

Вольфганг Немитц (Wolfgang Nemitz) | Франц П. Венцль (Franz P. Wenzl) |
 Сюзанна Швейцер (Susanne Schweitzer) | Кристиан Зоммер (Christian Sommer) |
 Пауль Хартман (Paul Hartmann) | Иоган Николикс (Johann Nicolics)
 Перевод: Василина Рочева

Итерационный оптико-тепловой метод

для точного моделирования белых светодиодов

➔ Разработка светодиодов белого цвета свечения на основе люминофоров, со стабильными параметрами как во времени, так и при изменениях температур, по-прежнему остается сложной задачей. Расчет таких параметров, как, например, поведение характеристик светодиодов в зависимости от температуры, может ускорить поиск решения проблемы. В статье предложен итерационный метод, заключающийся в объединении оптического и теплового численного моделирования.



Общий подход для получения белого света опирается на сочетание синего света светодиодного чипа с возбужденным излучением люминесцирующего вещества. Люминофор является частью элемента преобразования цвета (Color Conversion Element, CCE), обычно состоящего из частиц люминофора, погруженных в силиконовую матрицу. Как было показано ранее, координаты цветности, а также качество белого света сильно зависят от состава и расположения CCE в пределах конструкции светодиода. Кроме того, оптические свойства материалов, составляющих CCE, и их температурная зависимость, как и соответствующие термооптические коэффициенты, имеют огромное влияние на постоянство координат цветности. Для люминофоров характерна проблема уменьшения интенсивности люминесценции с ростом температуры, которая является еще одним фактором, влияющим на постоянство значений координат цветности, так как основная тепловая нагрузка светодиодов во время работы приходится на CCE.

Комбинированная оптическая и тепловая методика моделирования позволяет с высокой точностью прогнозировать тепловое поведение белого светодиода. Она опирается на итерационное оптическое и тепловое моделирование с использованием ASAP — инструмента для трассировки лучей при оптическом моделировании, и Gmsh/GetDP — программное обеспечение с открытым кодом для теплового моделирования. Итерационное сочетание этих программ позволяет учитывать зависимость оптических свойств соответствующих материалов от температуры. Сами итерации повторяются до тех пор, пока не перестает изменяться распределение температуры в CCE, что является одним из возможных критериев остановки расчета.

Предложенная итерационная методика позволяет прогнозировать тепловую нагрузку и изменение координат цветности белых светодиодов для различных значений прямого тока. Результаты моделирования проверены путем измерений характеристик светодиодов, изготовленных в соответствии с моделями, использованными при расчетах.

Такие критерии, как эффективность и качество белого света, являются причинами, из-за которых люди зачастую

не решаются заменять традиционные источники света светодиодными светильниками [1]. В связи с этим было высказано предположение о том, что цветовые различия между отдельными светодиодами должны оставаться в рамках двухступенчатого эллипса МакАдама [2]. Это сложная задача для наиболее распространенного типа белых светодиодов, спектр которых определяется сочетанием света синего светодиода и возбужденного излучения от одного или нескольких люминофоров, помещенных в силиконовую матрицу. Состав и расположение этих ССЕ в светодиоде имеют огромное влияние на качество белого света, а также на общий световой поток белого светодиода [3–4]. Кроме того, люминофоры склонны к уменьшению интенсивности люминесценции с ростом температуры, и, следовательно, для определения цветовых сдвигов абсолютно необходимо иметь детальное знание о распределении температуры в светодиоде. Энергетическая яркость синего цвета, излучаемого обычными светодиодными чипами, достигает нескольких сотен Ватт на квадратный сантиметр, что обуславливает появление значительного нагрева. Другим источником тепла являются потери, обусловленные сдвигом Стокса в ССЕ, когда первичный синий свет преобразуется в излучение люминофора. Таким образом, задача заключается в поддержании температуры светодиодного чипа и люминофора постоянной и как можно более низкой. Для определения их тепловых характеристик были проанализированы различные решения [5–6]. Помимо этого, в последних исследованиях показано, что наиболее высокая температура белого светодиода во время работы может быть локализована именно в ССЕ [7]. Поэтому, в частности, необходимо иметь подробную информацию о распределении температуры в ССЕ.

При определении тепловых характеристик мощных светодиодов предполагается, что активная область светодиода (полупроводниковый переход) является изотермической. Один из способов определить эту эффективную температуру перехода — использовать температурную зависимость прямого напряжения светодиода [9–10]. К сожалению, геометрия расположения электродов и высокая удельная мощность приводят к ожидаемому неоднородному распределению температуры в светодиоде. Само по себе это неоднородное распределе-

ние температуры влияет на ССЕ, вызывая нагрев силиконовой матрицы и частиц люминофора.

Показано, что итерационный метод комбинирования оптических и тепловых расчетов позволяет получить точную информацию о температурном распределении внутри чипа и ССЕ и, следовательно, получить достоверные данные об изменении координат цветности белых светодиодов во время работы при разных токах.

Оптическое моделирование

Как правило, метод оптического моделирования основывается на настройке имеющейся модели, подходящей для синего излучающего светодиодного чипа, и добавлении ССЕ на поверхность чипа (подробности см. в [3]). ССЕ квадратной формы с плоской поверхностью состоит из частиц люминофора на основе ортосиликата, встроенных в силиконовую матрицу (рис. 1). Оптическое моделирование проводилось с использованием коммерческого программного продукта ASAP.

Синий светодиодный чип имеет размеры 880×880 мкм, а размеры активного слоя составляют 850×850 мкм. Высота чипа — 170 мкм. Клеевой слой моделируется в виде тонкой пленки (8 мкм) чистого силикона с размерами, как и у ССЕ (936×936 мкм). Он непосредственно расположен на верхней части светодиодного чипа. ССЕ в данном исследовании имеет длины сторон 936 мкм и высоту 256 мкм. Он расположен непосредственно на верхней части клеевого слоя.

В этом моделировании рассматриваются две длины волны, одна из которых представляет синий свет чипа (460 нм), а другая — переизлученный желтый свет (565 нм). Предполагается, что только синий свет будет поглощаться частицами люминофора, поэтому коэффициент поглощения люминофора — ноль для желтого света и 1×10^{-3} для синего. Рассеяние как синего света чипа, так и переизлученного желтого света в ССЕ описывается рассеянием Ми. Люминофорные частицы в среднем имеют радиус 7,8 мкм со стандартным отклонением 4,2 мкм. Объемная концентрация частиц люминофора в силиконовой матрице составляет 11,5%. Показатели преломления силикона (использованного для ССЕ, а также для клеевого слоя) и люминофора остаются постоянными и составляют 1,4 и 1,63 для обеих длин волн при комнатной температуре (+25 °C). Термооптический коэффициент силикона задается как

$$dn/dT = -5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

В то же время термооптическим коэффициентом люминофора можно пренебречь по отношению к коэффициенту силикона. И клеевой слой, и ССЕ заданы в виде набора малых объемов, показатели преломления которых определяются распределением температуры.

Чтобы получить профиль поглощения в ССЕ, его делят на ряд вокселей для определения абсолютного количества синего излучения. Эти значения являются

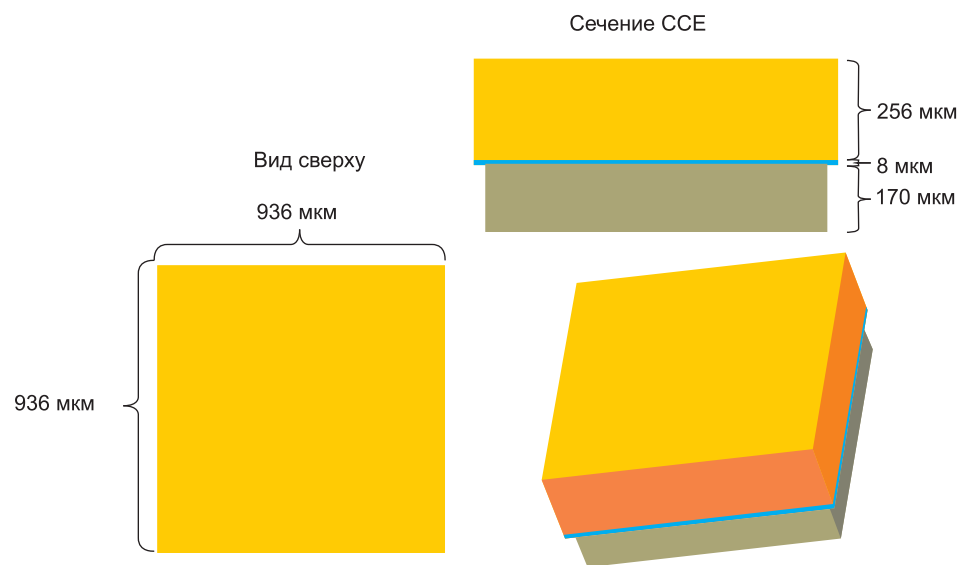


Рис. 1. Модель, состоящая из синего излучающего светодиодного чипа, тонкого клеевого слоя и квадратного ССЕ, расположенного сверху чипа

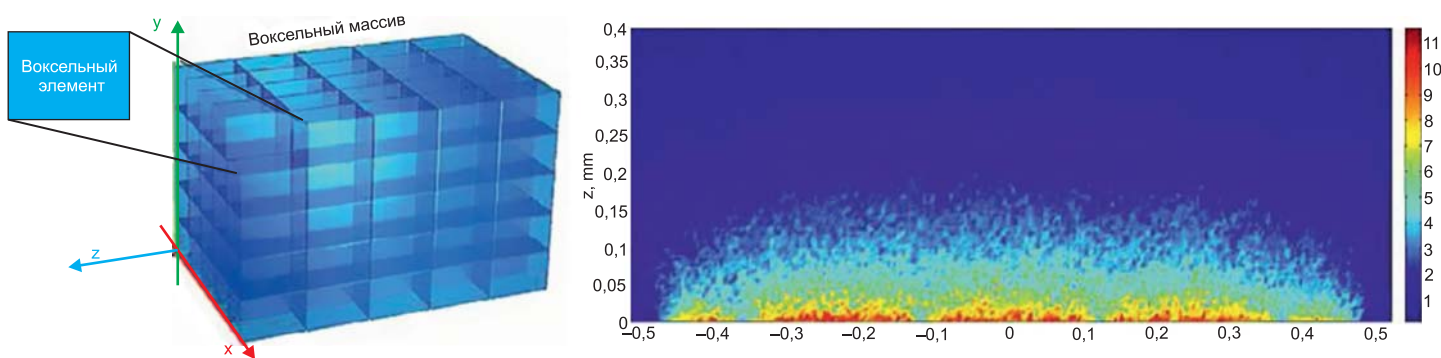


Рис. 2. а) Массив вокселей (условно); б) распределение поглощения в ССЕ в сечении плоскостью XZ

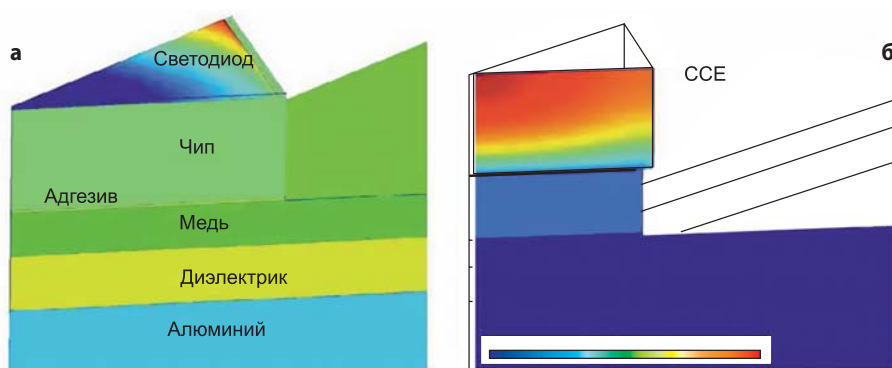


Рис. 3. а) Модель светодиода, состоящего из шести доменов (уменьшение до одной восьмой благодаря симметрии); б) то же, но с ССЕ

параметрами, передаваемыми в модель для тепловых расчетов (рис. 2).

Тепловое моделирование

Как уже обсуждалось в [11–12], количество (и распределение) поглощенного потока синего света чипа принимается в качестве входного параметра для последующего тепло-

вого моделирования, которое выполняется с помощью программ GetDP и Gmsh [13]. Так как вся геометрия модели симметрична относительно четырех осей, для снижения времени и ресурсов, требуемых для расчета, анализировалась только одна восьмая часть светодиода. Модель светодиода сводится к шести доменам, которые описываются

Таблица 1. Размеры объектов, использованных для теплового моделирования

Объект	Размер, мкм	
	По осям X и Y	По оси Z
Активная область	850	5
Чип	880	170
Слой адгезива	880	5
Слой меди	5000	70
Слой диэлектрика	5000	90
Слой алюминия	5000	2000

Таблица 2. Параметры объектов и материалов доменов, использованных в моделировании

Домен	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³
Активная область	45	327	5317
Чип	100	703	2340
Адгезив	0,45	800	7000
Медь	270	420	8300
Диэлектрик	2,6	900	3000
Алюминий	138	897	2700

свойствами эквивалентных материалов (рис. 3). Клеевой слой и ССЕ смоделированы как один блок с одинаковыми значениями удельной теплопроводности и теплоемкости. Геометрия, использованная для расчетов, приведена в таблице 1, а параметры материалов — в таблице 2.

Для расчетов были введены следующие граничные условия: нижняя поверхность светодиодного чипа установлена на идеальный охладитель, который имеет постоянную температуру T_{cool} . Для исследования граничное условие Дирихле было выбрано со значением $T_{cool} = 300$ К. Все остальные границы модели подвержены естественной воздушной конвекции при $h = 20$ Вт/(м²·К) и температуре окружающей среды 300 К. Теплопроводность ССЕ составляет порядка 0,26 Вт/м·К.

Источниками тепла в модели являются, с одной стороны, тепловыделение в светодиоде чипе, определяемое электротермическим моделированием, с другой — тепловыделение люминофора, поглощающего синий свет. Вклад люминофора, в основном, обусловлен двумя явлениями: во-первых, выделением тепла за счет сдвига Стокса для тех синих фотонов, которые «превращаются» в желтые; во-вторых, выделением тепла из-за поглощенных синих фотонов, после которых последовала безызлучательная рекомбинация. Последний случай соответствует квантовой эффективности меньше единицы. Температурная зависимость интенсивности люминесценции люминофора, используемого в данном исследовании, показана на рис. 4.

Расчет начинается с оптического моделирования, которое определяет профиль поглощения синего излучения в ССЕ на основе оптических параметров при комнатной температуре. Этот профиль поглощения

используется в качестве входного параметра для теплового моделирования, а полученное распределение температуры в ССЕ (рис. 5) является входным параметром для следующего шага оптического моделирования.

Итерация

В предыдущих разделах были описаны основные функции двух моделей и передаваемые между ними параметры. Для итерационного метода необходимо преобразовать эти передаваемые параметры в информацию, которую можно непосредственно использовать в расчетах. Для оптического моделирования это означает, что распределение температуры будет преобразовано в распределение показателей преломления силикона и, следовательно, будет сгенерирован новый ССЕ, состоящий из большого количества малых объемов, для каждого из которых будет определен коэффициент преломления в соответствии с заданным термооптическим коэффициентом. Цветовое изображение этого можно увидеть на рис. 6.

Для теплового моделирования важно сгенерировать источники тепла, обусловленные стоковыми потерями, согласно полученному распределению поглощения синего света и температурным изменениям параметров материалов, таких как интенсивность люминесценции или коэффициент теплопроводности.

Шаги итерации будут последовательно повторяться до тех пор, пока распределение температуры двух последовательных тепловых расчетов не преодолеет определенный порог. Полученный температурный профиль вдоль горизонтальной линии светодиода показан на рис. 7.

Экспериментальная часть

Для подтверждения результатов моделирования с использованием системы ИК-

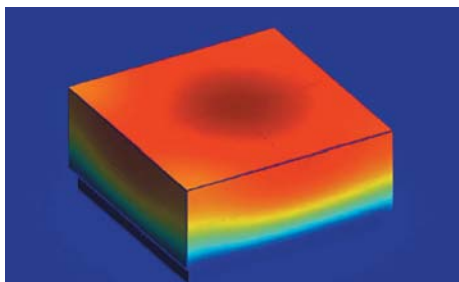


Рис. 5. Рассчитанное распределение температуры в ССЕ, которое используется в качестве входного параметра для оптического расчета

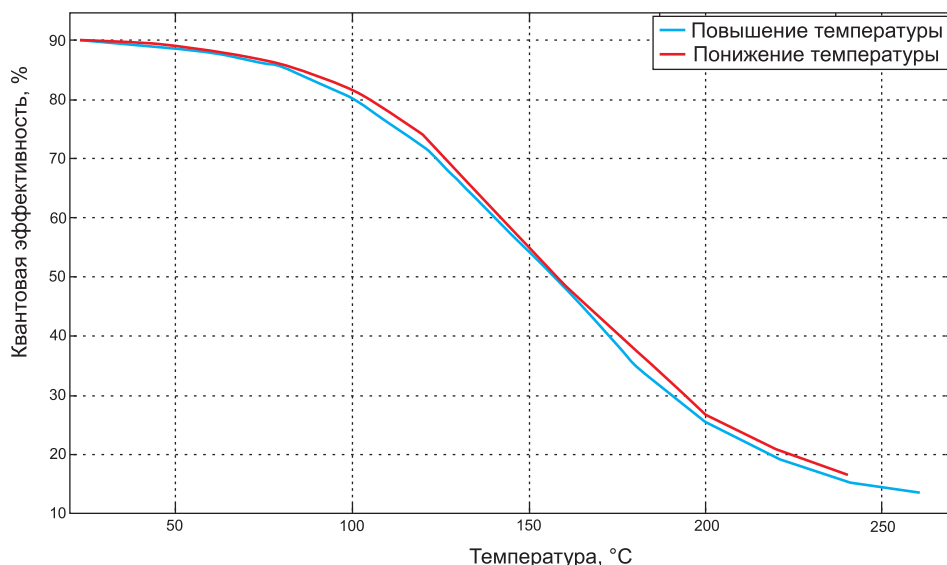


Рис. 4. Измеренная температурная зависимость интенсивности люминесценции ортосиликатного люминофора, использованного в исследовании

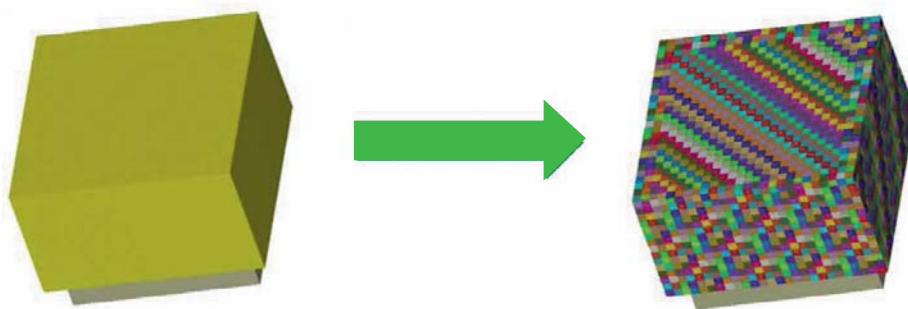


Рис. 6. Иллюстрация ССЕ, разбитого на большое число объемов, которые имеют одинаковые или различные показатели преломления

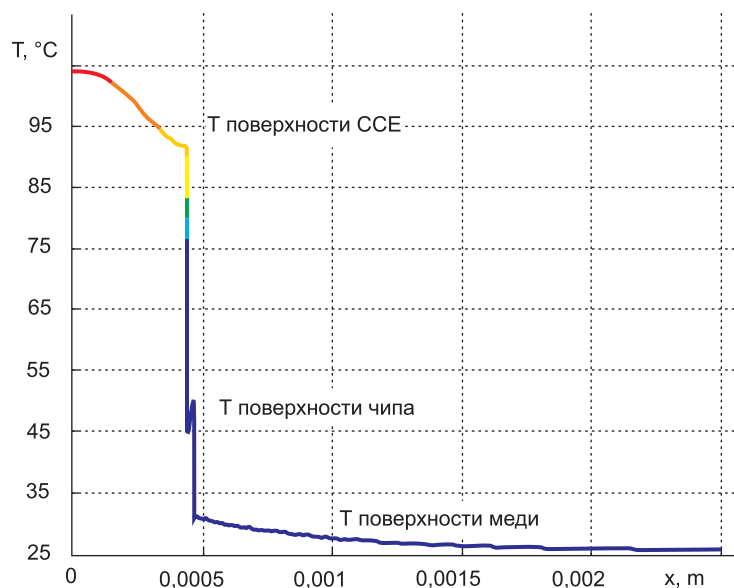


Рис. 7. Результат итерационного оптического и теплового моделирования после выполнения критерия остановки

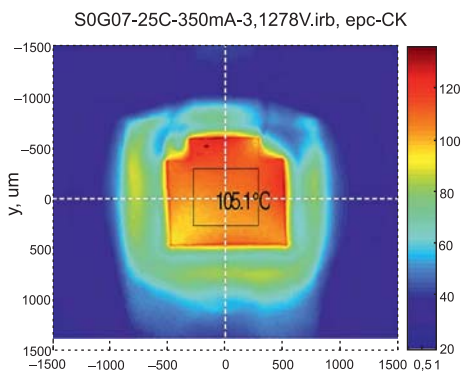


Рис. 8. Установившееся распределение температуры при прямом токе 350 мА, полученное методом ИК-термографии высокого разрешения после коррекции с учетом коэффициента излучения

термографа высокого разрешения Infracor IR8300, работающего в диапазоне 3–5 мкм, были получены термограммы для одиночного мощного светодиодного чипа Cree EZ900 Gen2 на металлической плате (IMS) с ССЕ плоской формы, расположенным в верхней части чипа. Светодиод был прикреплен к элементу Пельтье для регулировки температуры нижней части чипа во время измерения. Геометрия чипа и ССЕ в точности соответствуют модели, описанной выше. Для измерений необходимо было определить коэффициент излучения (степень «черноты») для каждого материала, необходимый для корректировки термограмм. Для этого образец термостатировался при двух температурах, +20 °С и +40 °С, и для каждой температуры были сняты термограммы.

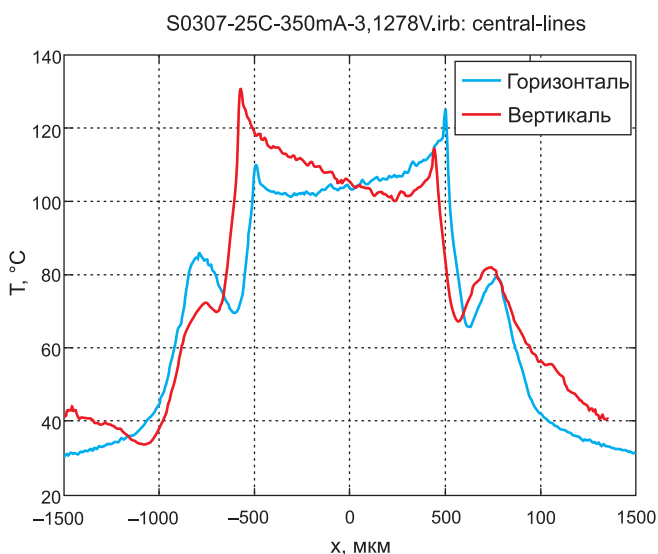


Рис. 9. Измеренный температурный профиль вдоль пунктирных линий (горизонтальной и вертикальной), показанных на рис. 8

На рис. 8 показан результат термографии светодиода при прямом токе 350 мА после коррекции.

Используя термограммы, мы получили температурные профили вдоль горизонтальной и вертикальной линий (рис. 9). На профиле хорошо различимы как ССЕ, где температура максимальна, так и подложка на основе металлической печатной платы. Сравнение с результатами расчетов показывает довольно хорошее соответствие.

Вывод

Авторы исследовали метод моделирования, который состоит из итерационных шагов, комбинирующих оптический и тепловой расчет, и делает возможным прогноз температуры белых светодиодов при работе на различных токах. Результаты моделирования довольно точно соответствуют экспериментальным измерениям. Предсказание точного температурного профиля в ССЕ и знания о поведении люминофора при разных температурах дают возможность прогнозировать тепловую нагрузку на ССЕ и изменение координат цветности белых светодиодов во время работы при различных токах. ●

Литература

1. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/feb2013_nema_brod
2. N. Narendran, L. Deng, R. M. Pysar, Y. Gu and H. Yu, “Performance characteristics of high-power light-emitting diodes”; Proc. of SPIE vol. 5187, 267 (2004).

3. C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, M. Schweighart, S. Tasch, G. Leising, F. P. Wenzl, “A detailed study on the requirements for angular homogeneity of phosphor converted high power white LED light sources”; Opt. Mater. 31, 2009.
4. C.-C. Sun, C.-Y. Chen, C.-C. Chen, C.-Y. Chiu, Y.-N. Peng, Y.-H. Wang, T.-H. Yang, T.-Y. Chung, C.-Y. Chung, “High uniformity in angular correlated-color-temperature distribution of white LEDs from 2800K to 6500K”; Opt. Express 20, 2012.
5. M. Unger, J. Nicolics, G. Langer, F.P. Wenzl, W. Nemitz, P. Fulmek, S. Schweitzer, “Thermal Performance Study of Direct Attached High-Power LEDs using an Innovative Submount Technique”; Proc. of the 2014 Electronics System-Integration Technology Conference, September 16–18, Finlandia Hall, Helsinki, Finland 2014.
6. G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, F.P. Wenzl, “Advanced Thermal Management Solutions on PCBs for High Power Applications”; IPC APEX EXPO 2014, March 25–27, 2014, Las Vegas, USA.
7. M. Arik, S. Weaver, C. Becker, M. Hsing, A. Srivastava: Proc. ASME/IEEE Int. Electronic Packaging Technical Conf. and Exhibition (InterPACK’03), Maui, HI, Jul. 6–11 2003.
8. X. B. Luo, R. Hu, J. Int., Heat Mass Transf. 75 (2014) 213.
9. Y. Xi, E. F. Schubert, “Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method”; Appl. Phys. Lett. 85, 2004.
10. P. Fulmek, G. Langer, F.P. Wenzl, W. Nemitz, S. Schweitzer, H. Hoschopf, J. Nicolics: “Direct Junction Temperature Measurement in High-Power LEDs”; IEEE Proc. of 37th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, Dresden, May 7–11, 2014.
11. P. Fulmek, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, J. Nicolics, F.P. Wenzl, Adv. Opt. Mater. 1 (2013) 753.
12. F.P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, Opt. Express 21 (2013) A439.
13. C. Geuzaine, J.-F. Remacle: Gmsh: “A three-dimensional finite element mesh generator”; 2015, <http://geuz.org/gmsh>. P. Dular, C. Geuzaine: GetDP: a General Environment for the Treatment of Discrete Problems, 2015, <http://geuz.org/getdp>.