

Исследование вывода света из светодиодного модуля «CHIP-ON-BOARD»С. Н. Липницкая^{1,2,*}, К. Д. Мынбаев^{1,2,3}, Л. А. Никулина¹,В. Е. Бугров^{1,2}, А. Р. Ковш^{1,2}, М. А. Одноблюдов^{1,2}, А. Е. Романов^{1,2,3}¹Группа компаний «Оптоган», Россия, 198205, Санкт-Петербург, Таллинское ш. 206²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, 197101, Санкт-Петербург Кронверкский пр. 49³ФТИ имени А. Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26

(Статья поступила 20.09.2013; Подписана в печать 04.04.2014)

Проведена оптимизация светодиодного модуля, изготовленного по технологии «chip-on-board» (COB), с целью снижения потерь энергии в элементах модуля. Оптимизация проводилась с помощью численного моделирования и экспериментальных измерений образцов COB. Было исследовано влияние на вывод света формы оптического покрытия, отражающих свойств подложки, а также количества, размеров и расположения чипов. Выявлены оптимальные комбинации типа отражения подложки и формы оптического покрытия, позволяющие добиться максимального вывода света. Показано, что с помощью численного моделирования можно оптимизировать конструкцию светодиодных модулей без необходимости изготовления дорогостоящих экспериментальных образцов.

PACS: 85.60.Jb, 42.79.Wc, 42.15.Eq, 42.15.Dp

УДК: 535.3, 628.931, 628.936, 628.937

Ключевые слова: светодиод, chip-on-board, трассировка лучей

ВВЕДЕНИЕ

Современные светодиодные светильники используют две основные технологии: дискретные корпусированные светодиоды и интегральные светодиодные модули «чип-на-плате» (англ. «chip-on-board», COB). Модули COB представляют собой массив светодиодных чипов, установленных на единую керамическую подложку и покрытых общим слоем защитного материала (далее — оптическое покрытие), которое может содержать люминофор [1] (рис. 1). Они обладают рядом преимуществ по сравнению с корпусированными светодиодами: 1) более низкой стоимостью производства, 2) высокой удельной мощностью, 3) компактными размерами. Однако у COB возникают дополнительные потери световой энергии. В конструкции COB чипы находятся на небольшом расстоянии друг от друга, и часть света, выходящая из боковой поверхности чипа, поглощается боковыми поверхностями соседних чипов, к тому же лучи, которые претерпевают полное внутреннее отражение (ПВО) на границе оптическое покрытие/воздух, попадают обратно на поверхность чипов, где также частично поглощаются. В корпусированных светодиодах таких потерь не возникает, поскольку в них, как правило, используется один чип или массив чипов, каждый из которых находится в светоотражающем корпусе.

Принято считать, что основные факторы, которые влияют на вывод света из COB, следующие:

1. Взаимное расположение чипов и расстояние между ними, размеры и количество чипов.

2. Отражающие, поглощающие и рассеивающие свойства подложки.

3. Форма поверхности оптического покрытия и характеристики материала оптического покрытия, такие, как объемное рассеивание, поглощение света и коэффициент преломления.

В данной работе было проведено численное исследование влияния всех этих факторов на вывод света из COB. Расчеты проводились с помощью численного моделирования вывода света в коммерческой программе ZEMAX, использующей метод Монте-Карло для трассировки лучей [2]. Постановка и верификация численного моделирования осуществлялась на основании результатов вспомогательных экспериментов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ COB

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено четыре образца COB с девятью чипами на керамической подложке и прозрачным оптическим покрытием с разной формой поверхности:

1. Образец 1 (рис. 1а) — плоская поверхность оптического покрытия (показатель преломления $n = 1.4$, толщина покрытия 0.6 мм).
2. Образец 2 (рис. 2а) — на плоскую поверхность оптического покрытия установлена плоско-выпуклая линза из стекла К8 ($n_{K8} = 1.5$), имеющая радиус кривизны 14.8 мм, толщина линзы 4.17 мм, диаметр 16.92 мм, боковая поверхность линзы матированная.

*E-mail: Svetlana.Lipnitskaya@optogan.com

3. Образец 3 (рис. 2б) — на плоскую поверхность оптического покрытия установлены девять маленьких линз ($n = 1.4$). Линзы располагались над чипами, высота линз 0.4 мм, радиус кривизны 2 мм.

4. Образец 4 (рис. 2в, г) — над каждым чипом на поверхности оптического покрытия ($n = 1.4$) лазером вырезаны два кольца. Глубина колец $h = 0.2$ мм, радиусы внутреннего кольца $r_{inner} = 0.17$ мм, $r_{outer} = 0.45$ мм, радиусы внешнего кольца $R_{inner} = 0.6$ мм, $R_{outer} = 1.1$ мм.

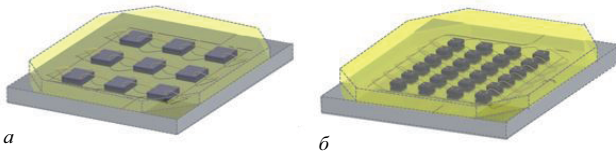


Рис. 1: Светодиодные модули COB с 9 и 24 чипами

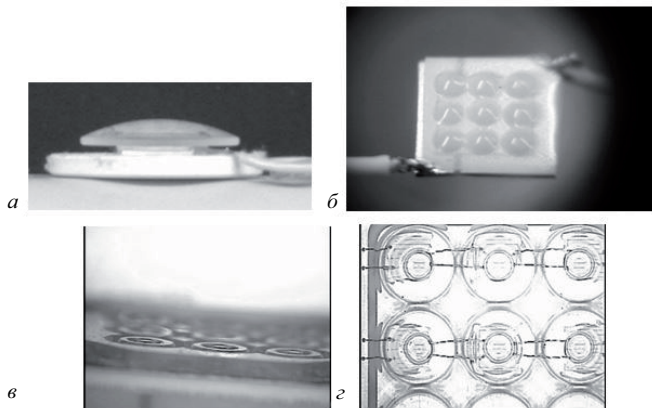


Рис. 2: Фотографии экспериментальных образцов модулей COB

Геометрические параметры элементов COB (длина/ширина/высота) были следующими: чип 1.2/1.2/0.14 мм, подложка 10/10/0.5 мм, расстояние между чипами составляло по 1.4 мм со всех сторон, отступ от чипа до края подложки составлял 1.8 мм, проволочные контакты отстояли от поверхности подложки максимум на 0.3 мм.

В лаборатории компании OPTOGAN на интегральной сфере Orb Optronix [3] были проведены измерения выходной мощности излучения светодиодных модулей COB. Результаты измерений и их сравнение с результатами верификационных расчетов приведены в разделе 2.2.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫВОДА СВЕТА ИЗ COB

А. Численная модель

В численной модели COB помещен в виртуальный сферический детектор, который фиксирует энергию лучей, покинувших COB.

В расчётах чипы моделировались как параллелепипеды из сапфира (поскольку именно сапфировая подложка занимает большую часть объёма чипа) с коэффициентом преломления $n_{chip} = 1.76$ и коэффициентом поглощения 0.1 см^{-1} . Нижняя грань чипа зеркально отражала 97% энергии, поглощала 3% энергии. Для всех расчетов моделировалось два типа источника: (1) боковые грани чипа излучали 30% световой энергии, а верхняя грань — 70% световой энергии, (2) верхняя грань чипа излучала 100% световой энергии. Распределение интенсивности излучения I в зависимости от угла θ задавалось в виде закона Ламберта:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

Такой упрощенный подход моделирования чипа предложен в [1], он позволяет значительно сократить время расчета, и подходит для моделирования оптических систем, в которых основным объектом исследования является первичная и вторичная оптика.

В расчетах использовался один из трех вариантов отражения подложки (см. рис. 3):

1. Зеркальное отражение, без рассеяния.
2. Отражение с диффузным рассеянием.
3. Отражение со смешанным рассеянием, соответствующее отражению керамической подложки экспериментальных образцов. Диаграмма отражения была получена экспериментально [4], её полуширина составляла примерно 20° . Для моделирования смешанного рассеяния была использована АВg модель ($A = 0.057$, $B = 0.005$, $g = 2$) [5].

Для всех вариантов отражения материал подложки поглощает 5% энергии.

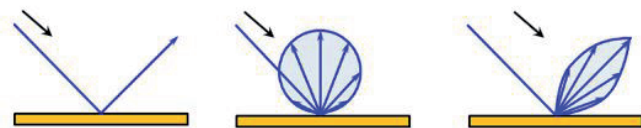


Рис. 3: Три варианта отражения подложки: зеркальное, диффузное, смешанное

При моделировании также были введены некоторые упрощения: 1) не учитывалось рассеяние и поглощение света проволочными соединениями, 2) поглощение

света материалом оптического покрытия явно не задавалось, однако в расчете указывалось максимальное количество отражений (4000), которое может испытывать луч.

В процессе обработки результатов определялись два параметра: 1) прирост энергии излучения для СОВ со структурированной поверхностью по сравнению с СОВ с плоской поверхностью (ΔU , %) оптического покрытия, и 2) потери энергии в конструкции СОВ (ΔU_{loss} , %). Эти параметры определялись следующим образом

$$\Delta U = \frac{U_{COB} - U_{COBflat}}{U_{COBflat}} * 100 \%$$

$$\Delta U_{loss} = \frac{U_{chip} - U_{COB}}{U_{chip}} * 100 \%$$

где U_{chip} — общая энергия лучей, излучаемых чипами, U_{COB} — общая энергия лучей, покинувших СОВ, $U_{COB flat}$ — общая энергия лучей, покинувших СОВ с плоской поверхностью оптического покрытия (образец 1, см. п. 1).

В. Проведение верификационных расчетов

Геометрия и оптические характеристики компонентов моделируемых СОВ соответствовали экспериментальным образцам. Результаты экспериментов и соответствующих расчетов приведены в таблице 1.

Проведенные расчеты и эксперименты показывают возможность увеличения эффективности вывода света из модулей СОВ путём текстурирования оптического покрытия. Результаты экспериментов хорошо согласуются с расчетными данными, незначительные различия связаны с упрощениями, введенными при численном моделировании.

С. Проведение оптимизационных расчетов

В [4] была определена оптимальная форма оптического покрытия, которая позволяет повысить энергию излучения по сравнению с СОВ с плоской поверхностью оптического покрытия на 10%. Требования к оптимальной форме заключаются в следующем: над каждым чипом расположена выпуклая линза сферической формы с минимально возможным радиусом кривизны (определяется расстоянием между чипами и их размерами), в остальных частях СОВ оптическое покрытие закрывает все проволочные соединения и наносится минимально тонким слоем. Также было показано, что аналогичный прирост энергии излучения можно достигнуть, если оптическое покрытие будет иметь форму сферической линзы с радиусом кривизны порядка половины ширины СОВ, такой оптический элемент проще в изготовлении, но является очень массивным.

Эти выводы были сделаны на основании результатов оптимизационных расчетов для СОВ с девятью чипами, и было сделано предположение, что такая оптимальная форма с индивидуальными линзами применима для СОВ с любым количеством чипов.

В настоящей работе были проведены расчеты, позволяющие выяснить оптимальные отражающие свойства подложки, а также оптимальное количество, размеры и расположение чипов.

Д. Оптимизация расположения, размеров и количества чипов

Было проведено шесть расчетов для СОВ с разным количеством, размером и расположением чипов, отражение подложки — смешанное. Параметры и результаты расчетов приведены в таблице 2. Из результатов расчетов следует, что наибольшее влияние на потери энергии оказывает площадь верхней поверхности чипов и расстояние между чипами. Чем меньше площадь и больше расстояние, тем меньше света попадает на чипы, что снижает потери энергии.

1. Оптимизация отражающих свойств подложки

Была проведена серия расчетов для двух конфигураций СОВ (СОВ1 и СОВ3 в таблице 2) и трех вариантов формы поверхности оптического покрытия: плоская поверхность, линзы над каждым чипом (рис. 4а, б), линза над всем СОВ с радиусом кривизны 6 мм (рис. 4в).

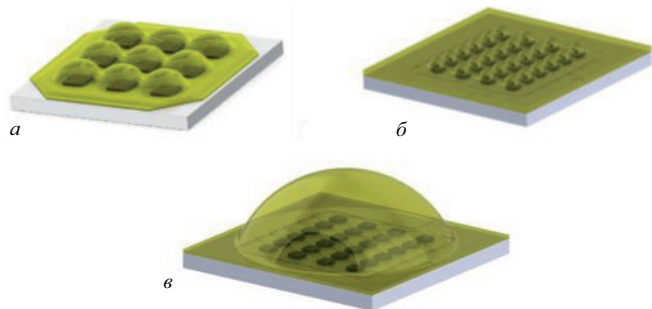








Рис. 4: Модули СОВ с 9 и 24 чипами с разной формой поверхности оптического покрытия

Расчеты проводились для первого типа источника, то есть боковые грани чипа излучали 30% световой энергии, а верхняя грань — 70% световой энергии. Результаты расчетов представлены на рис. 5. По результатам расчетов видно, что тип отражения подложки и форма поверхности защитного покрытия в значительной степени взаимосвязаны, и при оптимизации конструкции необходимо учитывать оба фактора. В случае плоского покрытия предпочтительнее использовать подложку, обладающую хорошими рассеивающими свойствами, а в случае покрытия с линзами лучше использо-

Таблица I: Результаты экспериментов и расчетов

Экспериментальные образцы (см. п. 1)	ΔU , %	
	Расчет (первый и второй тип источника)	Эксперимент
Образец 2	15–16.6	18
Образец 3	6.3–12.1	8
Образец 4	2.6–2.8	6.7

Таблица II: Результаты оптимизационных расчетов для COB с разным расположением, размерами и количеством чипов

№ COB	Общая верхняя площадь чипов, мм ²	Образец	Источник	ΔU_{loss} , %
COB1	12.96		1 тип	18
			2 тип	15
COB2	7.47		1 тип	18
			2 тип	15
COB3	7.47		1 тип	18
			2 тип	15
COB4	12.23		1 тип	19
			2 тип	16
COB5	14.73		1 тип	20
			2 тип	16
COB6	21.16		1 тип	21
			2 тип	17

вать подложку с зеркальным отражением. Также можно заметить, что для COB с 9 чипами наименьшие потери соответствуют оптическому покрытию с индивидуальными линзами над каждым чипом, а для COB с 24 чипами — покрытие с одной линзой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено численное и экспериментальное исследование вывода света из светодиодных модулей COB. Соответствие результатов экспериментов и расчетов позволяет сделать вывод о том, что с по-

мощью численного моделирования можно оптимизировать конструкцию светодиодных модулей без необходимости изготовления дорогостоящих экспериментальных образцов. Поиск оптимальной конструкции должен учитывать все факторы, влияющие на вывод света из COB. Как было показано, наименьшие энерге-

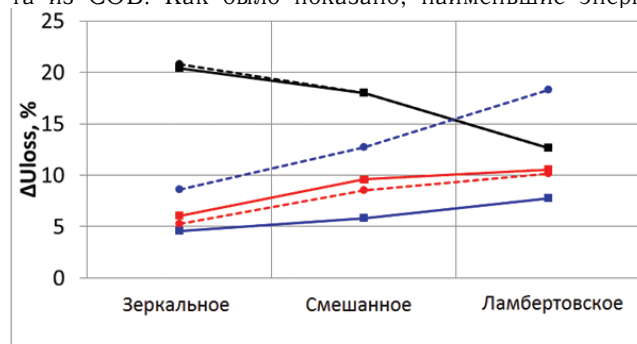


Рис. 5: Зависимость потерь энергии от отражения подложки, сплошные линии — COB с 24 чипами, пунктирные — с 9 чипами: черные линии — плоская заливка, красные линии — линзы над каждым чипом, синие линии — одна линза на весь COB

тические потери соответствуют COB с зеркальным отражением подложки и текстурированным оптическим покрытием. В случае с большим количеством маленьких чипов (24 чипа) лучше использовать оптическое покрытие, имеющее форму сферической линзы с радиусом кривизны, сопоставимым с половиной ширины COB, для COB с небольшим количеством чипов (9 чипов) оптимальным является оптическое покрытие с индивидуальными линзами над каждым чипом.

Авторы благодарят министерство образования и науки Российской Федерации за поддержку в выполнении работы (контракт № 14.516.11.0086).

[1] Liu S., Luo X. LED packaging for lighting applications: design, manufacturing and testing. (Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2011).

[2] Szirmay-Kalos L. Monte-Carlo methods in global illumination. Institute of Computer Graphics. Vienna University of Technology. (2000).

- [3] <http://www.orboptronix.com/pdfs/ЕТО/Catalog/Summer/2011.pdf>.
- [4] Липницкая С. Н., Мынбаев К. Д., Никулина Л. А., Бугров В. Е., Ковш А. Р., Одноблюдов М. А., Романов А. Е.

- Оптический журнал. **80**, В. 12. С. 45 (2013).
- [5] Freniere E., Groot G., Chase R. Proc. SPIE. **3130**. P. 128. (1997).

Investigation of light extraction from light emitting diode module «chip-on-board»

S. N. Lipnitskaya^{1,2,a}, K. D. Mynbaev^{1,2,3}, L. A. Nikulina¹, J. Ramchen¹, V. E. Bugrov^{1,2}, A. R. Kovsh^{1,2},
M. A. Odnoblyudov^{1,2}, A. E. Romanov^{1,2,3}

¹Optogan Group, Tallinskoe 206, 198205, Saint-Petersburg, Russia

²St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
Kronverskiy 49, 197101, Saint-Petersburg, Russia

³Ioffe Physical Technical Institute, Polytechnicheskaya 26, 194021, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: ^aSvetlana.Lipnitskaya@optogan.com

In the present research we optimize the design of light emitting diode module, produced using «chip-on-board» (COB) technology to reduce light energy losses in elements of module. Optimization was performed using numerical simulation and experimental research of COB samples. The influence of the encapsulating cover shape, reflecting substrate type, as well as the number, size and location of chips were investigated. The optimal combination of the reflecting substrate type and the encapsulating cover shape allowing to maximize light output was identified. The work demonstrated the possibility of numerical simulations to optimize the design of LED modules without making expensive experimental samples.

PACS: 85.60.Jb, 42.79.Wc, 42.15.Eq, 42.15.Dp.

Keywords: Light emitting diode, chip-on-board, ray tracing.

Received 20.09.2013.

Сведения об авторах

1. Липницкая Светлана Николаевна — аспирант каф. светодиодных технологий НИУ ИТМО; e-mail: Svetlana.lipnitskaya@optogan.ru.
2. Мынбаев Карим Джафарович — докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры СТ НИУ ИТМО; тел.: (812) 2927182, e-mail: karim.mynbaev@niuitmo.ru.
3. Никулина Лидия Андреевна — руководитель отдела исследования материалов ООО «ОПТОГАН.НТС»; e-mail: lidiya.nikulina@optogan.com.
4. Бугров Владислав Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, зав. каф. светодиодных технологий НИУ ИТМО; тел.: (812) 326-32-85, доб.1016, e-mail: bugrov@grv.ifmo.ru.
5. Ковш Алексей Русланович — докт. физ.-мат. наук, исполнительный вице-президент ГК «ОПТОГАН»; тел.: (812) 326-32-85, e-mail: alexey.kovsh@optogan.ru.
6. Одноблюдов Максим Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, генеральный директор ЗАО «ОПТОГАН»; тел.: (812) 326-32-85, e-mail: maxim.odnoblyudov@optogan.ru.
7. Романов Алексей Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, руководитель научного отдела ООО «ОПТОГАН.НТС»; тел.: (812) 406-80-67, e-mail: alexey.romanov@optogan.com.