

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 51-74

А.Е.Бакланов¹, С.В.Григорьева¹, А.Н.Яковлев²

¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск;

²Гомский политехнический университет, Россия

(E-mail: yakovlev_an@tpu.ru)

Математическое моделирование тепломассопереноса в системе теплоотвода для светодиода высокой мощности

В статье рассматривается тепломассоперенос в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» на основе нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса. Предлагается алгоритм численного решения уравнений Пуассона, позволяющий получать время прохождения исследуемого процесса, предельные токовые нагрузки, критические внешние условия и температурные режимы работы светодиода. Представлены экспериментальные результаты распределения температуры в реальных осветительных приборах.

Ключевые слова: тепломассоперенос, уравнения Пуассона, светодиод, кристаллик, полупроводник, температурный режим, моделирование.

С появлением мощных белых светодиодов открылась возможность их использования в энерго-сберегающих системах освещения. Эффективность таких систем по сравнению с традиционными люминесцентными лампами выше в два–три раза. Однако при эксплуатации светодиодных осветительных приборов выяснилось, что в реальных условиях при токах 350 – 700 мА и мощностях 1–3 Вт сложно обеспечить оптимальный теплоотвод. В связи с этим большинство осветительных приборов имеют срок службы в десятки раз меньше заявленного срока эксплуатации производителем. Это происходит из-за появления деградации кристаллика светодиода, связанной с повышенной рабочей температурой светодиодов.

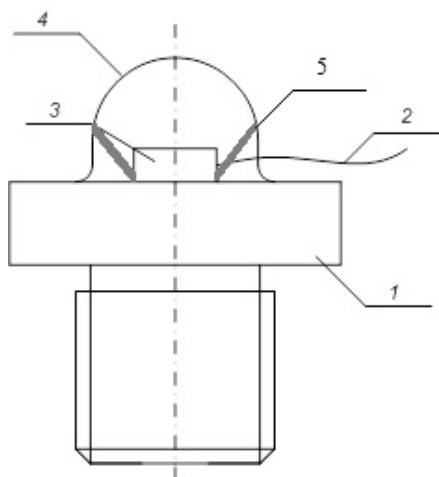
Традиционно расчет теплоотвода от светодиода осуществляется с использованием приближенных формул, полученных и используемых для расчета радиаторов полупроводниковой элементной базы. Однако из-за введенных приближений в этих формулах не всегда расчеты отражают реальную картину распространения тепла в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух». В связи с этим нами была предложена и численно подсчитана задача тепломассопереноса в светодиоде с использованием уравнений Пуассона.

Рассмотрим процесс теплопереноса в типичном светодиоде. Известно [1, 2], что строение светодиода определяет мощность излучения, зависящую от прямого тока. Световой поток, излучаемый светодиодом, напрямую зависит от прямого тока, протекающего через изделие. Чем больше ток, тем больше поток излучения светодиода. Это связано с тем, что с увеличением тока растет число электронов и дырок, поступающих в зону рекомбинации в единицу времени. Но ток нельзя увеличивать до больших значений. Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и $p-n$ перехода кристаллик перегревается и диод может выйти из строя. Кроме того, на температурный режим светодиода влияют внешние условия (температура, влажность и т.д.) функционирования полупроводникового элемента. Так, например, известны [3, 4] достаточно существенные масштабы влияния температуры окружающей среды на электрические (прямое напряжение, потребляемая энергия), энергетические (осевая сила света, световой поток, оптическая мощность) и калориметрические (относительное спек-

тральное распределение света, относительная спектральная световая эффективность и т.д.) характеристики работы светодиодов.

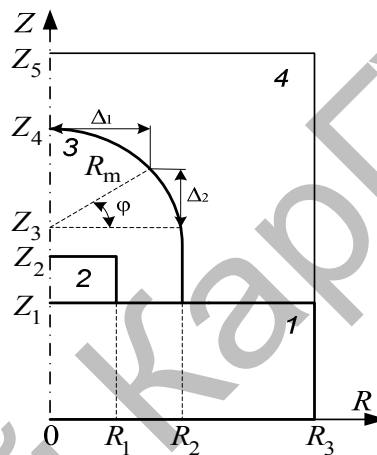
Цель выполнения численного анализа рассматриваемого процесса — определение оптимальных тепловых условий эксплуатации светодиода, создание рекомендаций по рациональному выбору материалов для изготовления комплектующих и уменьшению износа полупроводникового изделия вследствие изменения тепловых условий функционирования излучающего кристалла.

Рассматривается конструкция типового светодиода, схема которого представлена на рисунке 1.



1 – основание – катод; 2 – проводник – анод;
3 – кристаллик; 4 – линза; 5 – рефлектор

Рисунок 1. Устройство типичного светодиода



1 – основание; 2 – кристаллик; 3 – компаунд в линзе;
4 – окружающий воздух

Рисунок 2. Схема области решения задачи теплопереноса

При физической постановке задачи учитываются следующие процессы. При протекании тока через $p-n$ переход в кристаллике происходит выделение энергии в форме излучения. Как следствие, кристаллик нагревается. За счет рефлектора излучения в основание не происходит, и лучи отражаются. Таким образом, формируются потоки излучения от кристаллика, которые фокусируются линзой. За счет теплопроводности и излучения основание и оптически прозрачный полимерный корпус (линза), заполненный компаундом, нагреваются. С течением времени степень нагрева кристаллика, основания и фокусирующей линзы возрастает. Это в предельных случаях может приводить к плавлению кристаллика и последующему выходу из строя светодиода.

Одной из задач теоретического исследования может быть установление предельных значений токов и времени функционирования светодиода без перегрева комплектующих элементов. Предварительный анализ показывает, что это возможно при численном решении задачи теплопереноса, так как натурный и лабораторный эксперименты требуют больших затрат времени и материальных ресурсов.

Рассматривается осесимметричная постановка (рис. 2). Учитываются два механизма теплопереноса в светодиоде: излучение и теплопроводность. При этом не учитываются преломление, поглощение, рассеивание и фокусировка лучей линзой, а также зависимость теплофизических характеристик от температуры. Для области окружающего светодиод воздуха учитываются два механизма теплопереноса: конвекция и теплопроводность.

Предполагается, что пространство внутри линзы заполнено однородной средой – компаундом с постоянными теплофизическими характеристиками. Это допущение является типичным при моделировании процессов теплопереноса в оптических элементах и не накладывает существенных ограничений на общность постановки задачи.

Из рисунка 2 видно, что основную трудность при моделировании процессов теплопереноса представляет конфигурация светодиода. Реализация алгоритма численного решения предусматривает достаточно трудоемкое сопряжение сферической (полярной) и цилиндрической координатных сеток. К тому же важную роль играют форма рефлектора, ширина «запрещенной» зоны кристаллика и ее

изменение с ростом температуры. Следует подчеркнуть, что при моделировании рассматриваются наиболее типичные конфигурации фокусирующей линзы и рефлектора.

Рассмотрим математическую модель. Система нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, протекающих в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух», соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид.

Уравнение энергии для основания ($0 < R < R_3, 0 < Z < Z_1$):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Уравнение энергии для кристаллика ($0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2$):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{V_{cr} t}. \quad (2)$$

Уравнение энергии для компаунда линзы в цилиндрической части ($R_1 < R < R_2, Z_1 < Z < Z_2; 0 < R < R_2, Z_2 < Z < Z_3$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Уравнение энергии для компаунда линзы в сферической части ($0 < \varphi < \varphi_m, 0 < R < R_m$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} \right). \quad (4)$$

Уравнения энергии, движения и неразрывности для окружающего воздуха ($R_2 < R < R_3, Z_1 < Z < Z_3; \Delta_1 < R < R_3, Z_3 + \Delta_2 < Z < Z_4; 0 < R < R_3, Z_4 < Z < Z_5$):

$$\rho_4 C_4 \left(\frac{\partial T_4}{\partial t} + u \frac{\partial T_4}{\partial r} + v \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{r} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial r} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial z} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T_4 - T_0), \quad (7)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(zv)}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Здесь u, v — составляющие скорости конвекции воздушных потоков в проекции на ось r и z в цилиндрической системе координат, м/с; r, z — координаты цилиндрической системы координат; r, φ — координаты сферической системы координат; R_m — радиус сферической части линзы ($R_m = R_2$); φ_m — масштаб по сферической координате ($\varphi_m = \pi/2$); t — время, с; ρ — плотность, кг/м³; P — давление, Н/м²; ν — кинематическая вязкость, м²/с; β — коэффициент термического расширения, К⁻¹; g — ускорение свободного падения, м/с²; T — температура, К; T_0 — начальная температура, К; C — удельная теплоёмкость, Дж/(кгК); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); V_{cr} — объем кристаллика, м³; Q — количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока, Дж.

По закону Джоуля-Ленца количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока, можно определить из следующего выражения [5]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (9)$$

где I — сила тока, А; R — электрическое сопротивление, Ом; t — время, с.

Поскольку целью настоящего исследования является анализ теплового состояния сложной полупроводниковой системы — светодиода, то наиболее целесообразным представляется преобразование сформулированной системы дифференциальных уравнений (1)–(8) к виду, исключающему непосредственный поиск поля давления P .

Для этого вводятся в рассмотрение функция тока ψ и вектор вихря скорости ω , которые задаются следующим образом [6, 7]:

$$u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (10)$$

После подстановки выражений для компонентов скорости u, v (10) в уравнение неразрывности (8) получаем уравнение Пуассона следующего вида:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -r\omega. \quad (11)$$

Уравнение движения в переменных «функция тока — вектор вихря скорости» имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} - u \frac{\omega}{r} = v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + g\beta \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (12)$$

Анализ приведенных нелинейных нестационарных уравнений (11), (12) показывает, что целесообразно применение безразмерной формы записи дифференциальных уравнений для уменьшения числа параметров, от которых зависит решение.

При переходе к безразмерным переменным в качестве масштабов расстояния, времени, скорости, температуры, функции тока и завихренности выбраны:

$$\begin{aligned} R &= \frac{r}{z_m}, Z = \frac{z}{z_m}; \\ \tau &= \frac{t}{t_m}, t_m = \frac{z_m}{V_m}, V_m = \sqrt{g\beta\Delta T z_m}; \\ U &= \frac{u}{V_m}, V = \frac{v}{V_m}; \\ \Theta &= \frac{T - T_0}{\Delta T}, \Delta T = T_m - T_0; \\ \Psi &= \frac{\Psi}{\Psi_m}, \Omega = \frac{\omega}{\omega_m}, \Psi_m = V_m z_m^2, \omega_m = \frac{V_m}{z_m}, \end{aligned}$$

где t_m — масштаб времени, с; z_m — масштаб расстояния, м ($z_m = z_5$); V_m — масштаб скорости, м/с; T_m — масштаб температуры, К; Ψ_m — масштаб функции тока, м²/с; ω_m — масштаб вектора вихря, с⁻¹; τ — безразмерное время; U, V — безразмерные составляющие скорости конвекции в проекции на оси цилиндрической системы координат r и z ; Θ — безразмерная температура; Ψ — безразмерный аналог функции тока; Ω — безразмерный аналог вектора вихря.

Таким образом, процессы тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» в безразмерных переменных описывает следующая система уравнений.

Для основания ($0 < Z < Z_1, 0 < R < R_3$)

уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2}.$$

Для кристаллика ($Z_1 < Z < Z_2, 0 < R < R_1$)

уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2} + \frac{Qr_m}{V_{cr} \Delta T \lambda_2 t}.$$

Для наполнителя (компаунда) в цилиндрической части линзы при $Z_1 < Z < Z_2, R_1 < R < R_2; Z_2 < Z < Z_3, 0 < R < R_2$

уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Z^2}.$$

Для наполнителя (компаунда) в сферической части линзы при $0 < R < R_m, 0 < \phi < \phi_m$:

уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial \phi^2}.$$

Для воздуха вне линзы при $Z_1 < Z < Z_3$, $R_2 < R < R_3$; $Z_3 < Z < Z_4$, $R_2 - \Delta_1 < R < R_3$; $Z_4 < Z < Z_5$, $0 < R < R_3$: уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R\Omega;$$

уравнение завихренности

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{Pr_4}{Ra_4}} \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right] + \frac{\partial \Theta_4}{\partial R};$$

уравнение энергии

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Theta_4}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + V \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left[\frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial Z^2} \right].$$

Здесь Fo , Sh , Pr , Ra — безразмерные комплексы (число Фурье $Fo = \frac{\lambda t_m}{\rho C z_m^2}$, число Струхала

$$Sh = \frac{V_m t_m}{z_m}, \text{ число Прандтля } Pr = \frac{\nu C \rho}{\lambda}, \text{ число Рэлея } Ra = \frac{\beta g \Delta T z_m^3 C \rho}{\lambda \nu}.$$

Рассмотрим алгоритм численного моделирования.

1. На первом шаге по времени строится итерационный цикл для определения температурного поля в рассматриваемой системе. В качестве начального приближения задается значение сеточной функции на предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивается при условии

$$\max |\Theta^{(s)} - \Theta^{(s-1)}| \leq \delta,$$

где δ — заданное малое число; s — номер итерации.

Если в результате итерационного цикла требуемая точность вычислений не достигается, то полученное приближение $\Theta^{(s)}$ задается в качестве начального в систему разностных аналогов уравнений энергии и теплопроводности для определения очередного приближения $\Theta^{(s-1)}$. При достижении заданной точности вычислений выполняется переход к следующему временному слою.

Для достижения сходимости итерационного цикла в условиях высоких скоростей теплопереноса традиционная схема итерационного алгоритма дополняется процедурой «усреднения итераций». Вводится итерационный коэффициент последовательного усреднения γ . В этом случае значение искомой функции $\Theta_*^{(s+1)}$, вводимое на каждой итерации в качестве последнего приближения в соответствующие разностные операторы, отличается от фактически вычисленного на последней итерации значения $\Theta^{(s+1)}$ и вычисляется для каждого узла итерационной сетки по следующей формуле:

$$\Theta_*^{(s+1)} = \Theta^{(s)} + \gamma (\Theta^{(s+1)} - \Theta^{(s)}), \quad 0 < \gamma < 1.$$

Введение такой процедуры приводит к существенному снижению скорости сходимости итераций в процессе решения задачи, но обеспечивает сходимость.

В выполняемых расчетах точность вычислений температуры принимается равной 0,5 К ввиду минимально возможной в такой постановке температуры $\Theta = 0,3$.

2. При известных значениях температуры в каждом узле пространственной сетки вычисляется значение функции тока Ψ .

3. По найденным значениям функции тока Ψ и температуры в каждом узле сетки итерационным путем определяются значения вектора вихря скорости Ω .

4. По значениям вектора вихря скорости Ω и функции тока Ψ вычисляются компоненты скорости конвекции воздушных потоков U и V по выражениям (10).

5. Для контроля точности проводимых вычислений в каждом узле сетки выполняется оценка достоверности полученных результатов по результатам анализа консервативности разностной схемы.

6. Затем проверяются условия окончания вычислений по превышению температуры кристаллика предельных значений (температур плавления компаунда, кристаллика, основания). В случае невыполнения условий окончания вычислений выполняется переход на следующий временной слой и определяются поля температуры, функции тока, вектор вихря скорости, проверяется достоверность полученных результатов и условий окончания вычислений по пунктам 1–6 данного алгоритма. В слу-

чае выполнения условий окончания вычислений определяется время прохождения исследуемого процесса, предельные токовые нагрузки, критические внешние условия и температурные режимы работы светодиода.

На основании проведенных предварительных расчетов была разработана конструкция светодиодного светильника типа «Armstrong». Использовались светодиоды от производителей Nichia и LG со следующими характеристиками (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Характеристики светодиодов

Характеристика	LG 3030N	NS6W183B	NVSL219B
Мощность светодиода, Вт	0,609	1,05	2,16
Сила тока, мА	100	350	700
Световой поток, лм	78	147	278
Световая отдача, лм/Вт	128	140	128
Размеры, мм	3.0x3.0x2.0	6.5x5.0x1.35	3.5x3.5x2.0

Дальнейшее изучение температурных режимов всей конструкции светодиодного прибора сводилось к расчету температурных полей спроектированной компьютерной модели. По предлагаемой концепции было использовано приложение CAD системы Solid Works Flow Simulation. Flow Simulation позволяет рассчитывать тепломассообмен конструкции в газообразной и жидкой среде, при этом учитываются аэрогидродинамические свойства поверхностей конструкции. Результатами расчетов являются: распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию осветительного прибора. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщину, можно добиться компромиссного решения между массогабаритными требованиями и тепловыми, при этом не забывая о реальности конструкции.

1 расчет. Для первого расчета использовались светодиоды Nichia NVSL219B.

На рисунке 3 показано температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,7A$ и температуре окружающей среды $T = 25^{\circ}C$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $35,2^{\circ}C$.

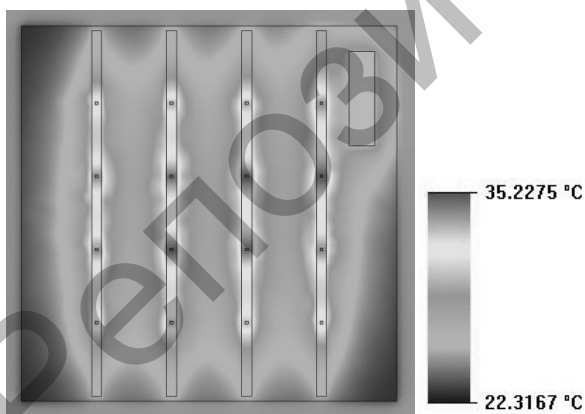


Рисунок 3. Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NVSL219B

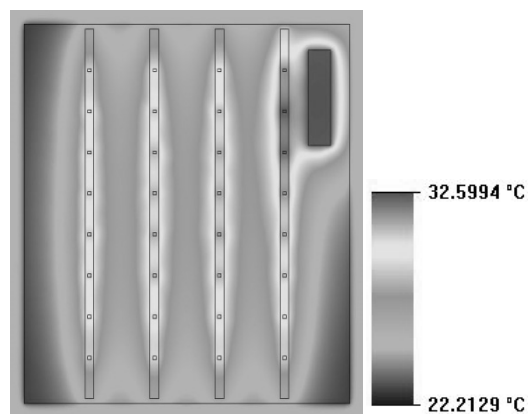


Рисунок 4. Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NS6W183B

2 расчет. Во втором случае использовались светодиоды Nichia NS6W183B.

На рисунке 4 показано температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,35A$ при температуре окружающей среды $T = 25^{\circ}C$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $32,6^{\circ}C$.

3 расчет. В данном расчете использовались светодиоды LG3030N, работающие на малом токе.

На рисунке 5 представлено температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,1\text{A}$ и температуре окружающей среды $T = 25^\circ\text{C}$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила 38°C .

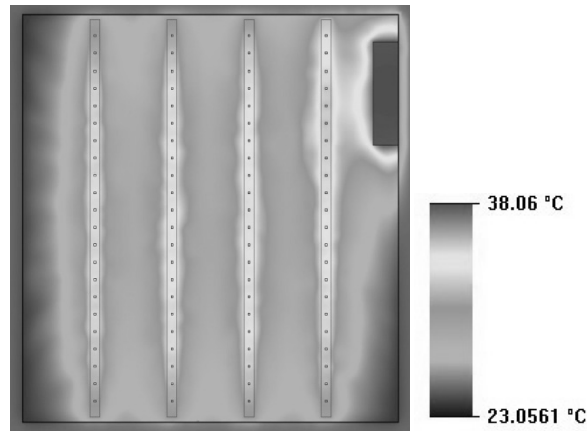


Рисунок 5. Температурное поле светильника со светодиодами LG3030N

По результатам расчетов была составлена таблица 2, наглядно демонстрирующая различия при выборе определенных светодиодов и их режимов работы при проектировании осветительных приборов.

Т а б л и ц а 2

Характеристики осветительных приборов

Характеристика	1 расчет	2 расчет	3 расчет
Светодиоды	NVSL219B	NS6W183B	LG 3030N
Мощность светильника, Вт	38	37	59
Световой поток светодиодов, Лм	4448	4704	6864
Кол-во светодиодов, шт.	16	32	88
Стоимость светодиодов, тенге	4119	6540	3240

Анализируя расчеты компьютерных моделей, можно сделать несколько выводов.

1. В офисном освещении предпочтительно использовать светодиоды, работающие на малом токе ($0,1\text{A}$). Сравнивая расчеты, видно, что светильник, изготовленный с использованием светодиодов LG 3030N, имеет большую светоотдачу в 1.5 раза (без учета потерь), большую мощность, но при этом температура на корпусе светодиодов различается на 6 градусов. Такая небольшая разница объясняется равномерностью распределения светодиодов LG по поверхности теплоотвода (корпуса), а также меньшей мощностью каждого светодиода.

2. Светодиоды малой мощности $<1\text{Вт}$ могут стоить в разы дешевле мощных светодиодов и при этом превосходить их в световом потоке.

3. Анализируя тепловые поля всех проведенных расчетов, целесообразно располагать пускорегулирующее устройство (драйвер) не внутри светильника, а снаружи. Расположение драйвера внутри создает дополнительные оптические потери и неравномерную яркость на рассеивателе, а расположение снаружи способствует лучшему охлаждению источника питания, а значит, более эффективной и надежной работе светильника. Также размещение источника питания снаружи упрощает обслуживание (ремонт) светильника.

Для проведения натурального эксперимента для рассмотрения тепловых потоков в системе «светодиоды – корпус светильника – окружающая среда» был изготовлен макет светильника типа «Armstrong» с 16-ю светодиодами NVSL219B и потребляемой мощностью $38,5\text{Вт}$ при токе $I = 0,35\text{A}$. Максимальная температура светильника была измерена термопарой и составила 34°C . На основании этого можно сделать вывод, что разработанная модель светильника является достаточно достоверной и позволяет считать результаты компьютерного моделирования верными.

Используя предложенную методику расчета тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух», можно создавать конструкции новых светильников, которые по анализу распределения температурных полей обеспечат долговременную работу осветительных приборов в соответствии с заявленным временем работы порядка 50 тыс. часов.

Работа выполнена в рамках выполнения госбюджетной НИР «Оптимизация энергопотребления в светодиодных установках совмещенного освещения с автоматизированным управлением: алгоритмы, программное обеспечение, демонстрационный макет на ЭКСПО-2017».

Список литературы

- 1 Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. — М.: Мир, 1976. — 214 с.
- 2 Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
- 3 Давиденко Ю. Современные светодиоды // Компоненты и технологии. — 2004. — № 5. — С. 12–16.
- 4 Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. — 2005. — № 9. — С. 140–46.
- 5 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. — М.: Наука, 1977. — 704 с.
- 6 Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. — М.: Мир, 1980. — 618 с.
- 7 Джалаурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. — М.: Мир, 1983. — 399 с.

А.Е.Бакланов, С.В.Григорьева, А.Н.Яковлев

Жоғарғы қуатты жарық диоды үшін жылу жүйесіндегі жылу массасын тасымалдауды математикалық модельдеу

Жұмыс барысында жылу массасын тасымалдау «жарық диодының тұрақтануы – кристалл – линза — қоршаған орта ауасы» стационарлы емес дифференциалдық теңдігінде негізделді, жылу массасының тасымалдау процесімен байланысқан комплексімен сипатталды. Пуассон теңдігінің шешімі сандық алгоритм түрінде берілген және зерттелетін процестің уақыт өту мүмкіндігі, ток жүктемесінің шегі, жарық диодының жұмысы критикалық ішкі шартымен температура режиміне байланысты. Берілген эксперименттің тарату нәтижесі температураның нақты жарықтандыру аспабында көрсетілді.

A.E.Baklanov, S.V.Grigoryeva, A.N.Yakovlev

Mathematical modeling of heat-and-mass transfer in the heat sink system for the high power LED

In this paper we consider the heat and mass transfer in the «base of the LED – crystal – lens – ambient air» on the basis of non-stationary differential equations that describe the complex of interrelated processes. We propose an algorithm for numerical solution the Poisson equations that allows to receive the time of the test process, limit current loads, critical external conditions and the temperature operating modes of the LED. The experimental results of the temperature distribution in real lighting devices are presented.

References

- 1 Moss T., Barrel G., Allis B. *Semiconductor Opto-Electronics*, Moscow: Mir, 1976, 274 p.
- 2 Sze S. *Physics of Semiconductor Devices*, Moscow: Mir, 1984, 456 p.
- 3 Davydenko Yu. *Components and technologies*, 2004, 5, p. 12–16.
- 4 Nikiforov S. *Components and technologies*, 2005, 9, p. 140–146.
- 5 Sivukhin D.V. *The general course of physics. Electricity*, Moscow: Nauka, 1977, 704 p.
- 6 Roache P.J. *Computational fluid dynamics*, Moscow: Mir, 1980, 618 p.
- 7 Jaluria Y. *Natural Convection: heat and mass transfer*, Moscow: Mir, 1983, 399 p.