

## НАГРЕВАНИЕ ЛЮМИНОФОРА В СВЕТОДИОДЕ

С.Р. Сулейманов

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. В.М. Лисицын  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: seidamet.s@gmail.com

Типичный из наиболее распространенных светодиод (СД) для генерации «белого» света представляет собою чип, излучающий в УФ или «синей» области спектра, покрытый люминофором [1]. Чип на основе InGaN является эффективным источником излучения в области спектра от 420 до 500 нм с максимумом на 450–460 нм. «Синее» излучение чипа возбуждает люминофор, спектр люминесценции которого приходится на область 500–700 нм. Вместе с частично проходящим через люминофор синим излучением весь спектр СД почти полностью перекрывает видимый диапазон. Такой СД в настоящее время обеспечивает наивысшие излучательные характеристики [2, 3].

В такой конструкции наиболее уязвимым элементом является люминофор. Его характеристики меняются со временем. Нагревание люминофора приводит к спаду эффективности преобразования излучения чипа в видимое. Существует две причины, которые приводят к нагреванию люминофора. Нагревается чип из-за потерь энергии на контактах, на переходах. Другой причиной являются потери энергии при преобразовании квантов возбуждения в кванты люминесценции с меньшей энергией. Выделяемое в люминофоре тепло является результатом этого процесса и полностью остается в самом люминофоре.

Для того, чтобы минимизировать нагревание люминофора теплом от чипа, люминофор в полимерной пленке пространственно отделяется от чипа. Уменьшить величину выделяемого при этом тепла невозможно без ухудшения качества излучательных характеристик – снижения индекса цветопередачи. В [4] показано, что в «белых» СД со стандартными промышленными люминофорами и чипами «синего» излучения потери энергии на нагрев люминофора не могут быть ниже 25–28%. Эта величина может быть и больше за счет наличия безызлучательных переходов, поглощения в матрице композита.

В настоящей работе представлены результаты расчета возможной температуры люминофора, нагреваемого только за счет доли потерь энергии при преобразовании спектра излучения. Рассмотрим реальную ситуацию с распространенными для изготовления источников света и световых приборов на основе СД. СД с потребляемой мощностью 1 Вт построен на базе чипа, генерирующего излучение в области 420 до 500 нм с максимумом на 450–460 нм с потоком 0,4 Вт. Площадь излучателя имеет величину 1 мм<sup>2</sup>. Чип накрыт пленкой из композита на основе люминофора в полимерной матрице. Пленка не контактирует с излучателем, находится на удалении 1–2 мм от него. Толщина пленки обычно около 0,5 мм. Объемная концентрация люминофора в композите имеет величину около 15%. Излучением чипа возбуждается пленка с размерами около 5 мм<sup>2</sup>. Средние размеры частиц люминофора – 10 мкм. Примем, что частицы имеют форму шара.

Для расчета рассмотрим вариант: пленка представляет собою слой люминофора с разным взаимным размещением частиц. Люминофор нагревается за счет потерь энергии излучения чипа при преобразовании его в люминесценцию. Теплоотвод может осуществляться либо окружающим воздухом, либо пленкой из композита. Люминофором поглощается 90% излучения чипа. 10% синего излучения чипа проходит через люминофор и участвует в формировании нужного спектра излучения СД. Примем, что на нагревание каждой частицы люминофора расходуется доля энергии, пропорциональная площади ее поперечного сечения. Это приближение приемлемо, так как на частицу падает поток с площади чипа, на порядки превышающей площадь сечения отдельной частицы, и рассеянного другими частицами.

В пленке равномерно распределено  $N = 7,17 \cdot 10^5$  частиц люминофора. Следовательно, для нагрева одной частицы затрачивается  $0,4 \cdot 0,9 / 7,17 \cdot 10^5 = 5,02 \cdot 10^{-7}$  Вт.

Это тепло приводит к нагреванию каждой частицы до температуры  $T_r$ :

$$Q = cm(T_r - T_b) = cpV(T_r - T_b), \quad (1)$$

где  $c$ ,  $V$ ,  $p$  – удельная теплоемкость, объем и плотность люминофора [3];  $T_b$ ,  $T_r$  – температура люминофора до нагрева, принимаем равной температуре воздуха 298 К, и температура нагретой частицы соответственно.

Примем, что частицы люминофора образуют плотный слой из всех  $N$  частиц. Весь слой нагревается до температуры  $T_r$ . Пусть тепло от слоя отводится воздухом. Рассмотрим два предельных случая отвода тепла от слоя люминофора. Поперечное сечение одной частицы люминофора равно  $\sim 8 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>. На площади пленки композита с люминофором 5 мм<sup>2</sup> для полного ее покрытия можно разместить  $6,25 \cdot 10^4$  частиц. Всего частиц в пленке  $7,17 \cdot 10^5$ .

Первый предельный случай: Все частицы люминофора образуют на площади 5 мм<sup>2</sup> слой толщиной 0,075 мм. В столь тонком слое теплоотвод воздухом может осуществляться только двумя поверхностями общей площадью  $2S = 10$  мм<sup>2</sup>.

Рассчитаем теплоотвод воздухом от пленки через эти поверхности. Модель для расчетов будет представлять собой однородную плоскую пленку круглого сечения с диаметром 2,5 мм с равномерным

тепловым потоком. Задача сводится к вычислению значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от люминофора к воздуху. Тогда, используя теорию подобия, после преобразований получим:

$$\alpha = \frac{0.5 \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot \left( \frac{g\beta(T_{\Gamma} - T_{\text{в}})^{1/3}}{\nu^2} Pr_{\text{в}} \right)^{0.25}}{d} = 5,8184 \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{в}})^{0.25}. \quad (2)$$

Теплофизические характеристики воздуха для принятой температуры приведены в работе [5]. Теплоотвод от люминофора к воздуху, определяется по формуле, Вт:

$$Q = 2\alpha S(T_{\Gamma} - T_{\text{в}}) = 11,6368 \cdot S \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{в}})^{1.25}. \quad (3)$$

С течением времени устанавливается тепловой баланс, ограничивающий температуру нагрева частиц при заданных условиях. Для выполнения условий теплового баланса приравняем (1) и (3), и выразим  $T_{\Gamma}$ :

$$T_{\Gamma} = \left( \frac{c\rho V}{5,8184 \cdot S_{\text{п}}} \right)^4 + T_{\text{в}}.$$

Таким образом, при увеличении подводимой теплоты выше равновесной  $Q = 0,029$  Вт, при которой устанавливается тепловой баланс при разнице температур  $\Delta T = T_{\Gamma} - T_{\text{в}} = 144,6$  °С, система станет охлаждаться быстрее чем нагреваться, поэтому температура будет рассчитываться исходя из формулы (3). При заданный условиях в первом предельном случае, пластинка люминофора может рассеять полученные 0,36 Вт только при предельной температуре люминофора 1104 °С.

Рассмотрим другой предельный случай отвода тепла от люминофора. Пусть все частицы люминофора не касаются друг друга, разделены воздушными промежутками. Общая площадь поверхности всех частиц – 2,16 см<sup>2</sup>. Проведя аналогичные расчеты, получим, что полученные 0,36 Вт пластинка рассеет при температуре люминофора 78 °С.

Таким образом, в зависимости от плотности упаковки люминофора, его нагревание при преобразовании синего излучения чипа в видимое не может быть менее 78 °С.

#### Список литературы

1. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. под. ред. А.Э. Юновича. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Социн Н.П., Гальчина Н.А., Коган Л.М., Широков С.С., Юнович А.Э. // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С. 700–705.
3. Chun Che Lin, Ru-Shi Liu. Advances in phosphors for light-emitting diodes // J. Phys. Chem. Lett. – 2011. – Vol. 2. – P. 1268–1277.
4. Lisitsyn V.M., Stepanov S.A., Yangyang J., Lukash V.S. White LEDs with limit luminous efficacy // AIP Conference Proceedings. – 2016 – Vol. 1698. – P. 06–08;
5. Краснощекоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.