

Статья посвящена рассмотрению вопросов отвода тепла от кристалла твердотельного источника света. Предложена программа позволяющая автоматизировать расчет величины теплоотвода, и на основании расчета предлагается выбор формы и размеров элемента охлаждения.

УДК 628.9:519.6

И. П. Карьгин, канд. техн. наук,
И. Н. Кошин, канд. техн. наук
ГОУВПО «Мордовский
государственный университет
им. Н.П. Огарева»

СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНОГО СВЕТОДИОДА

Светодиоды (СД) как источники света обладают множеством преимуществ, среди которых – энергоэффективность, экологическая безопасность, компактность конструкции и простота регулировки.

В отличие от традиционных источников света, светодиоды не излучают тепло, а проводят его в направлении от р-п перехода к расположенному на корпусе СД теплоотводу (обычно вывод светодиода или специальная металлическая пластина). Таким образом, механизм отвода тепла в атмосферу у светодиодов более сложен. Путь отвода тепла образуется множеством тепловых сопротивлений: «р-п переход – теплоотвод корпуса», «теплоотвод корпуса – печатная плата», «печатная плата – теплоотвод», «теплоотвод – окружающая среда». На рисунке 1 показаны в разрезе слои стандартного модуля IGBT, участвующие в процессе теплопередачи.

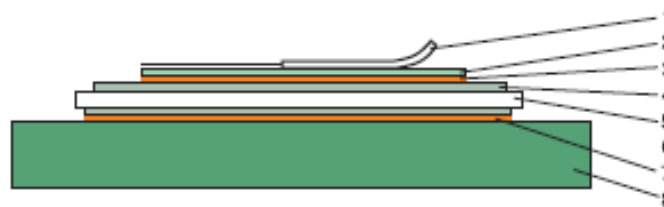


Рис. 1 - Структурная схема распределения тепла в полупроводниковом элементе.
1 - вывод чипа (Al), 2 - чип (Si), 3 - припой, 4 - металлизация (Cu), 5 - керамика (Al_2O_3),
6 - металлизация (Cu), 7 - припой, 8 - основание (Cu).

Слои 4, 5, 6 образуют так называемую DCB (Direct Copper Bonding) плату - керамическую пластину, покрытую с двух сторон медной фольгой методом диффузионного сращивания. Для корректного теплового анализа должны быть определены тепловые сопротивления каждого из показанных элементов. Модуль устанавливается на радиатор через теплопроводящую пасту, и эти элементы также должны быть учтены при расчете. Кроме того, для правильного анализа динамических тепловых процессов необходимо знать теплоемкость соответствующих слоев [1].

Вследствие этого, использование мощных светодиодов связано с потенциальной возможностью чрезмерного увеличения температуры перехода, от которой напрямую зависят надежность и световые характеристики СД. При условии соблюдения рекомендованных производителем тепловых режимов, срок службы СД может достигать 10 лет. Нарушение же теплового режима (обычно это работа с температурой перехода более $120\text{-}125^\circ\text{C}$) может привести к снижению срока службы до 10 раз. Кроме того, повышение температуры перехода приводит к снижению яркости свечения и смещению рабочей длины волны СД, что негативно влияет на качество работы СД [2].

Высокая рабочая температура р-п-перехода со временем приводит к деградации световых характеристик светодиодной лампы: снижается светоотдача кристалла, изменяются характеристики люминофора, у приборов ряда производителей снижается светопропускание оптической системы. В результате уменьшается срок службы СД-лампы – один из основных показателей, выгодно отличающий её от традиционных источников света.

Светодиодная светотехническая продукция будет высоконадежной и высококачественной только при условии обеспечения работы СД в рекомендуемых температурных условиях. Температура перехода СД будет тем ниже, чем будет ниже результирующее тепловое сопротивление «переход – окружающая среда», составляющие звенья которого перечислялись ранее. Следовательно, отправной точкой в решении рассматриваемой задачи является выбор СД, обладающего как можно более низким тепловым сопротивлением «р-п переход – теплоотвод корпуса» [3].

Основным параметром при тепловых расчётах светотехнического устройства является так называемая температура р-п-перехода [4]. При этом имеется в виду непосредственно температура области р-п-перехода полупроводниковой структуры, в которой формируется и излучается поток. Максимальное значение температуры обычно приводится в технической документации на светодиод.

Температура р-п-перехода в общем случае определяется тремя параметрами:

- температурой окружающей среды;
- теплопроводностью между р-п-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 объёма устройства. Именно эта температура будет являться температурой окружающей среды для светодиода;
- увеличение теплопроводности между радиатором и теплоотводящим основанием корпуса светодиода. Её 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 теплосъёма будет недостаточной.

Несмотря на всю очевидность рассмотренных положений, разработчики светотехнических устройств зачастую пренебрегают элементарными правилами конструирования систем обеспечения теплового режима. Для эффективного выбора метода теплоотвода, из большого спектра предлагаемых, следует использовать ту или иную тепловую модель работы СД.

Для расчета радиатора мощного светодиода воспользуемся тепловой моделью представленной в [5]. Для расчета принималось во внимание тепловое сопротивление между р-п-переходом и теплоотводящим основанием корпуса, в качестве которого выступает теплоотводящий радиатор (рис. 2).

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 $R\theta$ определяется как отношение разности температур тел к мощности P_d , рассеиваемой нагретым телом, в $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$:

$$R\theta = \frac{T_1 - T_2}{P_d} \quad (1)$$

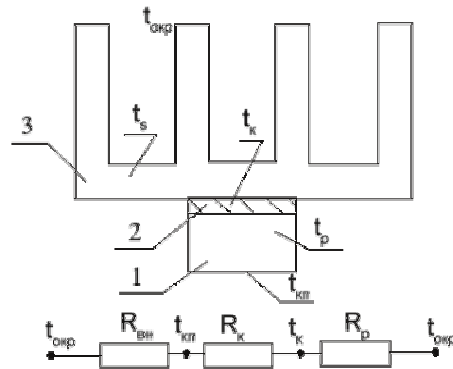


Рис. 2 - Тепловая модель радиатора

1 - элемент; 2 - область теплового контакта; 3 - радиатор $t_{окр}$ - температура окружающей среды; t_p - температура рабочей области элемента; t_s - температура основания радиатора; $t_к$ - температура в месте контакта; $t_{кп}$ - температура корпуса элемента; t_r - предельная температура рабочей области элемента; $R_{вн}$ - внутреннее тепловое сопротивление; $R_к$ - тепловое сопротивление контакта; R_p - тепловое сопротивление радиатора.

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

Если на теплоотводе установлены несколько светодиодов, то эквивалентная тепловая схема будет иметь вид, показанный на рисунке 3.

При этом результирующее тепловое сопротивление будет вычисляться по формуле для параллельного соединения резисторов:

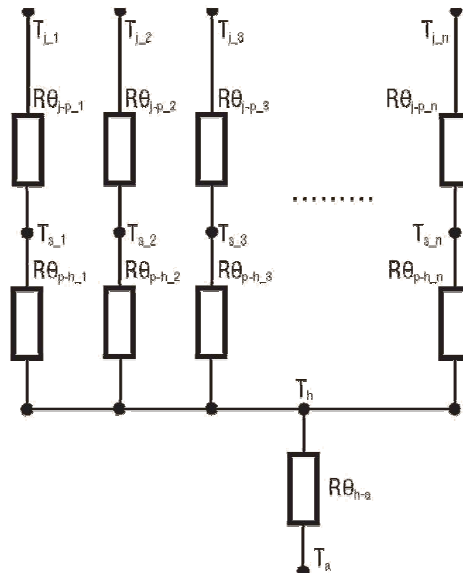


Рис. 3 - Тепловая модель твердотельного источника света, в котором на теплоотвод (радиатор) установлено несколько светодиодов

$$\frac{1}{R\theta_{(j-b)\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R\theta_{(j-b)i}} \quad (2)$$

В случае эквивалентных условий теплопередачи каждого светодиода формула (2) может быть упрощена:

$$R\theta_{(j-b)\Sigma} = \frac{R\theta_{(j-b)i}}{n}. \quad (3)$$

Ориентировочные величины тепловых сопротивлений $R\theta_{p-h}$ и $R\theta_{h-a}$ в ряде случаев можно найти у производителей светодиодов. Однако на практике достоверные значения можно получить лишь в результате натурального 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. Несмотря на трудоёмкость такого моделирования, его результатами можно пользоваться в дальнейшем для тепловых расчётов любых светотехнических систем, в которых используется аналогичная технология монтажа светодиодов, материалы и конфигурация элементов теплоотвода.

Исходными данными для расчётов являются максимальные температуры р-п-перехода $T_{j\max}$ и окружающей среды $T_{a\max}$. Если тепловая система находится в замкнутом объёме, то в качестве $T_{a\max}$ необходимо брать температуру внутри этого объёма. Для её определения можно воспользоваться методиками, которые приводятся во многих справочниках конструкторов РЭА. В качестве $T_{j\max}$ рекомендуется взять максимальную температуру р-п-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 в пределах 0,7-0,8.

По заданным значениям температуры р-п-перехода $T_{j\max}$ и окружающей среды $T_{a\max}$ определяется максимально допустимое результирующее тепловое сопротивление р-п-переход – окружающая среда:

$$R\theta_{(j-b)\Sigma} = \frac{T_{j\max} - T_{a\max}}{P_d}, \quad (4)$$

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

$$P_d = I_f U_f, \quad (5)$$

где I_f и U_f – номинальный прямой ток и прямое напряжение на светодиодной лампе соответственно.

Формула (5) не учитывает коэффициент полезного действия (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 $R\theta_{p-h}$ берётся из справочников или определяется экспериментально при моделировании):

$$R\theta_{h-a} = R\theta_{(j-a)\Sigma} - R\theta_{j-p} - R\theta_{p-h}. \quad (6)$$

Если предполагается использовать стандартный радиатор, то тепловое сопротивление $R\theta_{h-a}$ можно найти в его технической документации. В случае применения нестандартных теплоотводов, для вычисления $R\theta_{h-a}$ можно воспользоваться

методиками, которые приводятся в справочниках конструкторов РЭА или воспользоваться специализированными программами.

Исходными данными для расчётов являются максимальные температуры р-п-перехода T_{j_max} и окружающей среды T_{a_max} . Если тепловая система находится в замкнутом объёме, то в качестве T_{a_max} необходимо брать температуру внутри этого объёма. Для её определения можно воспользоваться методиками, которые приводятся во многих справочниках конструкторов РЭА. В качестве T_{j_max} рекомендуется взять максимальную температуру р-п-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. При расчете обычно исходят из температуры окружающей среды 20°C и допустимом перегреве на 80°C , т.е. нагреве тепловыделяющего элемента до 100°C .

Тогда в тепловой модели последовательно с тепловым сопротивлением между р-п-переходом и теплоотводящим основанием корпуса $R\theta_{j-p}$ включаются тепловые сопротивления между светодиодом и теплоотводом $R\theta_{p-h}$ и теплоотводом и окружающей средой $R\theta_{h-a}$. В результате чего результирующее тепловое сопротивление имеет вид:

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

На рисунке 4 показана модельная схема отвода тепла от светодиода.



Рис. 4 - Тепловая модель светодиода, установленного на радиатор

Одной из возможных мер по обеспечению нормального теплового режима ЭРЭ может стать применение радиатора, который увеличивает теплоотдающую поверхность прибора. С расчетом радиаторов в частности приходится сталкиваться при конструировании мощных усилителей различных сигналов. Для систем воздушного охлаждения широко используют ребристые и игольчато-штыревые и пластинчатые радиаторы.

В результате расчета будет выбран тип радиатора и его параметры. Расчет поэтапный и требует знание некоторых характеристик радиаторов [6].

Тепловое сопротивление радиатора

$$q = 50/\sqrt{S} \quad (8)$$

где S – площадь поверхности теплоотвода, выраженная в квадратных сантиметрах.

Отсюда площадь поверхности для искомого теплового сопротивления

$$s = (50/q)^2. \quad (9)$$

Радиатор площадью 1000 см^2 , из расчета по формуле (8), имеет тепловое сопротивление $Q = 1,6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. При допустимом перегреве 80°C получаем мощность рассеяния $80/1,6 = 50 \text{ Вт}$ [7].

Если необходимо рассеять мощность 30 Вт , при перегреве 60°C , требуемое

тепловое сопротивление $Q = 60/30 = 2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Тогда по формуле (9) определяем площадь $S = (50/2)^2 = 625 \text{ см}^2$ [7].

Если рассеиваемая мощность составляет 40 Вт, при том же перегреве на 60°C , требуемое тепловое сопротивление $Q = 60/40 = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Тогда нужна площадь радиатора $S = (50/1,5)^2 = 1111 \text{ см}^2$ [7].

Основное отличие "радиатора для светодиода" от "просто радиатора", это то, что первый, как правило, используется и как декоративный элемент конструкции, в то время как второй, обычно, скрыт внутри корпуса. Соответственно, при разработке радиатора для светодиода надо, в первую очередь, разработать эстетичный дизайн с заложенной возможностью корректировки площади поверхности (путем изменения размеров и количества элементов) и расстояния между элементами. После чего, рассчитать получившееся тепловое сопротивление и, при необходимости, провести коррекцию размеров элементов и повторный расчет.

Для корректного теплового расчета мощных светодиодов, на основе приведенной выше тепловой модели, было спроектировано программное обеспечение, позволяющее спроектировать тепловой режим и произвести расчет радиатора для выбранной модели мощного светодиода. На рисунке 5 показан интерфейс программы.

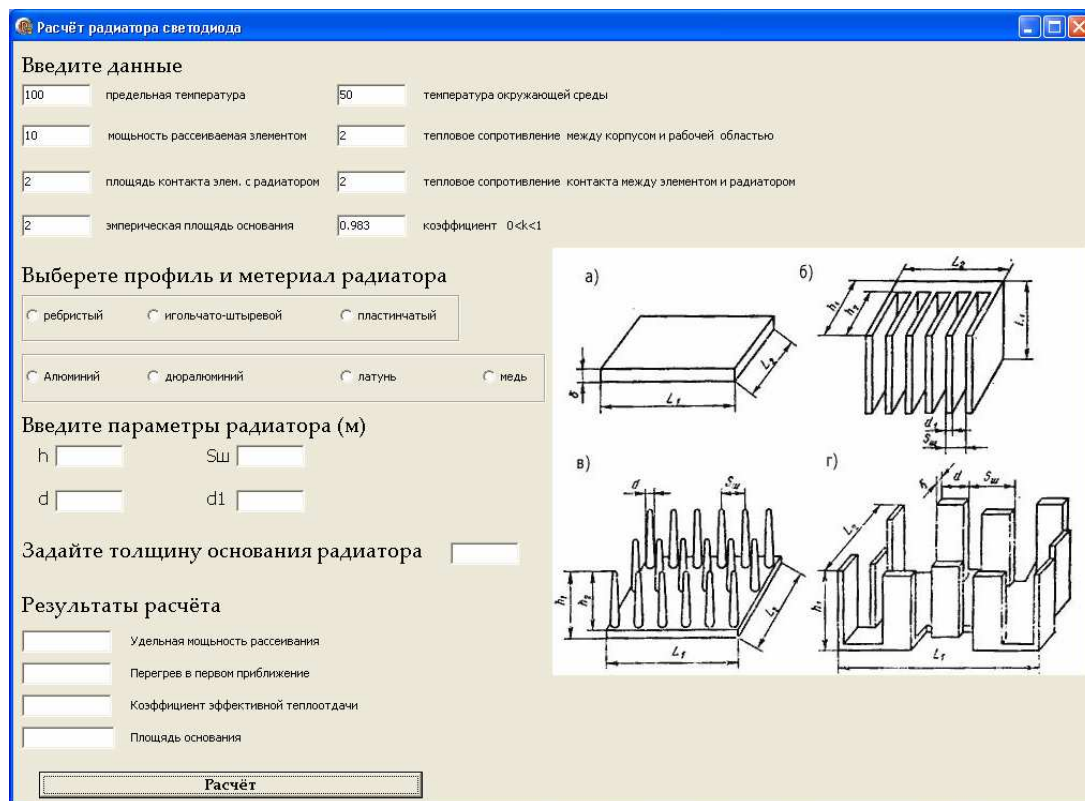


Рис. 5 - Интерфейс программы расчета радиатора мощного светодиода

В данном программном продукте учитываются значения входящие в тепловую модель представленную выше. При этом учитываются как тип радиатора, его геометрические параметры, так и материал из которого он должен быть изготовлен. Результатом расчета являются следующие выходные данные: удельная мощность рассеивания, коэффициент эффективной теплоотдачи и т.д. Предлагаемая программа предназначена для разработчиков светодиодных ламп.

На рисунке 6 представлена форма программы с расчетными данными. В качестве исходных данных вводятся следующие параметры:

- материал радиатора – алюминий;

- профиль радиатора - ребристый;
- параметры радиатора: высота (h) -0,1 м, расстояние между ребрами радиатора($S_{ш}$) – 0,002 м, толщина ребра (d1) – 0,001 м.

В результате расчета были получены следующие параметры радиатора светодиода:

- удельная мощность рассеивания – 5 Вт;
- перегрев в первом приближении – 8,3° С;
- коэффициент эффективной теплоотдачи -0,602409638554217;
- площадь основания радиатора для светодиода - 0,00180722891566265 м².

Расчёт радиатора светодиода

Введите данные

100 предельная температура 50 температура окружающей среды

10 мощность рассеиваемая элементом 2 тепловое сопротивление между корпусом и рабочей областью

2 площадь контакта элем. с радиатором 2 тепловое сопротивление контакта между элементом и радиатором

2 эмпирическая площадь основания 0.983 коэффициент $0 < k < 1$

Выберете профиль и материал радиатора

ребристый игольчато-штыревой пластинчатый

Алюминий дюралюминий латунь медь

Введите параметры радиатора (м)

h 0.1 $S_{ш}$ 0.002

d 0 d1 0.001

Задайте толщину основания радиатора 0.1

Результаты расчёта

5 Удельная мощность рассеивания

8,3 Перегрев в первом приближении

2409638554217 Коэффициент эффективной теплоотдачи

0722891566265 Площадь основания

Расчёт

а) б) в) г)

Рис. 6 - Интерфейс программы с результатами расчета

Таким образом, данная программа позволяет автоматизировать процессы расчета охлаждения твердотельных источников света. Так как проблема теплоотвода от светодиодов в настоящее время является актуальной, то программа может найти свое применение при проектировании осветительных приборов и установок на базе твердотельных источников света.

Литература:

1. Справочник. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин.- М.: Энергоатомиздат, 1984.- 480 с.
2. Коган Л. М. Дохман С. А. Техничко-экономические вопросы применения светодиодов в качестве индикации и подсветки в системе отображения информации / Л. М. Коган, С. А. Дохман. – Светотехника –1990 – №3 –289 с.
3. Коган Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган.- М.: Электронная техника, 1989.– 415 с.
4. Воробьев В. Л. Двухпереходные GaP-светодиоды с управляемым цветом свечения / В. Л. Воробьев, В. Н. Гришин.– М.: Электронная техника, 1977. – 368 с.

5. Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств / А. Полищук // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С. 42-45.

6. Полищук А. Г. Деграция светодиодов на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов / А. Г. Полищук, А. Н. Туркин // Светотехника – 2008 - №5 – С. 44-47.

7. Полищук А. Г. Вопросы выбора мощных светодиодных ламп для светотехнических применений / А. Г. Полищук // Современная электроника – 2006 - № 1 – С. 15-19.

СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО СВІТЛОДІОДА

І. П. Карьгін, І. Н. Кошін

В доповіді ставиться запитання відводу тепла від кристалла твердотілого джерела світла. Рекомендована програма, дозволяюча автоматизувати розрахунок тепловідводу, і на тій основі даються рекомендації по вибору форми та розмірів елементів охолодження.

CREATION OF COMPUTER CALCULATION MODEL OF POWERFUL LIGHT- EMITTING DIOD COOLING SYSTEM

I. P. Karygin, I. N. Koshin

The article deals with issues of heat abstraction from a crystal of a solid-state light source. The authors suggest the program to automatize calculation of heat abstraction value, and on the basis of calculation the choice of the form and the sizes of the cooling element of is offered.