

Управление тепловым режимом светодиодных ламп

Сотрудники Panasonic Corporation Lighting Company А. Мотойа, М. Каи, Й. Манабэ и С. Шидэ провели исследование, чтобы выяснить, изменение каких параметров имеет наибольшее влияние на тепловой режим светодиодных ламп.

Экологическая ситуация на планете привела к тому, что люди во всем мире стали заменять обычные осветительные приборы на высокоэффективные источники света. Правительства Австралии и ЕС в 2010 г. запретили продажу традиционных ламп накаливания.

Качество обычных источников света (флуоресцентных и галогеновых ламп) за 30 прошлых лет заметно улучшилось. В то же время за последнее десятилетие возросло качество белых светодиодов. Поскольку светодиоды потребляют мало электроэнергии и дольше служат, они вполне могут прийти на смену лампам накаливания и флуоресцентным лампам в светофорах и светосигнальных приборах и автомобильных фарах. Отрасли, занимающиеся производством источников света, разрабатывают и выпускают все новые и новые белые светодиоды, благодаря чему их применение в системах освещения расширяется.

В двух словах светодиодная лампа делается следующим образом: кристалл светодиода монтируется на печатную плату и затем герметизируется эпоксидным компаундом с люминофором. В результате получается светодиодный модуль. При подаче электрического напряжения примерно 40% потребляемой мощности преобразуется в белый свет, а 60% — в тепло. Избыточное тепло напрямую влияет как на кратковременную, так и на долгосрочную функциональность светодиода. В первом случае это изменение световой отдачи, во втором — ускоренное снижение светового потока и, таким образом, сокращение срока эксплуатации.

На T_j (температура перехода) светодиода влияют потребляемый ток, система тепловых характеристик и температура среды. Чем выше ток, тем больше генерируется тепла. Чтобы поддерживать расчетную эффективность, светоотдачу и срок службы, тепло со светодио-

да надо отводить. Управление тепловым режимом — это принципиально важная задача.

В целях поиска подходящей структуры управления тепловым режимом для светодиодных ламп при помощи компьютерного CFD-моделирования и численных расчетов было проделано следующее: определено «узкое место» — проблемные элементы теплоотвода; проанализирован тепловой процесс; рассчитаны проектные характеристики проблемных элементов. Принцип проектирования выбирался исходя из желаемых конечных характеристик лампы.

Управление тепловым режимом модифицированных светодиодных ламп

Начальной точкой анализа и проектирования методом моделирования является установление функциональных связей теплового процесса и проектных характеристик. Существует три способа теплопередачи — проводимость, излучение и конвекция. Связь между ними и проектными характеристиками показана в таблице. При изменении проектных характеристик соответственно меняется и каждый способ.

Под теплопроводностью мы подразумеваем передачу тепла из одного участка тела другому путем обмена кинетической энергией между его атомами. Тепловой поток внутри материала или между веществами пропорционален градиенту температуры и сечению проводящего канала. Конвекция — это перенос теплоты в жидкости или газе. Количество тепловой энергии при конвекции пропорционально площади поверхности и градиенту температуры между поверхностью и текучей средой. Излучение — это испускание электромагнитных волн с поверхности тела. Энергия излу-

чения пропорциональна площади поверхности и ее излучательной способности. Поэтому для улучшения отвода тепла очень важно анализировать температурные процессы. Именно анализ позволит правильно выбрать проектные характеристики.

Концепция проекта типовой модифицированной светодиодной лампы

Перед тем как приступить к созданию концепции проекта, необходимо определить целевые технические характеристики лампы. В нашем случае это:

- световой поток >560 лм;
- потребляемая мощность <7,6 Вт (светоотдача лампы >75 лм/Вт);
- вес <100 г;
- улучшенный дизайн.

Указанный выше световой поток практически равен 40-Вт лампе накаливания. Чем больше возрастает T_j , тем сильнее падает световая отдача кристалла светодиода. Для получения целевой светоотдачи в 75 лм/Вт очень важно должным образом управлять показателем T_j , чтобы избежать избыточного перегрева. Если говорить коротко, управление тепловым режимом — это ключевой подход к получению целевых технических характеристик.

Прежде чем оценить характеристики лампы при помощи реального прототипа, весьма полезно использовать инструментальный моделирования для анализа технической осуществимости. На рис. 1 показана расчетная модель, используемая в нашем случае. Кристалл светодиода установлен на подложке, находящейся на модульной пластине. Сама модульная пластина установлена на поверхность корпуса. Электронная часть — драйвер светодиода — находится внутри корпуса. Кристалл светодиода в CFD-моделировании и числовых расчетах играет роль основного источника тепла. На основе данной модели построена схема теплообмена светодиодной лампы (рис. 2). Значения теплового сопротивления могут быть вычислены путем подстановки температурных показателей, рассчитанных в CFD-модели, в тепловую схему.

Сравнение значений должно указать на области, которые необходимо усовершенствовать для лучшей передачи тепла. На рис. 3 тепловая энергия с кристалла светодиода передается в основном, на подложку модульную пластину и корпус.

Таблица. Подход к управлению тепловым режимом и тепловым процессом

| | Площадь поверхности | Площадь сечения | Теплопроводность | Тепловое сопротивление | Излучательная способность |
|--------------|---------------------|-----------------|------------------|------------------------|---------------------------|
| Проводимость | | • | • | | |
| Излучение | • | | | | • |
| Конвекция | • | | | • | |



Рис. 1. Моделирование светодиодной лампы

В конце концов она уходит в воздушную среду с поверхности корпуса. В первую очередь необходимо найти проблемный с точки зрения передачи тепла элемент этой тепловой схемы. Эффективность преобразования энергии электрической цепи в данном случае составляет 86%.

В результате при 7,6 Вт установленной потребляемой мощности, подаваемой на светодиодную лампу, 6,5 Вт будет потребляться кристаллом светодиода, 68% — преобразовываться в тепловую энергию, а 32% — в световую.

Это значит, что 4,51 Вт «исчезают» в виде тепловых потерь на кристалле светодиода, который является «источником тепла» CFD-модели. Зависимость между T_p , T_a (окружающая температура +25 °С), Q (тепловая энергия 4,51 Вт) и R_t (общее тепловое сопротивление между T_j и T_a) показана в уравнении (1). $T_j = +100$ °С, величина установлена с учетом гарантии качества кристалла светодиода.

$$\begin{aligned} T_j - T_a &\geq Q \times R_t; \\ 75 &\geq 4,51 \times R_t; \\ 16,63 &\geq R_t. \end{aligned} \quad (1)$$

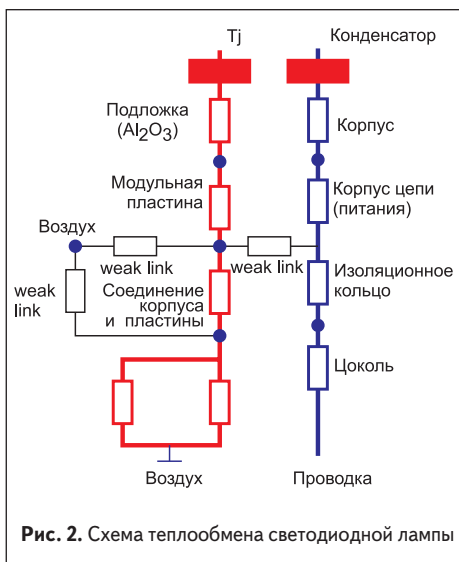


Рис. 2. Схема теплообмена светодиодной лампы

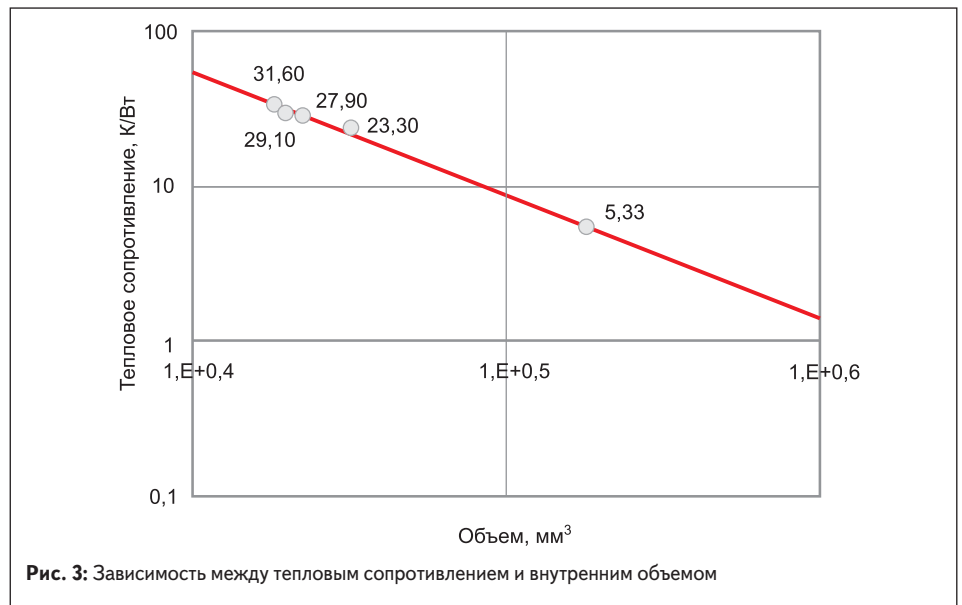


Рис. 3. Зависимость между тепловым сопротивлением и внутренним объемом

При использовании уравнения (1) с указанными выше значениями показателей T_p , T_a и Q было рассчитано значение $R_t \leq 16,63$ К/Вт. Эта величина — граничное значение для получения целевых характеристик этой лампы. Уравнение (2) показывает детальную структуру R_p , R_a и R_b , которые представляют собой величины теплового сопротивления подложки и модульной пластины. R_{air} — один из зазоров между модульной пластиной и корпусом. R_d — одна из областей между поверхностью корпуса и окружающей средой.

$$R_t = R_a + R_b + R_{air} + R_d. \quad (2)$$

Для решения уравнений (1) и (2) R_a , R_b , R_{air} и R_d исследованы при помощи CFD-моделирования и числовых расчетов определенных первичных проектов по прототипам.

Согласно подсчетам $R_a = 2,08$; $R_b = 0,04$; $R_{air} = 2,75$; $R_d = 16,0$ К/Вт. На этой стадии, с учетом механизма передачи тепла на каждом элементе теплового сопротивления, показатели R_a , R_b и R_{air} зависят в основном от свойств материала (т. е. теплопроводности объекта в целом). Таким образом, если только не производить замену материала, обычно сложно изменить тепловое сопротивление R_a , R_b и R_{air} .

С другой стороны, R_d зависит не только от свойств материала корпуса, но и от любых условий на его поверхности, поскольку R_d определяется на границе между твердым телом и газом. Более того, коэффициент показателя R_d — самая большая величина среди других в уравнении (2), это означает, что регулирование значения R_d было бы наиболее эффективным способом управления величиной R_t без замены материала корпуса. Тогда предположим, что значения R_a , R_b и R_{air} — величины постоянные, как было отмечено ранее. Расчетное значение $R_d = 11,76 \geq R_b$ используемое в уравнении (3). Таким образом, если величина R_d меньше, чем 11,76 К/Вт, значение T_j может оставаться ниже +100 °С (максимально допустимая температура). Критическая величина значения $R_d = 11,76$ была здесь определена

в качестве целевой. Ее требуется понизить от 16,0 начального пробного варианта до 11,76 целевого значения.

$$\begin{aligned} 16,63 &\geq 4,87 + R_d; \\ 11,76 &\geq R_d. \end{aligned} \quad (3)$$

Второй по важности шаг для эффективного управления тепловым режимом корпуса лампы — регулирование величины T_p . Тепловое сопротивление корпуса R_d зависит от внутреннего объема корпуса (рис. 3). При внутреннем объеме корпуса, равном 42,5 мм³, тепловое сопротивление достигает значения 11,7 К/Вт. Однако такой объем нас не устраивает, поскольку значительно превышает габариты аналогичной лампы накаливания, которая использовалась до этих пор. Поэтому для понижения величины значения R_d в качестве третьего шага необходим другой подход.

В действительности, как показано на рис. 4, обнаружено, что показатель R_d состоит из двух элементов: конвекционных (R_c) и излучательных (R_i). R_c и R_i выводятся из уравнений (4–6).

$$R_d = 1/(1/R_c + 1/R_i); \quad (4)$$

$$R_c = 1/(A \times h_c), R_r = 1/(A \times h_r); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} h_c &= 2,51 C \times [(T_w - T_\infty)/L]^{0,25}, \\ h_r &= \varepsilon \times 5,65 \times 10^{-8} (T_w^2 + T_\infty^2)(T_w + T_\infty). \end{aligned} \quad (6)$$

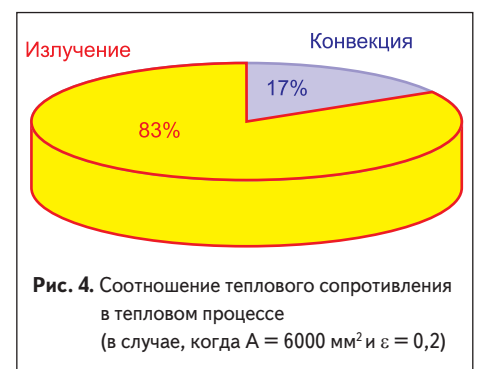


Рис. 4. Соотношение теплового сопротивления в тепловом процессе (в случае, когда $A = 6000$ мм² и $\varepsilon = 0,2$)

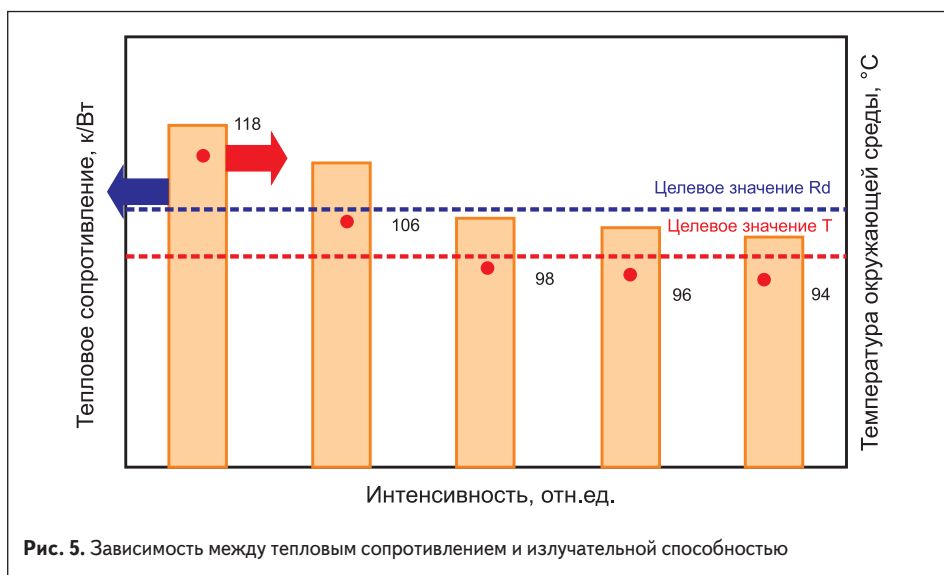



Рис. 5. Зависимость между тепловым сопротивлением и излучательной способностью

Здесь h_c — коэффициент конвективности теплоотдачи [Вт/м²К]; h_r — коэффициент теплоотдачи излучением, выведенный из закона Планка [Вт/м²К]; $C = 0,55$; L — длина; $T_\infty = T_{air}$ (T воздуха); T_w — T поверхности теплоотвода; ϵ — излучательная способность; A — площадь поверхности.

Площадь поверхности (A) установлена равной 6000 мм², как типичная и желаемая величина. Излучательная способность поверхности корпуса равна 0,2 (алюминий без примесей). Результаты представлены на рис. 4. Значение R_t рассчитано для 83% общего теплового сопротивления. Результаты подтверждают эффективность увеличения из-

лучающей поверхности корпуса лампы для снижения показателя R_d .

Эффект уменьшения R_d ожидается при изменении характеристик корпуса лампы. На рис. 5 показана зависимость R_d от излучательной способности поверхности корпуса лампы (излучательная способность повышена с 0,2 до 1,0). При возрастании излучательной способности R_d уменьшается. Также приведен показатель T_j , зависящий от излучательной способности. В случае, когда значения R_d и T_j удовлетворяют своим целевым величинам ($R_d = 11,76$ К/Вт, $T_j = +100$ °С), обнаружено, что излучательная способность должна быть выше 0,8. В качестве последнего шага авторы применили «анодирование поверхности» для повышения



- Высокие эксплуатационные характеристики, лм/Вт
- Легкий вес, г
- Малый размер

Рис. 6. Светодиодный продукт был спроектирован с хорошим управлением тепловым режимом

излучательной способности с 0,2 до 0,8 и на завершающем этапе создали точный прототип. В результате измерений температуры на этом прототипе было подтверждено, что значение T_j достигает +98 °С при излучательной способности 0,8, что не превышает границу в +100 °С.

Наряду с описанным была успешно разработана модифицированная светодиодная лампа малого размера (рис. 6).

Поиск подходящих структур, управляющих тепловым режимом, для модифицированных светодиодных ламп происходил в четыре этапа, описанных выше и основанных на результатах CFD-моделирования. Такой подход может также применяться при разработке других светодиодных приборов. Общая тенденция развития ведет к тому, что светодиодная продукция в будущем заменит лампы большой мощности, такие как металлокерамические галогенные. Чем больше электроэнергии подается для получения большей яркости, тем острее встает проблема теплоотвода. Поэтому управление тепловым режимом будет становиться все более актуальным. ●

Примечание. Оригинал статьи опубликован на сайте www.led-professional.com.