

## К РАСЧЕТУ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ ЛЮМИНОФРОНОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ СВЕТОДИОДА

*Синьлей Ли, В.А. Ваганов*

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. В.М. Лисицын  
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
 E-mail:lixinlei@mail.ru

Наибольшее распространение для целей освещения получили светодиоды (СД) на основе излучающих в УФ или «синей» (420–500 нм) области спектра с преобразованием этого излучения в видимое люминофором. Спектр излучения таких СД формируется из частично прошедшего света от чипа и люминесценции [1]. Люминофор в СД подвержен большим тепловым нагрузкам. Люминофор нагревается самим чипом, не менее 25% излучения чипа при преобразовании в видимое остается в люминофоре, расходуется на нагрев [2]. Нагрев люминофора приводит к спаду эффективности люминесценции. Поэтому необходимо найти пути снижения нагрева люминофора в СД. Частично проблема решается путем использования удаленного люминофора: люминофор в составе композита в виде пленки располагается так, чтобы исключить прямой контакт с чипом. Но нагрев за счет части энергии при преобразовании спектра излучения исключить невозможно. Очевидно, от толщины пленки с люминофором будет зависеть выход преобразования излучения чипа в люминесценцию, цветность излучения СД. Поэтому представляется важным решение проблемы определения оптимальной толщины пленки. Отметим, что решение проблемы усложняется тем, что не может быть общих способов решения проблемы. Оптимальная толщина пленки к проектируемому СД должна выбираться для каждой комбинации чип-люминофор и требований к СД. В настоящей работе проведен анализ зависимости толщины пленки из композита на основе люминофора для обеспечения максимальной эффективности СД с выполнением требований к цветопередаче.

Эффективность СД с пленкой из композита на основе люминофора определяется соотношением

$$\eta_c = \frac{\Phi_c}{P_c} = \frac{\int_{400}^{760} \varphi_{\lambda_c} \cdot \nu_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{400}^{500} \varphi_{\lambda_c} \cdot d\lambda} \quad (1)$$

где  $\Phi_c$ ,  $P_c$  – световой поток СД и поток излучения чипа;  $\varphi_{\lambda_c}$  и  $\varphi_{\lambda_c}$  – спектральные плотности излучений СД и чипа. Отметим, что в (1) не учитываются возможные потери на чипе. СД должен обеспечивать заданную цветность излучения. Нужная цветность излучения в первом приближении определяется для конкретной комбинации чип-люминофор в СД с чипом «синего» излучения определяется соотношением

$$S = \frac{\Phi_{\lambda_l}}{\Phi_c} = \frac{\int_{500}^{760} \varphi_{\lambda} \nu_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{500} \varphi_{\lambda} \nu_{\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

где  $\Phi_c$  – световой поток чипа.

Для анализа примем, что весь поток «синего» излучения чипа перекрывается полностью микрокристаллами люминофора распределенными в полимерной пленке. В этом случае «синяя» доля излучения чипа проходит через пленку из-за того, что люминофор частично прозрачен в спектральной области излучения чипа. Предположим, что в области излучения чипа люминофор имеет конечное пропускание  $\tau_{\lambda_l}$ . В этом случае световой поток излучения СД определяется суммой потоков прошедшего через пленку с люминофором излучения чипа и люминесценции, возбуждаемой поглощенным потоком излучения чипа.

Пусть эффективность преобразования излучения чипа люминофором (энергетический выход люминесценции) будет  $\eta_l$ . Тогда спектральная плотность люминесценции при длине волны  $\lambda$  будет равна

$$\varphi_{\lambda_l} = \eta_{\lambda_l} \cdot \int_{400}^{500} (1 - \tau_{\lambda_l}) \cdot \varphi_{\lambda_c} d\lambda \quad (3)$$

Тогда выражения (1) и (2) примут вид:

$$\eta_{c2} = \frac{\int_{500}^{760} \tau_{\lambda_l} \cdot \varphi_{\lambda_c} \cdot \nu_{\lambda} \cdot d\lambda + \int_{400}^{760} \nu_{\lambda} \cdot \eta_{\lambda_l} \cdot ((\int_{400}^{760} (1 - \tau_{\lambda_l}) \varphi_{\lambda_c} \cdot d\lambda) d\lambda)}{\int_{400}^{500} \varphi_{\lambda_c} \cdot d\lambda} \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{\int_{500}^{760} V_\lambda \cdot \eta_{\lambda_l} \left( \int_{400}^{500} (1 - \tau_{\lambda_l}) \varphi_{\lambda_c} \cdot d_\lambda \right) d\lambda}{\int_{400}^{500} \tau_{\lambda_l} \varphi_{\lambda_c} V_\lambda d\lambda} \quad (5)$$

Коэффициент пропускания в (4) и (5) связан с показателем поглощения выражением  $\tau_{\lambda_l} = e^{-\kappa_{\lambda_l} \cdot d_l}$  (6) где  $\kappa_{\lambda_l}$  – показатель поглощения люминофора,  $d_l$  – приведенная толщина люминофора, равная толщине слоя, объем которого равен объему всех частиц люминофора. Можно показать, что приведенная толщина люминофора и толщина пленки с композитом  $d_k$  связаны соотношением  $d_k \geq C d_l$  (7), где  $C$  – коэффициент, зависящий от многих технологических факторов. Обычно он имеет величину около 5–7.

Из приведенного анализа можно сделать следующее заключение. Для расчета толщины пленки композита на основе люминофора для СД нужно прежде всего вычислить по формулам (4–6) приведенную величину толщины люминофора. После этого можно рассчитать толщину пленки композита люминофора.

#### Список литературы

1. Социн Н.П., Гальчина Н.А., Коган Л.М. и др. Светодиоды "теплого" белого свечения на основе p-n-гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами из иттрий-гадолиниевых гранатов // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С.700–705.
2. Lisitsyn V.M., Stepanov S.A., Yangyang J. et al. White LEDs with limit luminous efficacy // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1698. – P. 06–08.