

07

## **Влияние светорассеяния в оптических покрытиях на потери энергии в светодиодных устройствах**

© С.Н. Липницкая, К.Д. Мынбаев, В.Е. Бугров, А.Р. Ковш,  
М.А. Одноблюдов, А.Е. Романов

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики  
Группа компаний „Оптоган“, Санкт-Петербург  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Svetlana.Lipnitskaya@optogan.com

Поступило в Редакцию 16 июля 2013 г.

Рассмотрено влияние светорассеяния в оптических покрытиях, содержащих люминофор, на потери энергии в светодиодных устройствах, изготовленных по технологии „чип-на-плате“. Оценка потерь энергии проводилась с помощью численного моделирования, в качестве варьируемых параметров были выбраны показатель преломления материала покрытия (1.4–1.8) и средний радиус частиц люминофора (5–50  $\mu\text{m}$ ). Показано, что наибольшее влияние на потери энергии оказывает полное внутреннее отражение на границе раздела „покрытие/воздух“. В рассмотренной конфигурации светодиодного устройства оптимальное значение показателя преломления материала покрытия составило 1.4. Также показано, что для снижения потерь энергии, связанных с рассеянием света на частицах люминофора, целесообразно использовать люминофор с крупными частицами (средний радиус 50  $\mu\text{m}$ ).

Стандартная на сегодняшний день технология получения белого света при помощи полупроводниковых светодиодных чипов, излучающих в области синих длин волн видимого диапазона или в ближнем

ультрафиолете, использует так называемые „желтые“ люминофоры. Часть синего света, испускаемого светодиодным чипом, проходит сквозь элемент первичной оптики, не взаимодействуя с люминофором, а другая часть с помощью люминофора преобразуется в желтый (янтарный) цвет. Совокупность желтого и синего света дает излучение с цветом, близким по восприятию человеческим глазом к белому [1].

В современной литературе рассматривается ряд подходов, применяемых для повышения эффективности вывода света из светодиодных устройств, к ним относятся текстурирование поверхности светодиодного чипа [2], использование в конструкции светодиода различных отражателей [3], текстурирование интерфейса между подложкой и кристаллом [4] и др. Для дальнейшего повышения эффективности светодиодных устройств необходимо рассмотрение процессов распространения света в элементах первичной оптики, содержащих люминофор, и оптимизация этих элементов.

В настоящем сообщении приводятся результаты расчетов и экспериментов, проведенных для определения влияния показателя преломления материала оптического покрытия, содержащего люминофор, и размеров частиц люминофора на потери энергии в светодиодных устройствах, изготовленных по технологии „чип-на-плате“ (англ. „chip-on-board“, СОВ) [5]. Такие устройства представляют собой массив светодиодных чипов, установленных на единую подложку и покрытых общим слоем покрытия (эластомера), которое содержит люминофор. Оптические свойства материала и форма оптического элемента значительно влияют на вывод света из СОВ. Так, было показано, что меняя форму поверхности оптического элемента, можно повысить светоотдачу СОВ за счет снижения эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) на границе раздела „оптический элемент/воздух“ [6].

Для решения поставленной задачи проводилось численное моделирование в программном пакете Zemax®, использующем метод Монте-Карло для трассировки лучей [7]. Расчеты проводились для светодиодного модуля СОВ, помещенного в виртуальный сферический детектор, который фиксирует энергию лучей, покинувших СОВ. В качестве прототипа светодиодного модуля была взята существующая конструкция СОВ „Х10“, изготавливаемая группой компаний „Оптоган“. В этой конструкции на одном керамическом основании (подложке) находятся девять светодиодных чипов, соединенных проволочными контактами и залитых ровным слоем прозрачного защитного покрытия, содержащего

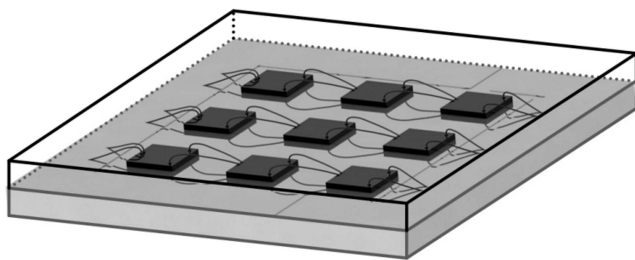


Рис. 1. Светодиодный модуль COB „X10“.

люминофор на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG) (рис. 1) [8]. Геометрические параметры элементов COB (длина/ширина/высота) были следующими: чип 1.2/1.2/0.14 mm, подложка 10/10/0.5 mm, слой защитного покрытия 10/10/0.6 mm; расстояние между чипами составляло по 1.4 mm со всех сторон, отступ от чипа до края подложки составлял 1.8 mm, проволочные контакты отстояли от поверхности подложки максимум на 0.3 mm.

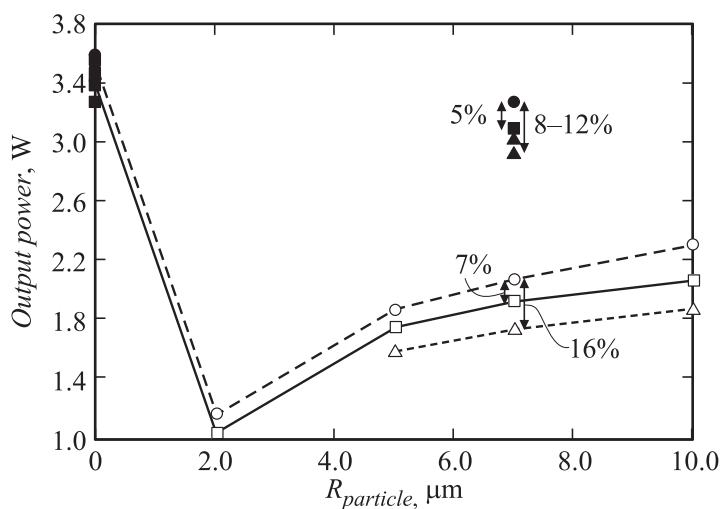
В расчетах чип моделировался как параллелепипед из сапфира (поскольку именно сапфировая подложка занимает большую часть его объема) с коэффициентом преломления  $n_{chip} = 1.76$ . Нижняя грань чипа зеркально отражала 90% энергии, поглощала 10% энергии. Боковые грани чипа излучали 30% световой энергии, а верхняя грань — 70% световой энергии. Распределение интенсивности излучения  $I$  в зависимости от угла  $\theta$  на каждой поверхности задавалось в виде распределения Ламберта. Такой упрощенный подход моделирования чипа предложен в [9], он позволяет значительно сократить время расчета и подходит для моделирования оптических систем, в которых основным объектом исследования является первичная и вторичная оптика.

Диаграмма отражения керамического основания была получена экспериментально [6], ее полуширина составляет примерно  $20^\circ$ . При моделировании были заданы следующие характеристики материала керамической подложки: 5% энергии поглощается, 5% энергии зеркально отражается, оставшаяся часть энергии рассеивается в соответствии с экспериментальной диаграммой. Светорассеяние на частицах люминофора моделировалось с помощью модели объемного рассеяния Ми [10]; показатель преломления частиц люминофора  $n_{phosphor} = 1.83$

был взят равным реальному показателю преломления люминофора YAG, задавалась весовая концентрация частиц люминофора и средний радиус его частиц.

При моделировании не учитывалось: 1) дисперсия (в расчетной модели задавалась длина волны излучения чипа 450 nm, преобразование длины волны люминофором не моделировалось), 2) рассеяние и поглощение света проволочными соединениями, 3) разница в размерах частиц люминофора и их форме. Поглощение света частицами люминофора и материалом защитного покрытия явно не задавалось, однако в расчете указывается максимальное количество отражений (4000), которое может испытывать луч.

Для верификации предложенной математической постановки были проведены экспериментальные измерения опытных образцов СОВ „X10“ с защитным покрытием из эластомера: четыре образца с показателем преломления материала защитного покрытия  $n_{cover} = 1.4$  и четыре образца  $n_{cover} = 1.5$  без частиц люминофора, два образца с  $n_{cover} = 1.4$  и один образец с  $n_{cover} = 1.5$  с частицами люминофора: средний радиус частиц люминофора  $R_{particle} = 7 \mu m$ , весовая концентрация частиц люминофора 16%, два образца с  $n_{cover} = 1.5$  с частицами люминофора: средний радиус частиц люминофора  $R_{particle} = 7 \mu m$ , весовая концентрация частиц люминофора 25%. Измерения проводились на интегральной сфере Orb Optronix [11]. В результате измерений опытных образцов были получены значения мощности излучения и координаты цветности излучения для образцов с люминофором. Координаты цветности образцов с  $n_{cover} = 1.4$  с весовой концентрацией люминофора 16% и образцов с  $n_{cover} = 1.5$  с весовой концентрацией люминофора 25% лежат в одном колориметрическом бине [12], образец с  $n = 1.5$  с весовой концентрацией люминофора 16% лежит в соседнем бине. Результаты экспериментов и соответствующих расчетов приведены на рис. 2. Как видно, расчеты предсказывают значительно большее уменьшение выходной мощности при добавлении в эластомер частиц люминофора, чем эксперименты, это связано с упрощениями, которые были сделаны при моделировании. При этом, однако, расчетная зависимость выходной мощности от показателя преломления материала покрытия соответствует экспериментальной: для образцов с одинаковой концентрацией люминофора (16%) выходная мощность при  $n_{cover} = 1.4$  больше, чем при  $n_{cover} = 1.5$  на 5% (по расчетам на 7%), для образцов, лежащих в одном колориметрическом бине, но с разными concentra-

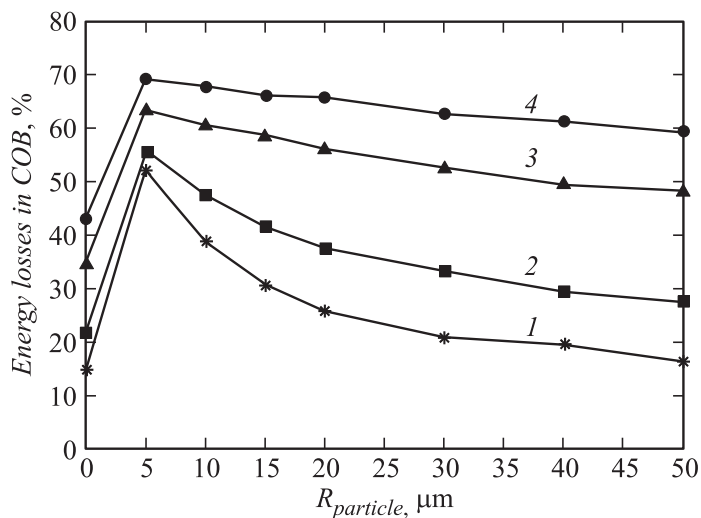


**Рис. 2.** Зависимость выходной мощности СОВ „X10“ от среднего радиуса частиц люминофора для разных материалов защитного покрытия (линия с точками — расчет, закрашенные точки — эксперимент): круги —  $n = 1.4$ , квадраты —  $n = 1.5$ , весовая концентрация люминофора 16%, треугольники —  $n = 1.5$ , весовая концентрация люминофора 25%.

циями люминофора (16 и 25%), выходная мощность при  $n_{cover} = 1.4$  больше, чем при  $n_{cover} = 1.5$  на 8–12% (по расчетам на 16%).

Далее проводились параметрические расчеты. В качестве варьируемых параметров были взяты показатель преломления материала защитного покрытия  $n_{cover}$  со значениями 1.8, 1.7 (покровные стекла, плотностью около  $2200 \text{ kg/m}^3$ ) и 1.5, 1.4 (эластомеры плотностью около  $1000 \text{ kg/m}^3$ ), а также средний радиус частиц люминофора  $R_{particle}$  со значениями 5, 10, 15, 20, 30, 40 и  $50 \mu\text{m}$ . Весовая концентрация частиц люминофора в оптическом элементе оставалась неизменной и составляла для стекол 6%, а для силиконовых эластомеров — 13%, что соответствует одной объемной доле частиц.

На рис. 3 изображен график зависимости энергетических потерь от  $R_{particle}$  для разных материалов защитного покрытия, радиус  $0 \mu\text{m}$  соответствует оптическому покрытию без люминофора. Энергетические



**Рис. 3.** Зависимость энергетических потерь в СОВ „X10“ от среднего радиуса частиц люминофора для разных материалов защитного покрытия: 1 — эластомер  $n = 1.4$ ; 2 — эластомер  $n = 1.5$ ; 3 — покрывное стекло  $n = 1.7$ ; 4 — покрывное стекло  $n = 1.8$ .

потери вычислялись как разность энергии лучей, „запущенных“ с чипов, и энергии лучей, покинувших СОВ (попавших на детектор). Из графика видно, что ПВО на границе раздела „защитное покрытие/воздух“ имеет большее влияние на потери энергии, чем рассеяние света на границе „люминофор/защитное покрытие“, поэтому в качестве материала покрытия лучше всего использовать силиконовые эластомеры или стекла с низким показателем преломления. Влияние рассеяния света на границе раздела „частица люминофора/защитное покрытие“ снижается при использовании более крупных частиц люминофора, что связано с тем, что в данном случае снижается количество частиц люминофора и увеличивается расстояние свободного пробега луча до рассеяния.

Отметим, что в современных мощных светодиодах из-за низкой теплопроводности полимерного связующего эластомера, тепло, которое выделяется в люминофоре при преобразовании энергии, приводит к локальным перегревам, что отрицательно сказывается на свойствах

частиц люминофора и эластомера, существенно снижает эффективность светодиодов, смещает максимум спектра их излучения, и заметно сокращает срок службы. Считается, что для таких устройств перспективно развитие технологии легированных стекол (стеклокерамики), обладающих лучшей по сравнению с эластомерами теплопроводностью [13]. Значение показателя преломления стекла в отличие от показателя преломления эластомеров нетрудно довести до показателя преломления люминофора, что исключит потери энергии за счет рассеяния света на границе „частица люминофора/стекло“. Однако результаты наших расчетов показывают, что общего снижения потерь энергии таким образом добиться не удастся, так как определяющими являются потери энергии за счет ПВО на границе раздела оптического покрытия с воздухом. Это обстоятельство следует учитывать при разработке новых оптических покрытий для светодиодных устройств.

Таким образом, исследование влияния светорассеяния в оптических покрытиях, содержащих люминофор, на потери энергии в светодиодных устройствах СОВ, проведенное с помощью численного моделирования, показало, что наибольшее влияние на потери энергии в таких устройствах оказывает полное внутреннее отражение на границе раздела „защитное покрытие/воздух“. Оптимальное значение показателя преломления материала оптического покрытия с точки зрения потерь энергии в рассмотренной конструкции СОВ составило 1.4. Для снижения потерь энергии, связанных с рассеянием света на частицах люминофора, рекомендовано использовать люминофор с крупными частицами (средний радиус  $50 \mu\text{m}$ ).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ГК № 14.516.11.0086 „Разработка научно-технологических решений по созданию энергоэффективных светодиодных устройств“.

Авторы благодарят В.В. Крамника за помощь в измерении диаграммы отражения подложки.

## Список литературы

- [1] Бадгутдинов М.Л., Коробов Е.В., Лукьянов Ф.А., Юнович Э.А., Коган Л.М., Гальчина Н.А., Рассохин Т.В., Социн Н.П. // ФТП. 2006. Т. 40. В. 6. С. 758.
- [2] Гребенищикова Е.А., Головин А.С., Именков А.Н., Кижасев С.С., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 3. С. 104.

- [3] Золотухин А.В., Шерстнев В.В., Савельева К.А., Гребеницкова Е.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская Н.Д., Слобожанюк С.И., Иванов Э.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 4. С. 39.
- [4] Лундин В.В., Заварин Е.Е., Симицын М.А., Николаев А.Е., Лундина Е.Ю., Сахаров А.В., Трошков С.И., Цацульников А.Ф. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 21. С. 39.
- [5] Hartmann P., Wenzl F.P., Sommer C., Pachler P., Hoschopf H., Schweighart M., Hartmann M., Kuna L., Jakopic G., Leising G., Tasch S. // Proceed. of SPIE. 2006. V. 6337. Art. 633701.
- [6] Липницкая С.Н., Мынбаев К.Д., Никулина Л.А., Бугров В.Е., Ковш А.Р., Одноблюдов М.А., Романов А.Е. // Оптический журнал. 2013. В. 12 (в печати).
- [7] Szirmai-Kalos L. Monte-Carlo methods in global illumination. Institute of Computer Graphics, University of Technology, 2000. 118 p.
- [8] [http://www.optogran.ru/products/led\\_components/x10](http://www.optogran.ru/products/led_components/x10).
- [9] Liu S., Luo X. LED Packaging for lighting applications/ Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 352 p.
- [10] Mie G. // Ann. Phys. 1908. V. 330. P. 337.
- [11] [http://www.orboptronix.com/pdfs/ETO\\_Catalog\\_Summer\\_2011.pdf](http://www.orboptronix.com/pdfs/ETO_Catalog_Summer_2011.pdf)
- [12] Вейнерт Д., Сполдинг Ч. Светодиодное освещение. Справочник (Пер. с англ.). Philips Solid-State Lighting Solutions, Inc., 2010. 149 с. [Weiner J., Spaulding C. LED Lighting Explained/ Phillips Solid-State Lighting Solutions, Inc., 2010. 123 p.].
- [13] Raukas M., Wei G., Bergenek K., Kelso J., Zink N., Zheng Y., Hannah M., Stough M., Wirth R., Linkov A., Jermann F., Eisert D. // Proceed. of SPIE. 2011. V. 7954. Art. 795415.