УДК 628.9:519.6

А.В. Пуговкин, В.С. Степной, А.Ю. Антонова, М.А. Еремич

Энергетические характеристики светодиодов и светодиодных ламп

Рассмотрены физическая и математическая модели светодиодов и светодиодных ламп. Математической основой является система дифференциальных уравнений для балансов тепловой энергии кристалла, подложки светодиода и измерительной камеры. Моделирование позволяет исследовать тепловые режимы кристалла и подложки, оценить влияние тепловых сопротивлений различных участков. Рассмотрено также решение обратной задачи, когда из полученных экспериментальных зависимостей для средних температур кристалла, подложки и стенок измерительной камеры находятся такие параметры, как тепловые сопротивления переходов кристалл–воздух, кристалл–подложка, подложка–воздух, а также производится оценка световой и тепловой мощности светодиода.

Ключевые слова: светодиод, светодиодная лампа, математическая модель, световая мощность, тепловое сопротивление.

Лампы на основе светодиодов обладают высокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, поэтому исследования энергетических характеристик светодиодов являются важной задачей. К этим характеристикам относятся световая и тепловая мощности, коэффициент полезного действия и тепловое сопротивление. Их измерение чаще всего производится путем нахождения температур различных элементов конструкции [1, 2]. Другой важной характеристикой светодиодов является их долговечность [3]. Эти характеристики также связаны с тепловой мощностью, выделяемой светодиодом, и тепловым сопротивлением перехода кристалл–подложка.

Целью настоящей работы является разработка методов исследования тепловых параметров светодиодов и светодиодных ламп. При этом предполагается решение следующих задач:

- разработка математической модели тепловых процессов;

- разработка методов измерения тепловой и световой мощностей, теплового сопротивления;

- проведение экспериментальных исследований, сопоставление теории и эксперимента.

Рассмотрим физическую модель светодиода, в которой образец полупроводникового кристалла с теплоёмкостью C_{κ} располагается на теплоотводящей подложке с теплоемкостью C_{n} . К кристаллу подводится питающее напряжение с мощностью

$$P = U \cdot I , \tag{1}$$

где *U* – напряжение; *I* – электрический ток.

Теплообмен светодиода с окружающей средой характеризуется следующими процессами:

- светодиод излучает свет с мощностью *P*_{св};

- кристалл отдает теплоту в окружающую среду (тепловое сопротивление R₁);

- кристалл отдает теплоту подложке (тепловое R_2);

- подложка отдает теплоту окружающей среде (тепловое сопротивление R₃).

Тепловой режим светодиода можно описать с помощью математической модели, основанной на уравнениях теплового баланса.

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_{\kappa}} \cdot \left[P - P_{\rm CB} - G_1(T_1 - T_3) - G_2(T_1 - T_2) \right]; \tag{2}$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{C_n} \cdot \left[G_2(T_1 - T_2) - G_3(T_2 - T_3) \right],\tag{3}$$

где T_1 , T_2 , T_3 – средние температуры кристалла, подложки и окружающей среды, соответственно; $G_i = 1/R_i -$ коэффициент теплопередачи соответствующего перехода.

Эти уравнения должны быть дополнены начальными условиями, а именно заданием температур T_1 и T_2 при t = 0. Решения этих уравнений описывают как нестационарный, так и стационарный режимы.

Моделирование теплового режима светодиода проводилось при следующих параметрах:

 $P = 1 \text{ Br}; P_{cB} = 100 \text{ MBr}; G_1 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Br/°C}; G_2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Br/°C}; G_3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Br/°C}.$

Значение $P_{\rm cB}$ выбрано из расчета электрической мощности, потребляемой светодиодом, 1 Вт и КПД – 10%.

Полагаем, что тепловая мощность, отдаваемая светодиодом, распределяется следующим образом. Кристалл отдает 10% тепловой энергии в воздушную среду, а остальное – в подложку.

На рис. 1 представлены расчетные графики поведения температур кристалла и подложки как функции времени, полученные на основе интегрирования линейных обыкновенных дифференциальных уравнений (2) и (3), полученные с помощью пакета MathCAD. Обе зависимости имеют одинаковый характер и содержат фазу нарастания температуры и фазу стационарного режима. Кристалл нагревается быстрее и имеет более высокую температуру в стационарном режиме.



Проведенное моделирование позволяет сделать вывод о возможности решения обратной задачи. По экспериментальным зависимостям T_1 и T_2 возможно нахождение параметров G_1 , G_2 , G_3 и P_{cB} при известных значениях P и T_3 . Измерение температуры подложки целесообразно производить с помощью термопар. Для измерения средней температуры кристалла возможно применение бесконтактного метода [3, 4].

Дополнительную информацию о тепловых характеристиках светодиода можно получить, если поместить его в измерительную камеру, которая представляет собой ограниченный объем окружающей среды с теплоемкостью $C_{\rm B}$. Измерительная камера, которая ограничивает этот объем, имеет теплоемкость $C_{\rm u}$.

Мощность светодиода расходуется на тепловую и оптическую мощность. В измерительном стенде оптическая мощность нагревает стенки измерительной камеры, полученная при этом тепловая мощность может распространяться как во внешнюю среду, так и внутрь камеры. В свою очередь, тепловая энергия светодиода нагревает воздух внутри измерительной камеры, затем ее стенки. Математическую модель тепловых процессов, происходящих в измерительной камере, можно записать с помощью следующих уравнений:

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{C_{\rm B}} \cdot \left[G_3(T_2 - T_3) - G_4(T_3 - T_4) \right]; \tag{4}$$

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{C_{\rm H}} [P_{\rm CB} + G_4(T_3 - T_4) - G_5(T_4 - T_0)],\tag{5}$$

где T_4 – средняя температура стенок камеры; T_0 – температура внешней среды; G_4 – коэффициент теплопередачи между средой камеры и ее стенками; G_5 – коэффициент теплопередачи между стенками камеры и внешней средой.

Проведем моделирование при следующих условиях:

 $G_3/C_{\Pi} = 0,1 \text{ c}^{-1}; G_4/C_B = 0,6 \text{ c}^{-1}; G_5/C_{H} = 2,5 \text{ c}^{-1}; P_{CB} = 100 \text{ мBT}; T_2 = 100 \text{ °C}; T_0 = 25 \text{ °C}.$ На рис. 2 представлены графики поведения температуры воздуха в камере (T_3) и средней тем-

На рис. 2 представлены графики поведения температуры воздуха в камере (T_3) и средней температуры стенок камеры (T_4) для данных значений параметров.

Анализ полученных графиков (см. рис. 2) позволяет выделить следующие закономерности в поведении температур:

1. Обе кривые имеют одинаковый характер фаз нарастания и насыщения, поскольку получены на основе интегрирования одинаковых типов уравнений.

2. Степень нарастания температуры стенок больше, чем для воздуха. Это объясняется тем, что оптическое излучение поглощается стенками практически без задержки, в то время как тепловая энергия воздушного объема камеры нарастает медленнее.

166 НАНОЭЛЕКТРОНИКА. НАНОТЕХНОЛОГИЯ. ФОТОНИКА. ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



3. Графики температур пересекаются в некоторой точке. Положение этой точки зависит как от параметров светодиода, так и от параметров измерительной камеры.

Рис. 2. Графики зависимости температур *T*₃ и *T*₄ от времени

Проведенное моделирование показывает, что возможно решение обратной задачи, а именно по полученным экспериментальным зависимостям температур возможно нахождение параметров светодиода G_2 , P_{cB} , T_2 , КПД. При этом основной проблемой является нахождение средних значений температур T_3 и T_4 . Измерительная камера имеет определенную конфигурацию (цилиндр, сфера) и ограниченный объем. Тепловые потоки неоднородны и измеряемые температуры могут быть различны в разных точках. Для нахождения средней температуры можно применить следующие методы.

1. Стенки измерительной камеры. Многократные отражения света от стенок камеры:

- применение материала с высокой теплопроводностью (медь, золото и др.);

- расположение температурных датчиков в разных точках камеры.

2. Воздушная среда камеры. Здесь неоднородность температуры особенно высока, поскольку в воздухе сильно проявляются конвекционные механизмы. Для усреднения значений T_3 возможно применение нескольких датчиков, перемешивание воздушной массы. Кроме этого, возможно применение алгоритмов вычисления параметров G_4 , G_5 без применения температуры T_3 .

Приведенные выше рассуждения подтверждаются следующими опытами. Экспериментальная установка содержит измерительную камеру и блок сбора и обработки информации. В качестве измерительной камеры использовались медный цилиндр (масса цилиндра 1 г) и алюминиевый цилиндр (масса цилиндра 12 г). Внутри цилиндров помещались светодиод (подводимая электрическая мощность 1 Вт) и светильник (подводимая электрическая мощность 3 Вт). Температура стенок камеры и корпуса светодиода измерялась термопарами, так же контролировалась температура внешней среды.

Блок сбора и обработки информации включал в себя набор усилителей, модуль АЦП (6 каналов) и персональный компьютер, который архивировал данные и выводил их на экран в виде графиков. При включении светильника с потребляемой мощностью $P_{3n} = 3$ Вт в алюминиевом цилиндре, массой 12 г, наблюдался линейный рост температуры со скоростью 0,01 °C /с. Включение проводилось на время, равное 30 с. После этого светильник выключался и проводились измерения темпера-

ç

udox 25

тур в режиме остывания. Точность полученных результатов при известной теплоемкости камеры определяется, в основном, погрешностью термопар.

На рис. 3 показано изменение температуры камеры при кратковременном включении и выключении светодиода.



Рис. 3. График нагрева и остывания камеры для режима включения и выключения светодиода

Полученные данные можно использовать для оценки значений P_{cb} , воспользовавшись уравнениями (4), (5). Из уравнений получим выражение для световой мощности:

$$P_{\rm CB} = C_{\rm H} \left(\frac{dT_{\rm 4B}}{dt} - \frac{dT_{\rm 40}}{dt} \right), \tag{6}$$



где первый член описывает приращение температуры стенок камеры при включении питания светодиода, а второй – при его отключении.

При выводе выражения (6) было сделано следующее допущение: вторым членом уравнения (5) можно пренебречь, так как светодиодная лампа нагревается медленно по сравнению с корпусом измерительной камеры, поэтому при включении на промежуток времени до 30 с нагревание воздуха за счет тепловой энергии происходить не будет. При этом оценка для световой мощности составила $P_{cB} = 118 \text{ MBT.}$

Точность полученного результата (при известных теплоемкости камеры и температуре внешней среды) определяется, в основном, погрешностью измерения температуры. При измеренном перепаде температуры 0,3 °C и погрешности измерения температуры 0,01 °C относительная погрешность измерения световой мощности составляет 3,5%.

Для оценки тепловой мощности светодиодов применим метод калибровки измерительной камеры в стационарном режиме. Полагая $P_{\rm cB} = 0$, имеем

$$G_4(T_3 - T_4) = G_5(T_4 - T_0) = P_m.$$
⁽⁷⁾

Полученное равенство имеет следующий физический смысл. В стационарном режиме тепловая мощность, отдаваемая светодиодом, нагревает окружающую воздушную среду. Воздух в свою очередь нагревает стенки камеры, а стенки камеры отдают всю эту мощность во внешнюю среду. Измеряя T_4 и T_0 (при известном G_5), можно найти тепловую мощность $P_{\rm T}$. Таким образом, для нахождения G_5 необходимо провести калибровку. Для этого внутрь изготовленной из меди измерительной камеры массой 1 г помещается источник с известной и регулируемой тепловой мощностью. Таким источником может быть резистор мощностью 1 Вт, к которому подводится электрическая мощность $P_{\rm 3H} = U \cdot I$ от 0,2 до 1 Вт. Калибровка проводилась в следующей последовательности:

– Измерялись температуры резистора, стенки камеры и внешней среды.

- Измерялись ток и напряжение питания резистора.

Измеряемые параметры фиксировались при достижении установки стационарного режима.

- Вычислялось значение теплового сопротивления камеры.

Результаты эксперимента показывают, что тепловое сопротивление камеры зависит от подаваемой на резистор электрической мощности и принимает значения от 11,7 С°/Вт при мощности 0,2 Вт до 8,3 С°/Вт при мощности 1 Вт (рис. 4).



Эту зависимость можно использовать как калибровочную при измерении тепловой мощности и теплового сопротивления светодиодов.

Выводы

1. Математическая модель теплового режима светодиодов и светодиодных ламп позволяет исследовать влияние основных параметров (тепловые сопротивления, теплоемкости) на температурные зависимости кристалла и подложки светодиода. Это позволит регулировать отвод тепловой энергии от кристалла в подложку.

2. Из экспериментальных зависимостей температуры стенок измерительной камеры от времени при известных теплоемкости камеры и температуры внешней среды можно найти параметры светодиодов и светодиодных ламп (тепловую и световую мощность).

Работа выполнена в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ и договора № 73/10 от 15.07.2010 г. ГОУ ВПО «ТУСУР» с ОАО «НИИПП».

Литература

1. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.expertunion.ru/images/stories/files-doc-rar-001/temp-led-p1.pdf, свободный (дата обращения: 29.10.11).

2. Круглов О.В. Измерение светового потока светодиодов / О.В. Круглов, В.Н. Кузьмин, К.А. Томский [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.tkaspb.ru/razrabotka/pdf/izm_potok _svetodiod.pdf, свободный.

3. Мальцев А. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивлению p-nпереход-корпус/ А. Мальцев, И. Мальцев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lede.ru/articles/measuring/2010_2_40.php, свободный (дата обращения: 29.10.11).

4. Сокольников А.В. Определение температуры перехода в гетероструктуре сверхьяркого светодиода / А.В. Сокольников, С.О. Игошев, В.В. Траксова; Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://fetmag.mrsu.ru/2010-2/pdf/JunctionTemperature.pdf, свободный (дата обращения: 29.10.11).

Пуговкин Алексей Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (TOP) ТУСУРа Тел.: 8-913-822-95-60 Эл. почта: pugovkinAV@tor.tusur.ru

Степной Виктор Серафимович

Зав. лабораторией кафедры ТОР ТУСУРа Тел.: 8-913-101-22-57 Эл. почта: StepnoyVS@tor.tusur.ru

Антонова Анастасия Юрьевна

Студентка ТУСУРа Тел.: 8-923-630-98-64

Еремич Михаил Александрович

Студент ТУСУРа Тел.: 8-923-601-47-49

Pugovkin A.V., Stepnoi V.S., Antonov A.J., Jeremich M.A. **Energy performance of LEDs and LED lamps**

Physical and mathematical model of LEDs and LED lamps are considered. The mathematical basis is a set of differential balance equations for the thermal energy of the crystal substrate LEDs and the measuring chamber. Simulation allows us to study the thermal modes of the crystal and the substrate, to assess the effect of thermal resistance of different sections. We also consider the inverse problem when the experimental curves for average temperature of the crystal substrate and the walls of the measuring chamber are options such as thermal resistance junction-to-air crystal, the crystal-substrate, the substrate-air, as well as the assessment is made of light and heat output LEDs.

Keywords: LED, LED lamp, the mathematical model, light output, thermal resistance.