

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫВОДА СВЕТА ИЗ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ “CHIP-ON-BOARD”

© 2013 С. Н. Липницкая^{*,**}, аспирант; К. Д. Мынбаев^{*,**,**}, доктор физ.-мат. наук; Л. А. Никулина^{*}; В. Е. Бугров^{*,**}, канд. физ.-мат. наук; А. Р. Ковш^{*,**}, доктор физ.-мат. наук; М. А. Одноблюдов^{*,**}, канд. физ.-мат. наук; А. Е. Романов^{*,**,**}, доктор физ.-мат. наук

* Группа компаний «ОПТОГАН», Санкт-Петербург

** НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

*** ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: Svetlana.Lipnitskaya@optogan.com

Рассмотрена оптимизация конструкции светодиодных устройств, изготовленных по технологии “chip-on-board” (“чип-на-плате”). Проведен анализ световых потерь, и предпринята попытка создания оптического элемента, позволяющего максимально эффективно выводить свет из чипов. Проведены экспериментальные измерения опытных образцов и оптимизационные расчеты с использованием программного пакета Zemax. В результате исследований получена оптимизированная форма оптического элемента, которая позволяет снизить световые потери в устройстве на 10% по сравнению с исходной конструкцией.

Ключевые слова: светодиоды, светодиодные модули, chip-on-board, вывод света, трассировка лучей.

Коды OCIS: 080.2205, 080.2468, 230.3670, 290.5880.

Поступила в редакцию 29.04.2013.

Введение

Современные осветительные устройства на базе светодиодов часто используют светодиодные модули, выполненные по технологии “chip-on-board” (COB) [1, 2]. Такие модули представляют собой массив светодиодных чипов, установленных на единую подложку и покрытых общим защитным слоем, который может содержать люминофор.

У модулей COB (МСОВ) есть ряд преимуществ по сравнению с корпусированными светодиодами: более дешевое производство, высокая удельная мощность, компактные размеры, удобство монтажа. Основным недостатком МСОВ следует считать дополнительные, по отношению к корпусированным светодиодам и их массивам, потери световой энергии. В конструкции МСОВ, где чипы находятся на небольшом расстоянии друг от друга, часть света,

выходящего из боковой поверхности чипа, поглощается боковыми поверхностями соседних чипов. Кроме того, лучи, которые претерпевают полное внутреннее отражение (ПВО) на границе, защитное покрытие–воздух, возвращаются на поверхность чипов, где частично поглощаются. В корпусированных светодиодах, где каждый чип находится в светоотражающем корпусе, взаимного поглощения света чипами не происходит. Потери света, связанные с поглощением света подложкой и защитным покрытием, свойственны и корпусированным светодиодам, и МСОВ.

Анализ литературы показывает, что проблема повышения эффективности вывода света из светодиодных устройств ранее в основном решалась для индивидуальных чипов. В обзоре [3] приведены основные подходы, применяемые для повышения эффективности вывода света из светодиодов. Большинство подходов предпо-

лагают модификацию светодиодного чипа (изменение формы, текстурирование поверхности чипа, использование в конструкции чипа различных отражателей и др.). Из рассмотренных в обзоре способов повышения эффективности вывода света наиболее простым и возможным в применении для МСОВ является текстурирование поверхности защитного покрытия, нанесенного на светодиодный чип.

В [4] предложено наносить на поверхность светодиодного чипа тонкий слой полистирола с микросферами из SiO_2 , образующими на поверхности чипа массив из микролинз, что позволяет увеличить количество света, не претерпевающего ПВО на границе светодиодный чип–воздух. Аналогичный подход рассмотрен в [5], где на поверхность светодиодного чипа предлагается наносить прозрачный полимер, поверхность которого имеет микротекстуру. Рассмотрены микротекстуры с треугольным и синусоидальным профилем.

Меры по повышению эффективности вывода света, описанные в [4] и [5], рассмотрены для индивидуального светодиодного чипа. В этих работах проводилось численное моделирование исследуемых конструкций светодиодов и были изготовлены экспериментальные образцы.

В патентах [6] и [7] предложены способы повышения эффективности вывода света из конструкции модуля типа СОВ, предусматривающие формирование линз на поверхности геля, без детального исследования влияния формы линз и их размеров на вывод света.

Целью данной работы был поиск оптимальной формы оптического элемента, формируемого из защитного покрытия, которая позволила бы уменьшить потери света из всех чипов и конструкции МСОВ в целом. При изготовлении таких оптических элементов должны использоваться уже известные и применяющиеся в светодиодной технологии материалы и методики их обработки при минимальном расходе этих материалов. Оптимизация проводилась с помощью численного моделирования и экспериментального исследования опытных образцов.

1. Экспериментальные исследования выхода света из модуля СОВ

В качестве исходных данных для определенности была взята реально существующая конструкция МСОВ (рис. 1), которая содержит девять светодиодных чипов, соединенных про-

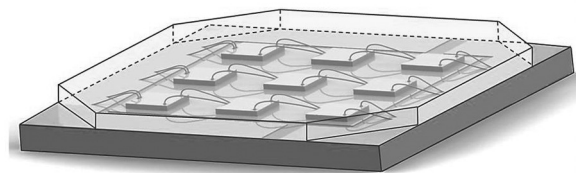


Рис. 1. Исходная конструкция модуля СОВ.

волочными контактами. В исходной конструкции МСОВ чипы и контакты залиты ровным слоем защитного покрытия (обычно это прозрачный силиконовый эластомер, далее называемый просто “гелем”), который может содержать люминофор. Геометрические параметры МСОВ следующие: подложка и чипы имеют форму квадрата со стороной чипа 1,2 мм и подложки 10 мм, толщина чипа 0,14 мм, толщина слоя геля 0,6 мм, расстояние между чипами по 1,4 мм со всех сторон, отступ от чипа до края подложки 1,8 мм, проволочные контакты отстоят от поверхности подложки максимум на 0,3 мм.

Задача оптимизации оптического элемента решалась варьированием формы верхней поверхности защитного геля таким образом, чтобы свести к минимуму количество лучей, претерпевающих ПВО на границе гель–воздух. В качестве предварительных вариантов при конструировании оптического элемента рассматривалась возможность формирования общей линзы для всей конструкции МСОВ и вариации индивидуальных линз для каждого чипа на подложке.

В лаборатории компании OPTOGAN были измерены значения светового потока, диаграммы направленности и распределение цветовой температуры по углу для исходного МСОВ, а также для двух его модификаций с общей и индивидуальными линзами. В качестве метода измерения светового потока был выбран гониофотометрический [8].

Для достижения высокой точности использовались два закрепленных рядом МСОВ исходной конструкции, один из которых являлся “калибровочным”. Модули были приклеены к круглым керамическим подложкам диаметром 26 мм с диффузным отражением. Образцы закреплялись на одном держателе, который поворачивался с шагом 10° , и на каждом шаге поочередно снимались показания фотоприемника. Оценивалась разница в световом потоке этих модулей, которая учитывалась при сле-

Таблица 1. Результаты предварительных расчетов и экспериментов

Оптический элемент	Прирост по сравнению с исходным вариантом, %		Разница между экспериментальным и расчетным приростом, %
	Эксперимент	Расчет	
1 большая линза, гель без люминофора	18	14,9	3,1
1 большая линза, гель с люминофором	3	7,9	-4,9
9 маленьких линз, гель и линзы с люминофором	9,7	9,3	0,4

дующем измерении уже модифицированного модуля СОВ.

Были исследованы следующие экспериментальные образцы:

1) исходный (“калибровочный”) МСОВ с ровной поверхностью геля, не содержащего люминофор;

2) исходный (“калибровочный”) МСОВ с ровной поверхностью геля, содержащего люминофор;

3) модифицированный МСОВ: на гель, не содержащий люминофор, установлена плосковыпуклая линза из стекла К8 (коэффициент преломления $n_{K8} \approx 1,5$), имеющая радиус кривизны 14,8 мм, толщина линзы 4,17 мм, диаметр 16,92 мм, боковая поверхность линзы матированная;

4) модифицированный МСОВ: на гель, содержащий люминофор, установлена плосковыпуклая линза из стекла К8 с аналогичными параметрами;

5) модифицированный МСОВ: на гель, содержащий люминофор, наклеены 9 маленьких линз из того же материала (геля с люминофором); линзы располагались над чипами, высота линз 0,4 мм, радиус кривизны 2 мм.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

2. Моделирование выхода света из модуля СОВ

На основании постановки экспериментов были проведены численное моделирование и сопоставление его результатов с данными прямых

измерений на образцах светодиодных модулей. Моделирование вывода света производилось в программном пакете Zemax, использующем метод Монте-Карло для трассировки лучей [9]. В Zemax есть возможность задавать различные оптические свойства материалов, такие как поглощение, рассеяние и отражение света, коэффициент преломления.

2.1. Расчетная модель

Моделируемая исходная конструкция МСОВ соответствует экспериментальному образцу (рис. 1). При моделировании были введены некоторые упрощения, например, не учитывалось наличие проволочных контактов. Источник света (светодиодный чип) тоже был несколько упрощен. Так, в модели чип представлял собой параллелепипед, боковые грани которого излучали 30% световой энергии, а верхняя грань – 70% световой энергии. Распределение интенсивности излучения I в зависимости от угла θ на каждой поверхности задавалось как $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$. Всего со всех поверхностей запускалось порядка 5×10^5 лучей, максимальное количество отражений или пересечений с объектами задавалось равным 100, минимальная учитываемая мощность луча составляла 0,1% от исходной.

2.2. Свойства материалов

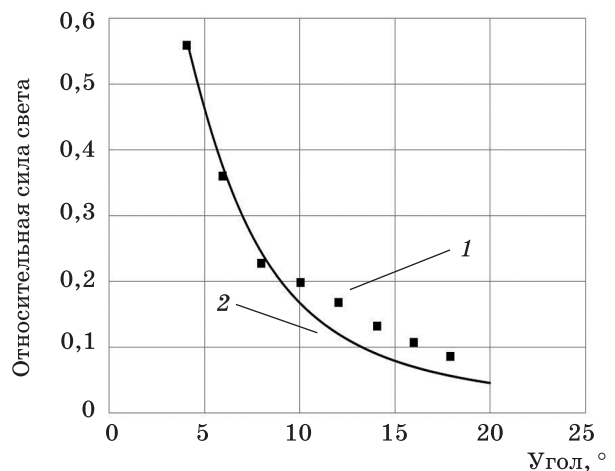


Рис. 2. Диаграмма отражения подложки МСОВ. 1 – эксперимент, 2 – расчетная модель рассеивания “ABg”.

Полученная экспериментально диаграмма отражения подложки показана на рис. 2, ее полуширина составляет примерно 20° . При моделировании были заданы следующие характеристики материала подложки: 5% энергии поглощается, 5% энергии зеркально отражается, 90% энергии рассеивается диффузно в соответствии с диаграммой, изображенной на рис. 2. Диффузное рассеяние задается с помощью модели “ABg” [10].

Свойства геля также были определены экспериментально и использовались при моделировании: коэффициент преломления $n_{\text{гель}} = 1,4$, пропускание света при толщине слоя 4 мм на длине волны света $0,45 \text{ мкм}$ – 95%, на длине волны $0,57 \text{ мкм}$ – 97%. При моделировании геля, содержащего люминофор, задавалось объемное рассеяние с помощью модели “phosphor” [10]. В параметрах модели “phosphor” задавались размер частиц люминофора и их концентрация, которые соответствовали реальному образцу МСОВ: концентрация частиц 13,4%, диаметр частиц $D = 15 \text{ мкм}$. Чип испускал свет длиной волны $\lambda_{\text{чип}} = 0,45 \text{ мкм}$, длина волны люминесценции люминофора $\lambda_{\text{люм}} = 0,57 \text{ мкм}$.

В расчетах чип моделировался как параллелепипед из сапфира с коэффициентом преломления $n_{\text{чип}} = 1,76$ и пропусканием света с длиной волны $0,45 \text{ мкм}$ 82% при толщине слоя 2 мм. Предполагалось, что поверхность чипа со стороны подложки покрыта серебром и поглощает 7% световой энергии, а 93% зеркально отражает.

2.3. Порядок расчетов

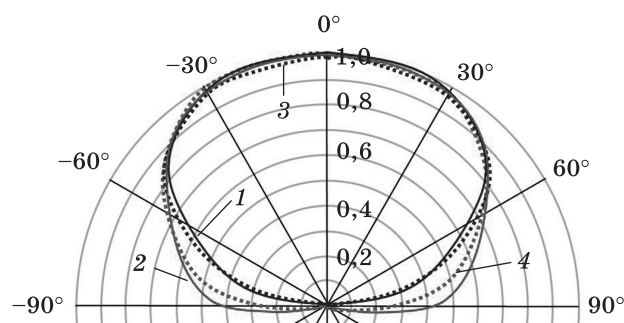


Рис. 3. Расчетные (1 и 2) и экспериментальные (3 и 4) диаграммы направленности света для двух образцов МСОВ без люминофора. 1 и 3 – исходная конструкция СОВ, 2 и 4 – конструкция МСОВ с одной линзой.

Для оценки правильности выбранной расчетной модели был проведен ряд подготовительных расчетов, постановка которых соответствовала вышеописанным экспериментам с незначительными упрощениями.

Первый расчет был проведен для исходной геометрии МСОВ. Была проведена оценка энергетических потерь, т. е. вычислена разница между энергией лучей, вышедших с поверхности чипов, и энергией лучей, покинувших МСОВ. Во всех остальных расчетах модифицированных МСОВ также оценивался уровень энергетических потерь, который сравнивался с исходным. Так определялся энергетический прирост вывода света для модифицированных вариантов модулей по сравнению с исходным МСОВ с плоской поверхностью геля. Для всех предварительных расчетов также проводилась оценка энергии лучей, которые не претерпевали ПВО на поверхности гель-воздух. Результаты подготовительных расчетов сравнивались с экспериментом.

После подготовительных расчетов были проведены оптимизационные расчеты, которые включали в себя исследование энергетического прироста выхода света из МСОВ в случае изменения формы поверхности геля. Все варианты форм поверхности геля можно условно разбить на три типа:

- 1) на ровный слой геля нанесена одиночная выпуклая линза, варьировались форма линзы (сферическая, биконическая) и ее радиус кривизны;
- 2) на ровный слой геля нанесены 9 маленьких линз, которые расположены над чипами, варьировались геометрические размеры (кривизна) линз и их форма;

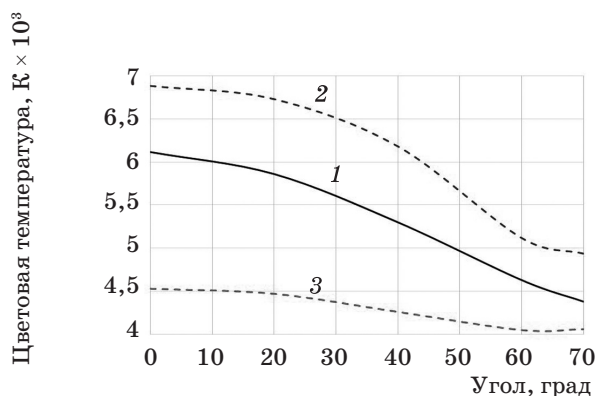


Рис. 4. Распределение по углу цветовой температуры. 1 – исходная конструкция МСОВ, 2 – конструкция МСОВ с одной линзой, 3 – конструкция МСОВ с девятью индивидуальными линзами.

Таблица 2. Результаты оптимизационных расчетов

Вариант расчета	Оптический элемент	Высота базовой толщины геля, мм	Прирост выхода света, %
1	1 сферическая линза, $R_c = 10$ мм, $h_{\text{макс}} = 1,35$ мм	0,6	5
2	1 сферическая линза, $R_c = 6$ мм, $h_{\text{макс}} = 2,7$ мм	0,6	10
3	1 биконическая линза, $R_x = R_y = 15$ мм, $h_{\text{макс}} = 1,8$ мм	0,6	3
4	1 биконическая линза, $R_x = R_y = 10$ мм, $h_{\text{макс}} = 3$ мм	0,6	11
5	1 линза, $h_{\text{макс}} = 2$ мм	0,1	5
6	1 линза, $h_{\text{макс}} = 1,5$ мм	0,1	3
7	1 линза, $h_{\text{макс}} = 1,2$ мм	0,1	3
8	1 линза, $h_{\text{макс}} = 1$ мм	0,1	2
9	9 сферических линз, $R_c = 1,5$ мм, $h_{\text{макс}} = 0,6$ мм	0,6	8
10	9 сферических линз, $R_c = 2$ мм, $h_{\text{макс}} = 0,4$ мм	0,6	8
11	9 сферических линз, $R_c = 2,5$ мм, $h_{\text{макс}} = 0,31$ мм	0,6	7
12	9 линз цилиндрической формы, $h_{\text{макс}} = 0,4$ мм	0,4	5
13	9 сферических линз, $R_c = 2$ мм, $h_{\text{макс}} = 0,4$ мм	0,4	7
14	9 линз с изменяемым радиусом кривизны, $h_{\text{макс}} = 0,4$ мм	0,4	7
15	9 линз конусовидной формы, $h_{\text{макс}} = 0,4$ мм	0,4	6
16	9 линз $h_{\text{макс}} = 0,7$ мм, над контактами $h_{\text{мин}} = 0,45$ мм	0,1	5
17	9 линз $h_{\text{макс}} = 0,8$ мм, над контактами $h_{\text{мин}} = 0,45$ мм	0,1	8
18	9 линз $h_{\text{макс}} = 0,9$ мм, над контактами $h_{\text{мин}} = 0,47$ мм	0,1	9
19	9 линз $h_{\text{макс}} = 1$ мм, над контактами $h_{\text{мин}} = 0,5$ мм	0,1	10
20	9 линз $h_{\text{макс}} = 1,4$ мм, над контактами $h_{\text{мин}} = 0,67$ мм	0,1	11

Примечание. R_c – радиус кривизны линзы; R_x, R_y – радиусы кривизны линзы по осям x и y соответственно; h – высота линзы.

3) оптический элемент, изготовленный из геля, имеет различную толщину в разных частях модуля: над чипами он имеет форму выпуклой линзы, над контактами его толщина была достаточна для того, чтобы их закрывать, в остальных частях МСОВ толщина оптического элемента минимальна (0,1 мм); варьировался радиус кривизны линз над чипами.

3. Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены результаты предварительных расчетов и их сравнение с результатами эксперимента. Как видно из табл. 1, в расчетах наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. Различие результатов эксперимента и расчета может быть объяснено тем, что при моделировании СОВ использовались некоторые упрощения (см. п. 2.1)

На рис. 3 приведены диаграммы направленности света для двух образцов МСОВ, измерен-

ные экспериментально и рассчитанные с помощью Zemax. Как видно из рисунков, различие экспериментально измеренных и рассчитанных диаграмм направленности незначительно и может быть объяснено тем, что в расчете для описания выхода света из светодиодного чипа использована упрощенная модель.

Для экспериментальных образцов МСОВ проводились измерения цветовой температуры – одной из важнейших характеристик осветительных устройств. На рис. 4 приведены полученные в эксперименте распределения цветовой температуры по углу; 0° соответствует плоскости, перпендикулярной поверхности МСОВ.

Из данных эксперимента видно, что в случае одной большой линзы и геля с люминофором прирост вывода света намного меньше, чем в случае геля без люминофора. При установке линзы происходит увеличение эффективности вывода синего света. При этом часть синего света, которая в исходной конструкции МСОВ претерпевала ПВО и попадала обратно в гель, где возбуждала свече-

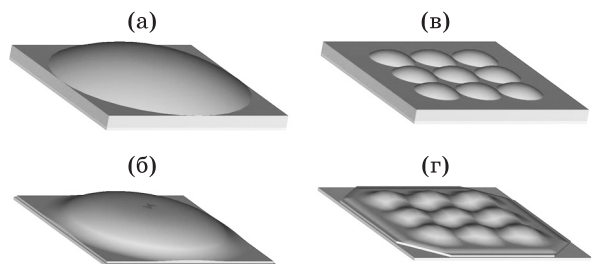


Рис. 5. Варианты расчета оптических элементов (по табл. 2). а – № 1, б – № 6, в – № 10, г – № 16.

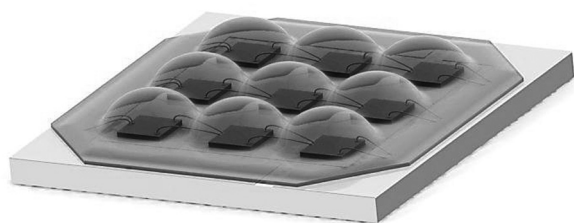


Рис. 6. МСОВ с оптимизированной формой геля (вариант расчета № 19).

ние частиц люминофора, теперь покинула МСОВ. В результате в вышедшем свете становится больше света с $\lambda_{\text{чип}} = 0,45$ мкм, но меньше света с $\lambda_{\text{лом}} = 0,57$ мкм. На рис. 4 видно, что свет приобретает более “холодный” оттенок, по сравнению с исходным МСОВ. Поскольку в эксперименте измеряется световой поток с учетом кривой видимости глаза, то прирост вывода света оказывается меньше чем в расчете, где вычисляются энергетические характеристики света. Такая модификация МСОВ, как и исходный МСОВ, имеет неоднородное распределение цветовой температуры по углу. В случае, когда линзы маленькие и содержат люминофор, неоднородности в распределении цветовой температуры не возникает. Как видно из рис. 4, свет становится более “теплым”, а распределение цветовой температуры по углу становится даже более равномерным, чем для исходного МСОВ. Данный эффект должен быть учтен при подборе люминофорной смеси при производстве оптимизированных МСОВ.

Чтобы оценить влияние дополнительного оптического элемента на эффективность вывода света, была проведена оценка энергии лучей, которые покидают МСОВ сразу и не испыты-

вают ПВО на границе гель–воздух. Для геля с плоской поверхностью энергия лучей, не претерпевающих ПВО, составляет порядка 40% от энергии всех запущенных лучей, для одной большой линзы – 78%, а для девяти маленьких линз – 60%.

Для упрощения оптимизационные расчеты проводились для случая, когда гель не содержит люминофор.

В табл. 2 приведены результаты оптимизационных расчетов. Прирост выхода света определялся как разница между энергетическими потерями для оптимизированной и исходной геометрии.

В ходе оптимизационных расчетов варьировались такие параметры, как форма, высота и радиус кривизны линз, толщина плоского слоя геля.

Анализ результатов расчетов показывает, что у каждого конструктивного решения есть свои достоинства и недостатки. Одна сферическая линза, установленная на исходную конструкцию МСОВ (варианты 1–4 в табл. 2, рис. 5а), по результатам расчетов может дать прирост выхода света порядка 3–11% в зависимости от размера линзы. Такой вариант модификации прост при конструировании – достаточно приклеить на исходные МСОВ изготовленные отдельно линзы, как это было сделано в эксперименте. Чем меньше радиус кривизны линзы (чем она выше), тем больше прирост выхода света она дает. Поэтому, чтобы получить существенный выигрыш, надо брать достаточно большую линзу, высотой порядка 3 мм. Очевидно, что такая линза является очень массивной, к тому же, если гель содержит люминофор, то распределение цветовой температуры по углу очень неравномерно.

Варианты конструкций оптического элемента 5–8 в табл. 2 и вар. 2 на рис. 5б также представляют собой одиночную выпуклую линзу, нанесенную на тонкий (0,1 мм) слой геля. Эта выпуклая линза имеет непостоянный радиус кривизны, поэтому ее основной характеристикой можно считать высоту. Рассмотренные линзы дают небольшой прирост вывода света, порядка 2–5%, так как низкие линзы с большим радиусом кривизны в их центральной части мало отличаются от плоской поверхности геля.

Нанесение на исходный МСОВ девяти небольших сферических линз над чипами (варианты 9–11, рис. 5в) позволяет увеличить выход света на 7–8%. Это решение достаточно просто для осуществления на практике, оно было реализовано в экспериментальном образце. Оно лишено недостатков, присущих массивной одиночной линзе, так как в данном случае опти-

ческий элемент достаточно компактен и имеет максимальную высоту с учетом высоты геля порядка 0,8–1,2 мм. Как отмечалось выше, в этом варианте более равномерным оказывается и распределение цветовой температуры по углу в случае, если гель содержит люминофор.

При исследовании влияния формы малых линз на эффективность вывода света (варианты расчета 12–15) было установлено, что оптимальный вариант формы линзы – это сферическая (или близкая к сферической) линза.

Дальнейшие модификации вариантов с девятью линзами представляют собой оптический элемент, поверхность которого можно условно назвать “волнистой” (варианты расчета 16–20, рис. 5г). Над чипами оптический элемент имеет форму выпуклой линзы, над контактами его толщина плавно уменьшается, но при этом гель продолжает полностью закрывать контакты, в остальных частях модуля толщина элемента плавно уменьшается до минимальной (0,1 мм). Вся конструкция соответствует возможностям изготовления с помощью технологии молдинга (molding). В данном варианте также прослеживается уже упомянутая выше тенденция – чем выше линзы, тем больше эффективность вывода света. Для таких вариантов конструкции прогнозируемый прирост света составляет 5–11%, при том что максимальная высота геля, в зависимости от варианта, равна 0,8–1,5 мм.

Таким образом, проведенные расчеты и эксперименты показывают возможность увеличения эффективности вывода света из модулей COB путем формирования оптического элемента из защитного покрытия, наносимого на светодиодные чипы. В частности, из рассмотренных в данной работе вариантов конструкций оптического элемента можно выбрать его оптимальную

форму, обладающую небольшими размерами и обеспечивающую улучшение вывода света на 10% (рис. 6). Использование подобного элемента обеспечивает равномерное распределение цветовой температуры по углу. Верхняя поверхность этого элемента является “волнистой”, с линзами высотой 1 мм над чипами, в местах расположения электрических контактов высота геля плавно уменьшается до 0,5 мм, в остальной части MCOB высота геля составляет 0,1 мм.

Выводы

В экспериментальных и расчетных исследованиях оптических характеристик модуля COB показано, что повышение эффективности вывода света может быть достигнуто с помощью оптимизации формы оптического элемента из материала защитного покрытия. Оптический элемент должен обеспечивать минимальное количество лучей, претерпевающих полное внутреннее отражение на границе покрытие–воздух и иметь небольшие размеры, так как материал покрытия сам поглощает свет.

Основные требования к оптимальной форме оптического элемента следующие: над каждым чипом расположена выпуклая линза сферической (или близкой к сферической) формы, с минимально возможным радиусом кривизны (определяется расстоянием между чипами и их размерами), в остальных частях модуля COB защитное покрытие закрывает все проволочные соединения и наносится минимально тонким слоем.

Авторы благодарят министерство образования и науки Российской Федерации за поддержку в выполнении работы (контракт № 14.513.11.0019).

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oliver Kückmann*. High power LED arrays special requirements on packaging technology // PerkinElmer ELCOS GmbH, Paffenhofen, Germany, 8 p.
2. *Paul Hartmann, Franz P. Wenzl, Christian Sommer, Peter Pachler, Hans Hoschopf, Marko Schweighart, Martin Hartmann, Ladislav Kuna, Georg Jakopic, Guenther Leising, and Stefan Tasch*. White LEDs and Modules in Chip-on-Board Technology for General Lighting // Proc. SPIE. 2006. V. 6337. P. 63370I-1–63370I-7.
3. *Zhmakin A.I.* Enhancement of light extraction from light emitting diodes // Physics Reports. 2011. V. 498. P. 189–241.
4. *Yik-Khoon Ee, Pisist Kumnorkeaw, Ronald A. Arif, Hua Tong, Hongping Zhao, James F. Gilchrist, Nelson Tansu*. Optimization of Light Extraction Efficiency of III-Nitride LEDs With Self-Assembled Colloidal-Based Microlenses // IEEE journal of selected topics in quantum electronics. 2009. V. 15. № 4. P. 1218–1225.

5. *Kui Bao, Bei Zhang, Xiang Ning Kang, Tao Dai, Chang Xiong, Guo Yi Zhang, Yong Chen.* Improvement of Light Extraction from Micro-Pattern Encapsulated GaN-based LED by Imprinting// Proc. SPIE. 2008. V. 6910. P 69100N-1–69100N-8.
 6. *Seong Ah Joo, Jung Kyu Park, Kun Yoo Ko, Young June Jeong, Seung Hwan Choi.* Light emitting diode package// United States Patent 8168997. 2012.
 7. *Tao Xu.* Surface-Textured Encapsulations for use with Light Emitting Diodes// United States Patent Application Publication 2011/0316006. 2011.
 8. *Круглов О.Е., Кузьмин В.Н., Томский К.А.* Измерение светового потока светодиодов // Светотехника. 2009. № 3. С. 34–36.
 9. *Szirmay-Kalos L.* Monte-Carlo methods in global illumination. Vienna: Institute of Computer Graphics, Vienna: University of Technology, 2000. 118 p.
 10. Zemax User's Manual, January, 2012. 835 p.
-