моделировании).

$$R\Theta_{(h-a)} = R\Theta_{(j-a)\Sigma} - R\Theta_{(j-p)} - R\Theta_{(p-h)} \quad (7)$$

Если предполагается использовать стандартный радиатор, то величину $R\Theta_{h-a}$ можно найти в технической документации на него. В случае применения нестандартных теплоотводов, для вычисления $R\Theta_{h-a}$ можно воспользоваться методиками, которые приводятся в справочниках конструкторов РЭА или специализированными программами [2].

Пример простого теплового расчета

В качестве примера рассмотрим расчет теплоотвода для оценочной платы XLD-L-003 светодиодной лампы Cree XLampTM 7090 (рис. 3). Эта плата включает в себя светодиодную лампу белого цвета свечения типа XL7090WHT-L100 с типовым световым потоком 60...65 Лм при токе 350 мА и драйвер, обеспечивающий стабилизацию рабочей точки лампы. Плата изготовлена из фольгированного стеклотекстолита. Компоненты установлены с одной стороны печатной платы, противоположная сторона имеет металлизацию по всей площади для отвода тепла. Передача тепла от светодиодной лампы к металлизации платы осуществляется за счет переходных отверстий, расположенных непосредственно под теплоотводящим основанием прибора.

Хотя с точки зрения отвода тепла монтаж светодиодной лампы на стеклотекстолитовую печатную плату не является оптимальным, в ряде случаев это допустимо, поскольку позволяет создавать недорогие решения при мелкосерийном производстве.

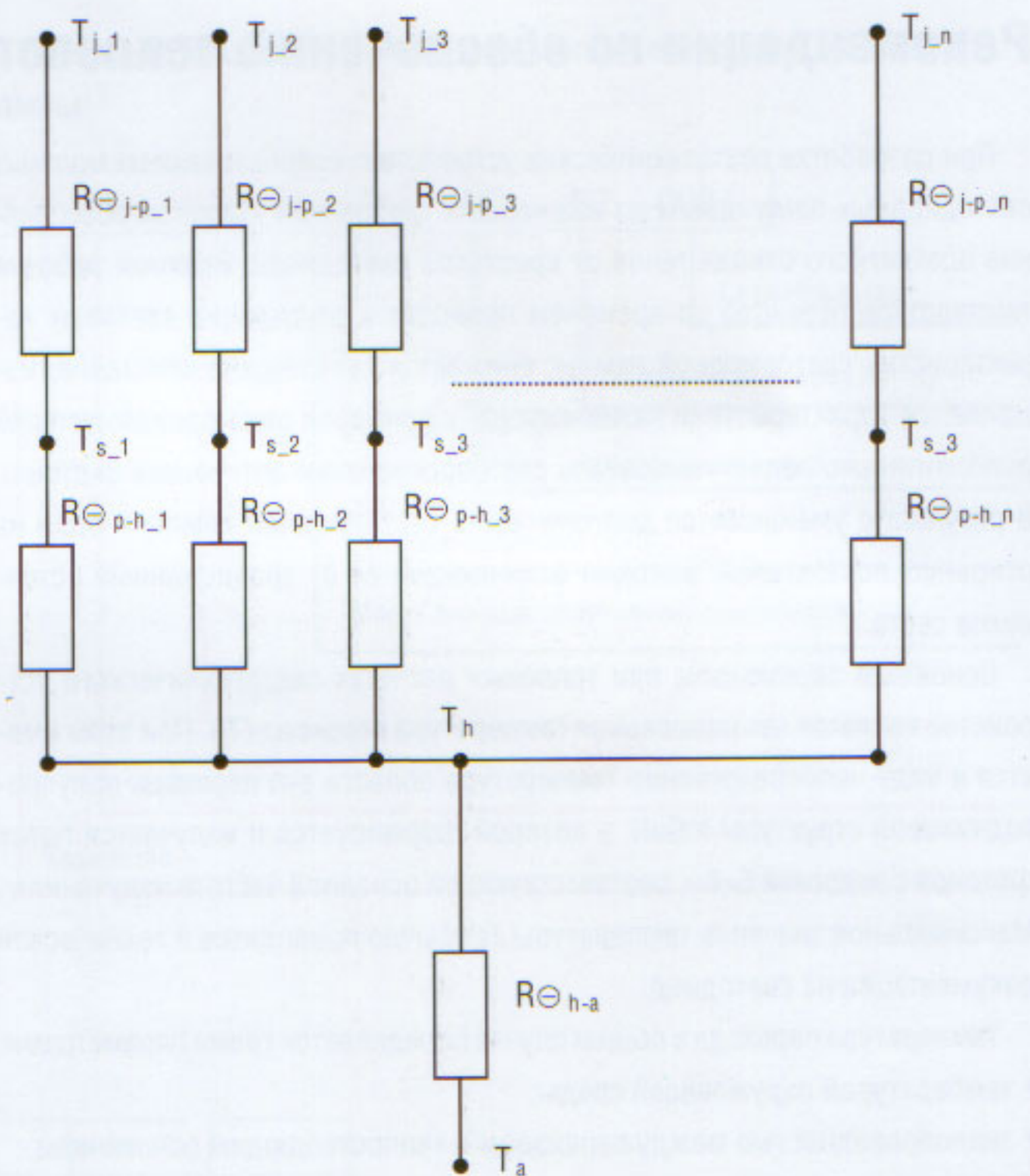


Рисунок 2

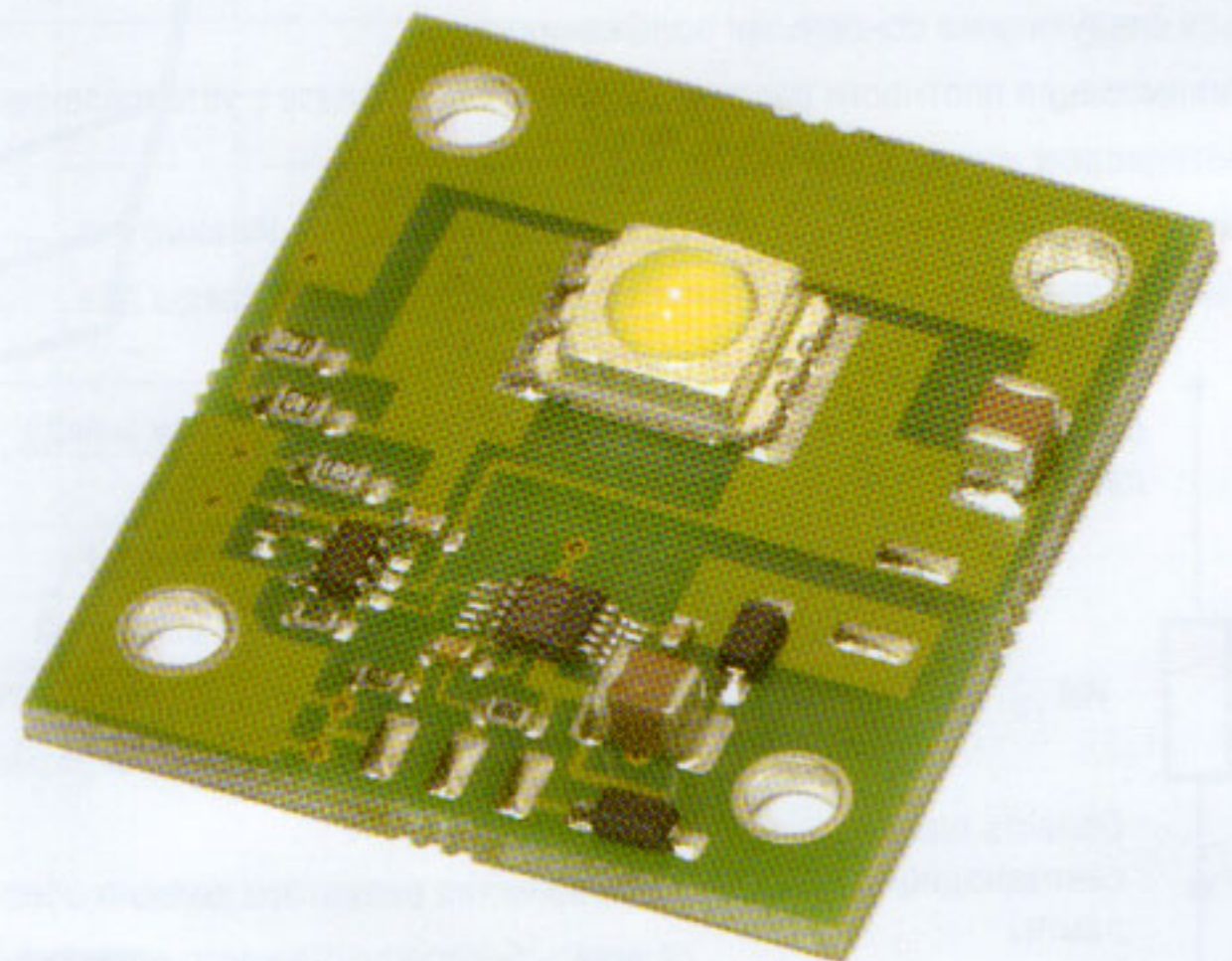


Рисунок 3

Рассчитаем максимальную рабочую температуру окружающего воздуха при условии естественного конвекционного охлаждения.

- Максимальная температура перехода по технической документации Cree составляет 125°C. С учетом коэффициента запаса 0,8 выбираем максимальную рабочую температуру перехода $T_{j_max} = 100^\circ\text{C}$.
- Номинальный прямой ток через светодиодную лампу $I_f = 350$ мА, прямое напряжение $U_f = 3,43$ В. По формуле (6) рассчитываем рассеиваемую мощность, она равна 1,20 Вт.
- Тепловое сопротивление $R\Theta_{j-p}$ указано в технической документации на прибор, $R\Theta_{j-p} = 17^\circ\text{C/Вт}$. Тепловое сопротивление $R\Theta_{p-h}$ можно определить, измерив температуры теплоотводящего основания светодиодной лампы и металлизации обратной стороны платы. Для XLD-L-003 $R\Theta_{p-h} = 5,3^\circ\text{C/Вт}$.

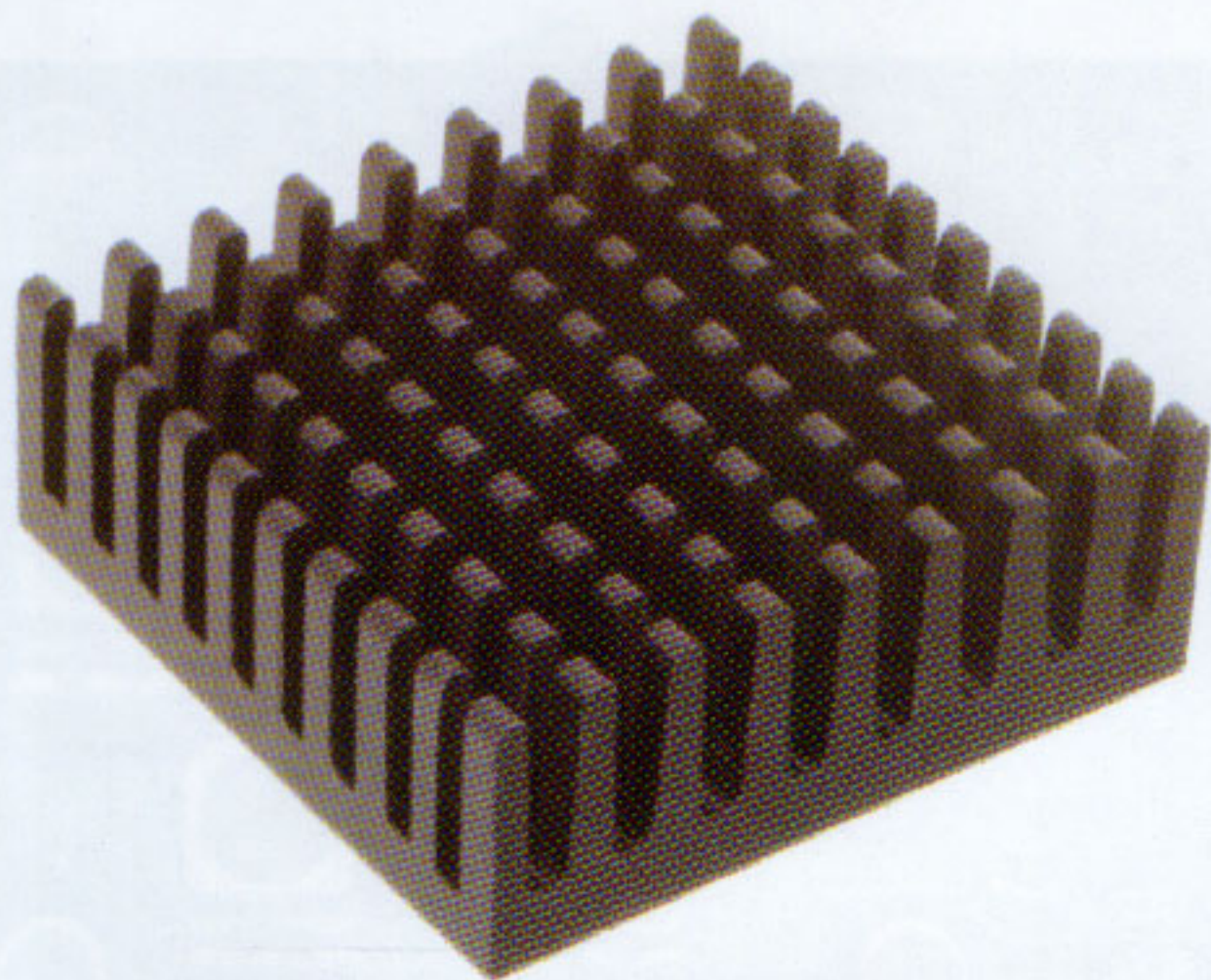


Рисунок 4

- В качестве теплоотвода выбираем стандартный радиатор для BGA корпусов, например 2519B производства компании Aavid Thermalloy (рис.4). Его размеры 34,5x31,4x15,6 мм, тепловое сопротивление $R\Theta_{h-a}=19,70\text{C/Вт}$ при условии естественной конвекции.
- По формуле (2) определяем результирующее тепловое сопротивление, $R\Theta_{j-a}=17+5,3+19,7=42\text{C/Вт}$.
- Максимальная рабочая температура окружающего воздуха определяется из выражения (5):

$$T_{a_max} = T_{j_max} - R\Theta_{(j-a)} \cdot P_d = 100 - 42 \cdot 1,20 = 49,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Для проверки теплового расчета были проведены экспериментальные измерения температур теплоотводящего основания светодиодной лампы T_p и ребер на периферии радиатора T_h . Результаты измерений и расчетов результирующего теплового сопротивления приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что результат измерения теплового сопротивления $R\Theta_{j-a}$ хорошо согласуются с расчетным значением.

Использование печатной платы на алюминиевом основании позволяет значительно уменьшить размеры радиатора. На рисунке 5 показан источник света XLD-AL-004, аналогичный по функциональным возможностям XLD-L-003, но выполненный на печатной плате с алюминиевым основанием толщиной 1,5мм. Такая конструкция обеспечивает тепловое сопротивление $R\Theta_{p-h}=0,9\text{C/Вт}$, что позволяет значительно улучшить передачу тепла

Таблица 1.

$T_a, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_p, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_h, \text{ } ^\circ\text{C}$	$R\Theta_{j-p}, \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$	$R\Theta_{p-a}, \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$	$R\Theta_{j-a}, \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$
19	50	43	17	25,8	42,8

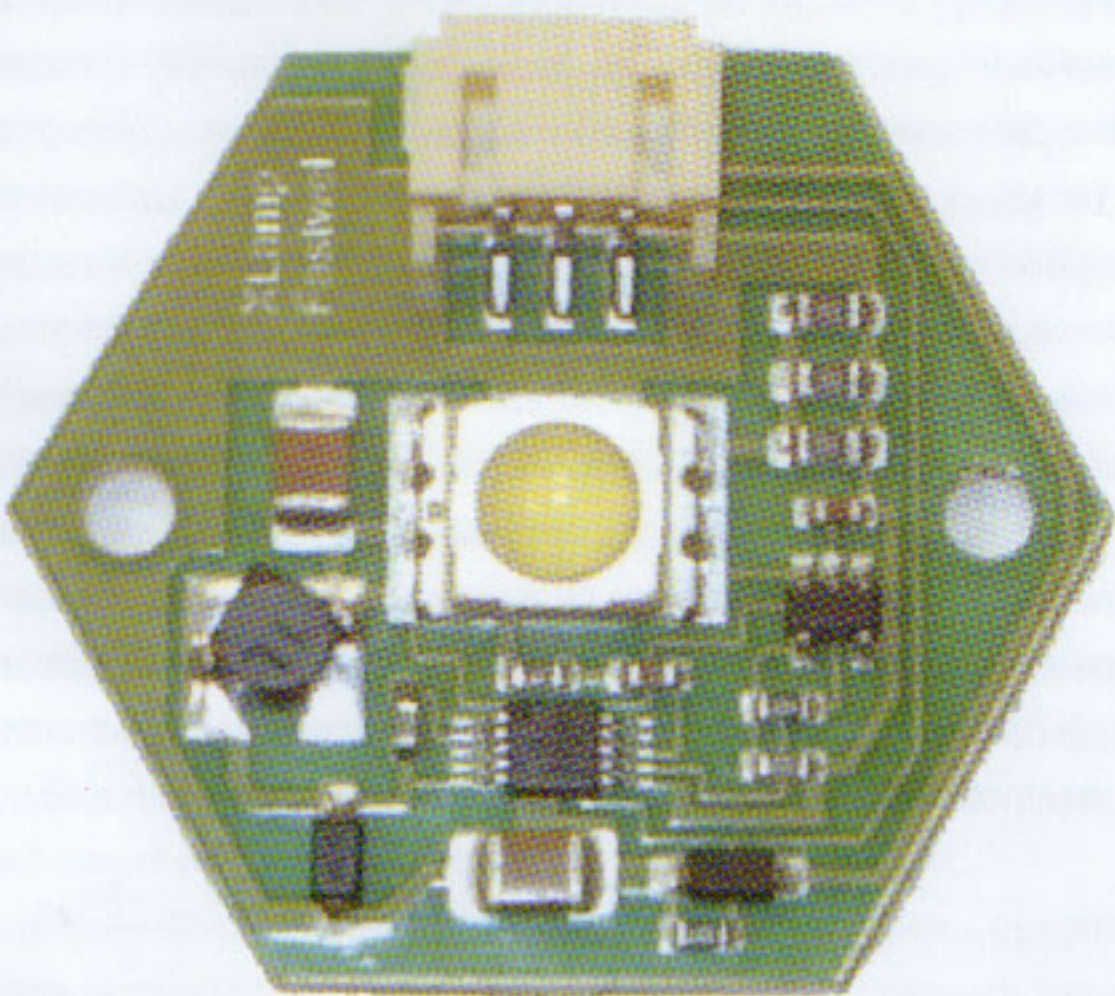


Рисунок 5

от светодиодной лампы к радиатору. Тепловое сопротивление платы – окружающая среда без внешнего радиатора составляет около $42 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$. Если использовать радиатор из приведенного выше примера, то максимальная температура окружающей среды для XLD-AL-004 составит

$$T_{a_max} = T_{j_max} - R\Theta_{(j-a)} \cdot P_d = 100 - 37,6 \cdot 1,20 = 54,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

На практике часто требуется выбрать радиатор или определить конструкцию корпуса светильника с учетом обеспечения теплового режима при заданной максимальной температуре окружающего воздуха T_{a_max} . В этом случае целью расчета является определение теплового сопротивления радиатора $R\Theta_{h-a}$ по формуле (7). Как следует из (7), снижение теплового сопротивления радиатора, а, следовательно, и его размеров, возможно только за счет уменьшения слагаемых $R\Theta_{j-p}$ и $R\Theta_{p-h}$. Монтаж светодиодной лампы на алюминиевую печатную плату практически исчерпывает возможности снижения $R\Theta_{p-h}$. Величина $R\Theta_{j-p}$ определяется конструкцией светодиода. В таблице 2 приведены тепловые характеристики светодиодных ламп различных производителей. До недавнего времени конструкции светодиодных ламп не позволяли получать $R\Theta_{j-p}$ ниже 13C/Вт (LXHL-PW09, Luxeon®), причем указанная серия LXHL-PW09 при монтаже на печатную плату требует приклеивания и электрической изоляции теплоотводящего основания с помощью эпоксидного компаунда, что реально увеличивает тепловое сопротивление до 17C/Вт .

Огромное влияние на надежность полупроводникового источника света и габариты теплоотвода оказывают тепловое сопротивление и максимальная температура перехода. Например, перегрев платы XLD-AL-004 (рис. 5) относительно окружающего воздуха составляет около 500 (без внешнего радиатора). При установке на эту плату лампы XL7090 (17C/Вт) температура перехода составляет $92\text{ } ^\circ\text{C}$ или 74% от максимальной (при $T_a=20\text{ } ^\circ\text{C}$), для

Таблица 2. Тепловые характеристики светодиодных ламп различных производителей

Производитель	Серия	Ном. прямой ток, мА	Тепловое сопротивление переход-корпус, $^\circ\text{C/Вт}$	Максимальная температура перехода, $^\circ\text{C}$
Luxeon®	LXHL-BW02	350	15	125
Nichia Corp.	NCCW023S-P12	350	17	100
Cree®	XL7090WHT	350	17	125
Cree®	XR7090WHT	350	8	145

XR7090 (8°C/Вт) - 81°C или 56% соответственно. Во втором случае имеется существенный запас по температуре перехода, что не только снижает требования к теплоотводу, но и повышает эксплуатационную надежность.

При тепловых расчетах кластеров на основе светодиодных ламп можно использовать рассмотренную выше методику и результаты моделирования тепловых сопротивлений. На рисунках 6 и 7 показаны кластер из 7 светодиодных ламп XL7090 на стеклотекстолитовой печатной плате и светильник на основе кластера из 42 XL7090 на алюминиевой печатной плате соответственно. Для обоих кластеров суммарное приведенное тепловое сопротивление $R_{\theta_{(h-a)}\Sigma}$ вычисляется по формуле (4), при этом тепловые сопротивления для одиночных светодиодных ламп можно взять из приведенных выше примеров расчета. Тогда для кластера, состоящего из n светодиодных ламп, тепловое сопротивление радиатора находится по формуле:

$$R_{\theta_{(h-a)}\Sigma_{LED}} = R_{\theta_{(j-a)}\Sigma} - R_{\theta_{(j-p)}\Sigma} - R_{\theta_{(p-h)}\Sigma} = \frac{T_{j_max} - T_{a_max}}{nP_o} - \frac{R_{\theta_{(j-p)}} + R_{\theta_{(p-h)}}}{n} \quad (10)$$

Например, если задана максимальная температура окружающего воздуха +50°C, то для охлаждения рассматриваемых кластеров получаем соответствующие тепловые сопротивления радиаторов:

$$R_{\theta_{(h-a)}\Sigma_{7LED}} = \frac{100 - 50}{7 \cdot 1,2} - \frac{17 + 5,3}{7} = 2,76 \text{ °C/Вт} \quad (11)$$

$$R_{\theta_{(h-a)}\Sigma_{42LED}} = \frac{100 - 50}{42 \cdot 1,2} - \frac{17 + 0,9}{42} = 0,57 \text{ °C/Вт} \quad (12)$$

Тепловому сопротивлению (11) соответствует радиатор № 63135 (AAVID THERMALLOY) размерами 54x80x44 мм с площадью охлаждающей поверхности 629,4 см². По техническим данным производителя, при рассеиваемой мощности 8,4 Вт перегрев радиатора составляет 30,6°C. Если бы кластер был выполнен на алюминиевой печатной плате, то размеры радиаторов можно было бы уменьшить до 54x54x44 мм.

Стандартные радиаторы, соответствующие тепловому сопротивлению (12), имеют размеры меньше, чем размер кластера. Поэтому, исходя из требований конструкции, применен радиатор № 62725 (AAVID THERMALLOY) размерами 247x247x58 мм с площадью охлаждающей поверхности 2481,6 см². По техническим данным производителя, при рассеиваемой мощности 50,4 Вт перегрев радиатора составляет 27,7°C (тепловое сопротивление 0,4°C/Вт).

Мы рассмотрели общий подход к проектированию систем обеспечения теплового режима светодиодных ламп. На практике часто приходится сталкиваться с более трудными задачами, связанными с необходимостью одновременно удовлетворять конструктивным и тепловым требованиям. Однако

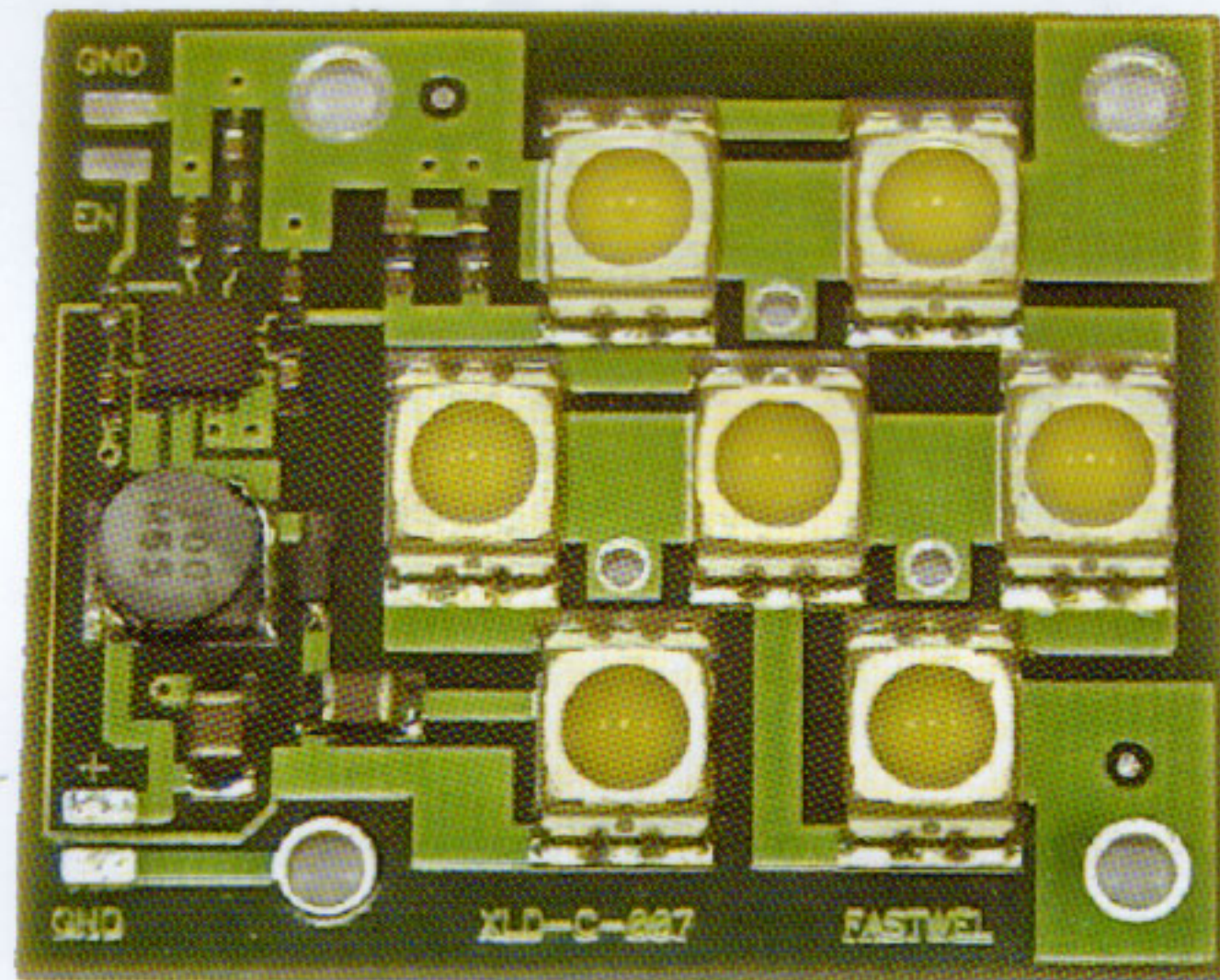


Рисунок 6

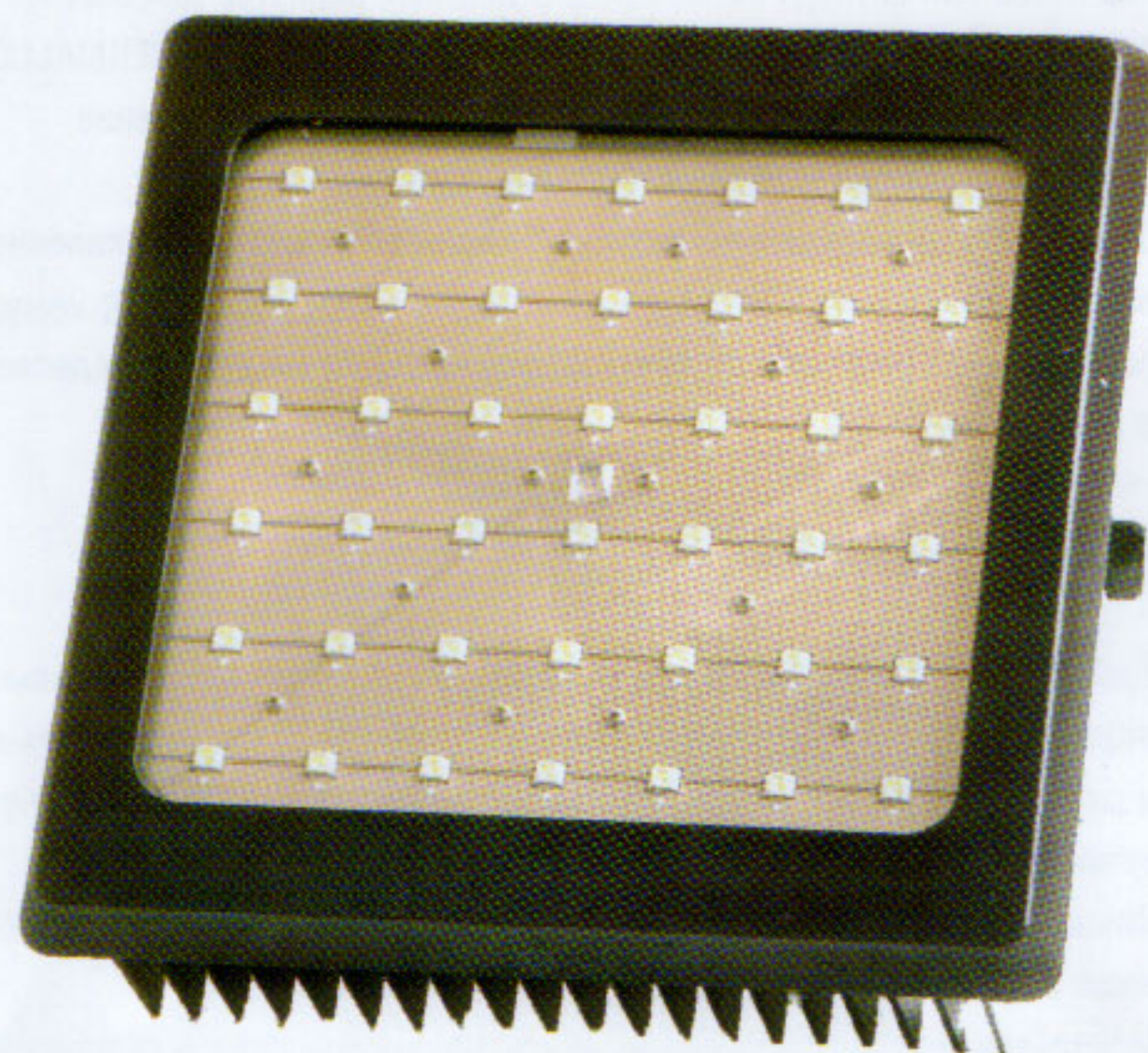


Рисунок 7

при их решении всегда необходимо помнить, что только правильный выбор тепловых режимов полупроводниковых источников света позволит в полной мере максимально использовать их основные преимущества – долговечность и эффективность.