



УДК 628.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ РАБОТЕ С ТРЕХКРИСТАЛЬНЫМИ RGB-СВЕТОДИОДАМИ

А.И. Подосинников^а, Г.Э. Романова^а, С.А. Щеглов^б, В.С. Перетягин^а, К.Д. Мынбаев^с,
Х. Липсанен^д, В.Е. Бугров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б ЗАО «Оптоган», Санкт-Петербург, 198205, Российская Федерация

^с ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^д Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия

Адрес для переписки: Karim.mynbaev@niuitmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.07.14, принята к печати 26.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-202-210

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Подосинников А.И., Романова Г.Э., Щеглов С.А., Перетягин В.С., Мынбаев К.Д., Липсанен Х., Бугров В.Е. Моделирование и исследование краевого эффекта при работе с трехкристалльными RGB-светодиодами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 202–210.

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены вопросы улучшения качества света многокристалльных RGB-светодиодов и световых приборов на их основе. Исследованы проблемы уменьшения краевого эффекта – неоднородности цвета при рассмотрении источника света под разными углами, а также неравномерности цветораспределения на освещаемой поверхности.

Методы. Проведено экспериментальное исследование краевого эффекта – анализ ореола по периферии светового поля и неоднородности светового поля на поверхности экрана – визуальными методами при использовании RGB-светодиодов с концентраторами излучения и без концентраторов. С помощью программного пакета ZEMAX выполнено моделирование распределения освещенности на различном расстоянии от системы из четырех RGB-светодиодов с рефлекторами. Выполнена оценка равномерности цветового распределения путем расчета координат цветности.

Основные результаты. На примере многокристалльных RGB-светодиодов показана возможность численного моделирования на этапе проектирования светового прибора для оценки эффективности использования светового потока и колориметрических показателей. Предложенная методика значительно упрощает и снижает затраты на проектирование световых приборов.

Практическая значимость. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании световых приборов на основе RGB-светодиодов, в том числе с элементами вторичной оптики.

Ключевые слова: RGB-светодиод, цветопередача, вторичная оптика.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке, выделяемой на реализацию Программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 г.г.

EDGE EFFECT MODELING AND STUDY FOR THREE-CHIP RGB LIGHT-EMITTING DIODES

A.I. Podosinnikov^а, G.E. Romanova^а, S.A. Scheglov^б, V.S. Peretyagin^а, K.D. Mynbaev^с, H. Lipsanen^д,
V.E. Bougrov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^б «Optogan» LLC, Saint Petersburg, 198205, Russian Federation

^с Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^д Aalto University, Aalto, 02150, Finland

Corresponding author: Karim.mynbaev@niuitmo.ru

Article info

Received 11.07.14, accepted 26.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-202-210

Article in Russian

For citation: Podosinnikov A.I., Romanova G.E., Scheglov S.A., Peretyagin V.S., Mynbaev K.D., Lipsanen H., Bougrov V.E. Edge effect modeling and study for three-chip RGB light-emitting diodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 202–210. (in Russian)

Abstract

Subject of study. The paper deals with light quality improvement of multi-chip RGB light-emitting diodes (LEDs) and luminaries on their basis. In particular, we have studied the issues of the edge effect reducing, which is non-uniformity of color when observing the source of light under different angles as well as non-uniformity of color distribution on the illuminated surface.

Methods. Experimental study of the edge effect has been performed, namely, the analysis of the halo at the periphery of the illuminated area and the non-uniformity of area at the surface of the screen illuminated with RGB LEDs with and without light concentrators. Modeling of illumination distribution at various distances from the source for the system containing four RGB LEDs with reflectors by ZEMAX software has been carried out. Assessment of the uniformity for light distribution via calculating the chromaticity coordinates has been performed.

Main results. The possibility of modeling application at the stage of a luminary design is shown on the example of RGB LEDs for assessing the efficiency of light flux usage and colorimetric parameters. Suggested method simplifies significantly the design of luminaries and reduces associated costs.

Practical relevance. The findings can be used in the design of luminaries based on RGB LEDs, including the ones with secondary optics elements.

Keywords: RGB LED, color rendition, secondary optics.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Government via funds allotted for the implementation of the Program for competitive growth of ITMO University among the leading world academic centres for 2013-2020.

Введение

Системы на основе RGB-светодиодов широко применяются в различных областях светотехники, в частности, для декоративной подсветки в городской среде. Для RGB-светодиодов, позволяющих получить различные оттенки свечения за счет смешения трех основных цветов – красного (R), зеленого (G) и синего (B), характерно отклонение направленности излучения светоизлучающих кристаллов относительно оптической оси диода, что является причиной неоднородности цвета при наблюдении источника под разными углами, а также неравномерности цветораспределения на освещаемой поверхности. Данное свойство ограничивает использование многокристалльных RGB-светодиодов в системах, требующих высокого показателя однородности светового потока и правильной цветопередачи [1–6] без использования дополнительных технических средств.

Можно выделить две основные проблемы, связанные с использованием полноцветных RGB-светодиодов в осветительном оборудовании:

1. световое поле неоднородно, возникают цветные ореолы по периферии светового поля;
2. тень от объекта подсветки также имеет цветные ореолы.

Эти эффекты проявляются при использовании осветительных приборов на основе RGB-светодиодов для подсветки объекта при макрофото съемке и в оптических приборах, где изображение объекта проецируется на экран с большим увеличением, так как при значительном увеличении объекта подсветки или проецируемого изображения даже малейшие артефакты становятся очевидными [4, 7].

При моделировании и расчете оптики для светодиодов очень часто основное внимание уделяется таким показателям, как эффективность и равномерность освещенности на освещаемой поверхности (см., например, [8, 9]), в результате неоднородность цвета проявляется в уже готовом изделии. Моделирование светодиодов даже белого свечения в случае необходимости учета неоднородности цвета в зависимости от угла, под которым рассматривается диод, является достаточно сложной задачей. Обычно для белых светодиодов имеется информация о спектре и угловом распределении силы света^{1,2}, но нет информации об угловой зависимости цвета свечения. Целью настоящей работы являлась демонстрация краевого эффекта и актуальности его исследования, изучение особенностей моделирования RGB-светодиодов (как с использованием вторичной оптики, так и без нее), оценка цветосмещения на модели и сравнение численных показателей моделирования и результатов эксперимента.

Демонстрация краевого эффекта

Для демонстрации краевого эффекта был использован образец трехкристального RGB-светодиода в корпусе smd5050³. Установленный на плату светодиод был помещен внутрь белого матового цилиндра. Фото образца, схема расположения кристаллов в корпусе и направления обзора представлены на рис. 1.

При включении светодиода в полноцветном режиме на цилиндрической поверхности экрана видна типичная картина – цветные ореолы по периферии светового поля и неоднородность светового поля на поверхности экрана. Фотографии результатов эксперимента представлены на рис. 2 соответственно схеме обзора, приведенной на рис. 1, б. Расстояние до экрана в эксперименте составляло 250 мм.

¹ Cree.com [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XPG>, свободный. Яз. англ.

² Osram-os.com [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.osram-os.com/osram_os/en/applications/application-support/optical-simulation/index.jsp?fb_dir=LED%2f, свободный. Яз. англ.

³ Светодиодный магазин Alled.ru [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://alled.ru/product-50.html>, свободный. Яз. рус.

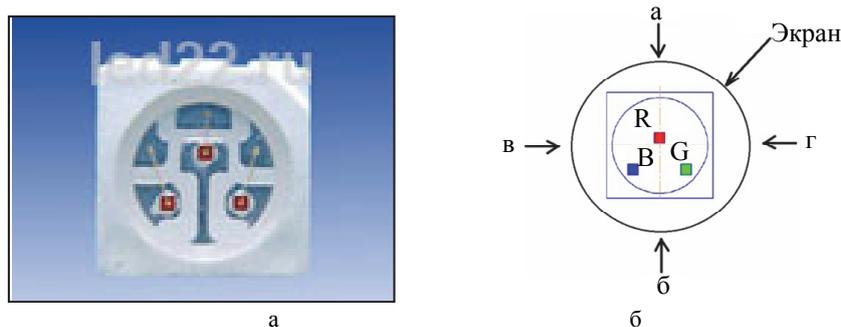


Рис. 1. Экспериментальный образец: фото используемого образца RGB-светодиода (а); схема расположения кристаллов в корпусе и направления обзора («а»–«г») (б)

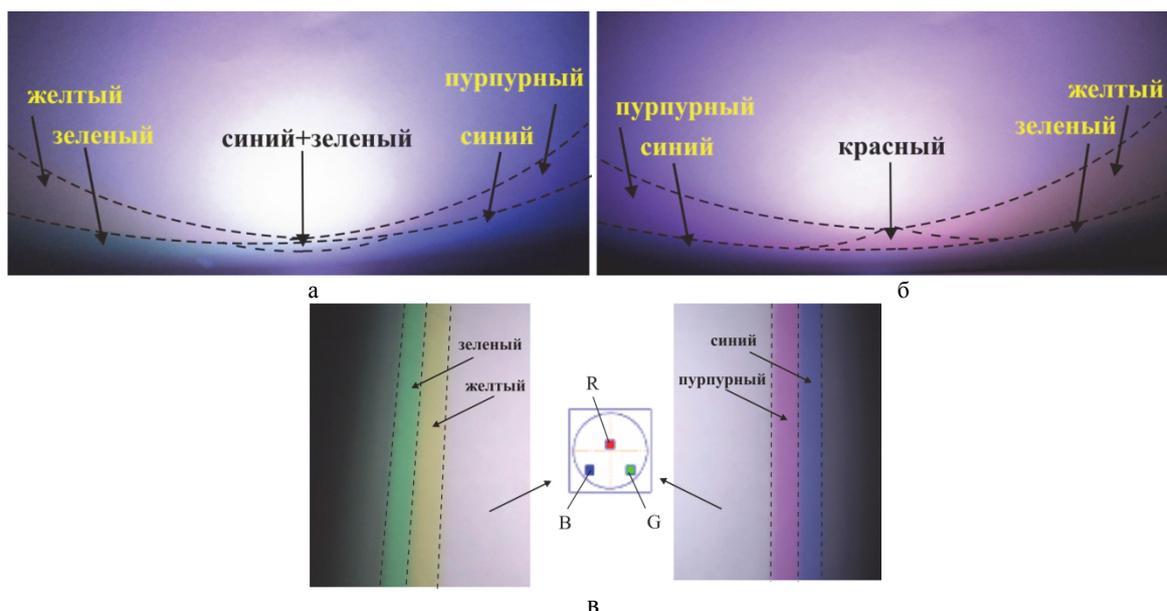


Рис. 2. Результаты эксперимента с образцом и матовым цилиндрическим экраном. Цветной ореол по периферии светового поля: обзор со стороны «а» (согласно схеме рис. 1, б) (а); обзор со стороны «б» (б); обзор со стороны «в» и «г» (увеличено) (в)

Эксперимент, позволяющий наглядно оценить влияние смещения кристаллов (чипов) в корпусе относительно оптической оси на формирование светового поля, можно провести с использованием диафрагмы. Схема эксперимента показана на рис. 3, а. При включении RGB-светодиода в режим генерации белого света на матовом экране, установленном на расстоянии 200 мм, формируется световое пятно, показанное на рис. 3, б. Фотография иллюстрирует принцип аддитивного смешения трех основных цветов (красного, синего и зеленого). Центральная зона светового поля имеет белый цвет, так как только в данный сектор проецируются лучи от всех трех основных источников (кристаллов) одновременно. При увеличении диаметра диафрагмы или расстояния от диафрагмы до экрана размер белого поля увеличивается, цветные полосы сохраняются и локализируются по периметру.

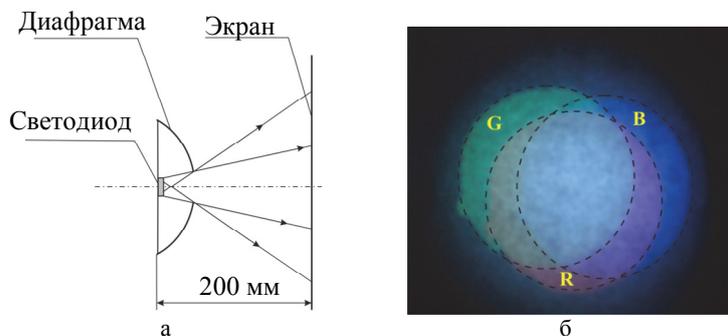


Рис. 3. Эксперимент с диафрагмой: схема эксперимента (а); схема изображения на экране (б)

При анализе влияния концентраторов на формирование тени от объекта подсветки на матовом экране использовались RGB-светодиоды как без концентраторов, так и с концентраторами. Без использования концентратора тень имеет цветные ореолы (рис. 4, а). При использовании концентратора проявление краевого эффекта не уменьшается – цвет и положение ореолов вокруг тени сохраняются и неизменны (рис. 4, б). При сравнении положения ореолов отмечен эффект, объясняющийся положением кристаллов в корпусе (рис. 4, в). Ореол вокруг светового поля справа – синий и пурпурный, а ореол вокруг тени от объекта, тоже справа – желтый и зеленый. С левой стороны ореол вокруг светового поля – желтый и зеленый. Ореол вокруг тени от объекта с той же, левой, стороны – синий и пурпурный.

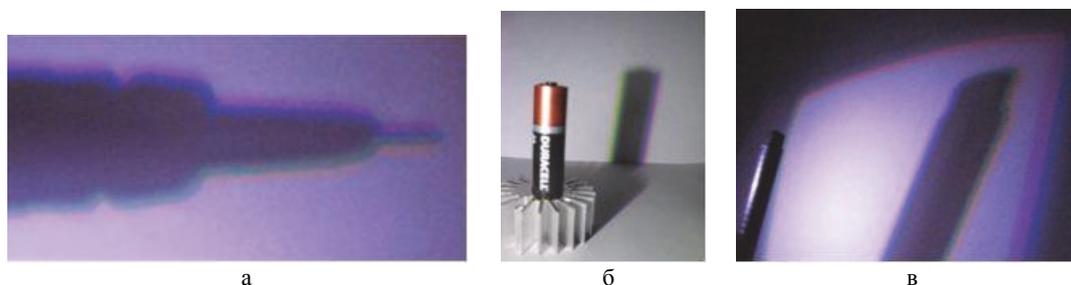


Рис. 4. Вид тени от объекта при подсветке RGB-светодиодом: объект – механический карандаш, без использования концентратора (а); для освещения объекта использован RGB-прожектор с концентратором (б); объект – авторучка, с использованием концентратора (в)

Серия экспериментов, проведенная для определения влияния различной формы отражателей (концентраторов и конических отражателей) на однородность светового поля, показала, что отражатели, вне зависимости от форм профилей, не позволяют значительно улучшить однородность поля и исключить или существенно уменьшить степень проявления краевых эффектов. Ширина цветных ореолов по периферии светового поля несколько уменьшалась только при значительном увеличении длины концентратора.

Обсуждение результатов

В основе явления краевого эффекта лежит отклонение направленности излучения кристаллов относительно оптической оси диода за счет расположения кристаллов в корпусе [4, 7]. На рис. 5, а, показаны три кристалла внутри корпуса и ход лучей от каждого кристалла. Красный чип расположен в середине, синий – слева и зеленый – справа. Свет от зеленого кристалла идет под меньшими углами по сравнению с лучами от красного и синего кристаллов, поэтому существует зона присутствия лучей только зеленого кристалла. Как следствие, по периферии присутствует зеленая полоса. Как только свет от зеленого кристалла смешался со светом красного (луч красного выходит под более острым углом к оптической оси в данной проекции), образуется желтый. В зоне зеленого и желтого света лучи синего отсутствуют. Как только указанные лучи попадают в зону синего луча (свет синего направлен влево под самым острым углом к оптической оси в данной проекции), формируется белый свет. Аналогичным образом объясняется появление цветных полос и их локализация в экспериментах с полыми рефлекторами/концентраторами. Рис. 5, б, поясняет наличие ореолов вокруг тени от объекта подсветки.

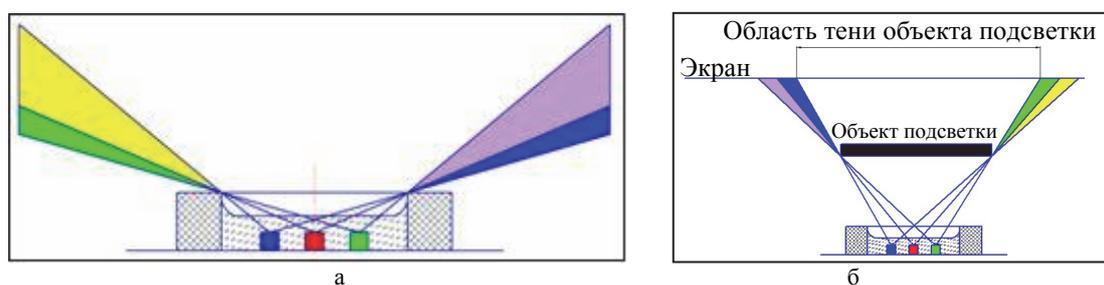


Рис. 5. Проекция расположения кристаллов в корпусе RGB-светодиода: локализация ореолов по периферии светового поля (а); локализация ореола вокруг тени от объекта подсветки (б)

На рис. 6 представлены два RGB-светодиода с рефлекторами, установленные на печатной плате на некотором расстоянии A друг от друга и на расстоянии h от экрана, на который проецируется их излучение. При известных параметрах источника, расстоянии между источниками и параметрах рефлекторов возможен несложный расчет, в результате которого будет определена трехмерная геометрия зоны, в которой присутствуют лучи от всех источников одновременно, – заштрихованная область на рис. 6, проецируемая на экран в виде круга с диаметром B . Также возможно прогнозирование характеристик основного светового поля и периферийных участков.

Расчет светового поля RGB-светодиодов несколько осложняется тем, что в составе одного диода присутствуют три кристалла. RGB-светодиод необходимо рассматривать как три источника в составе единого. Рефлектор каждого светодиода вносит вклад в неоднородность поля за счет краевого эффекта: на рис. 6 – это области, обозначенные как 1 и 3 для первого рефлектора и 2 и 4 для второго рефлектора. Как было отмечено, при значительном удалении экрана ореолы, локализованные в средней части светового поля, становятся менее контрастными и сливаются с общим фоном. На рис. 6 – это области 2 и 3. Цветные линии по периферии светового пятна – области 1 и 4 (см. также рис. 4, в) – остаются четко различимы.

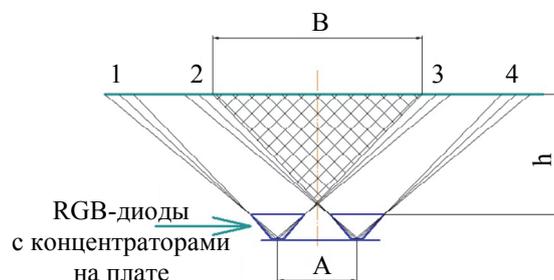


Рис. 6. Формирование центрального светового поля

Поскольку макетирование световых приборов – достаточно трудоемкий процесс, требующий значительных материальных и временных затрат, то на этапе проектирования прибора рационально использовать моделирование. Для численной оценки краевого эффекта и однородности цвета на освещаемой поверхности возможно моделирование с использованием специализированных программ [10]. Моделирование может способствовать более быстрому и эффективному проектированию светового прибора, однако часто необходим этап проверки адекватности результатов моделирования и соответствия модели и реального объекта. Кроме того, необходимо иметь возможность связать численные критерии цветовой однородности с субъективными показателями однородности цвета.

Результаты моделирования RGB-светодиодов

Для компьютерного моделирования данного эксперимента была построена CAD-модель выбранного RGB-светодиода на основе ранее полученных данных о влиянии внутренней формы корпусов в сочетании с различными системами первичной оптики на выходные характеристики. Сборка модели светодиода и построение модели модуля из четырех RGB-светодиодов (2×2) были осуществлены с использованием программного комплекса ZEMAX⁴ [10, 11]. Для расчета и обработки результатов использован режим непоследовательного расчета хода луча (Non-Sequential Mode). Каждый кристалл диодов был смоделирован на основе соответствующего спектрального распределения.

Распределение освещенности оценивалось на приемнике, позволяющем оценить не только энергетические, но и колориметрические характеристики (Detector Color) [10]. Результаты расчетов приведены на рис. 7 и 8.

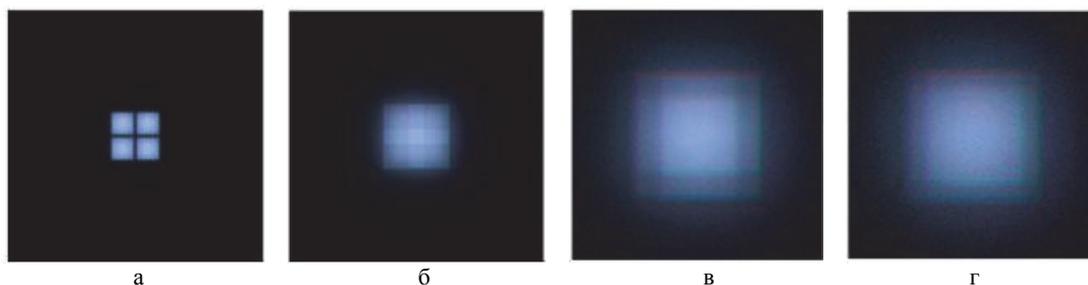


Рис. 7. Расчетное распределение освещенности на приемнике на расстоянии L от системы из четырех RGB-светодиодов с рефлекторами: $L = 2$ мм (а); $L = 20$ мм (б); $L = 80$ мм (в); $L = 150$ мм (г)

На рис. 7, а, экран располагается близко к рефлекторам, и световой поток от четырех источников не смешивается. На рис. 7, б, расстояние до экрана увеличено, световые потоки частично перекрываются. В результате перекрытия на экране сформировано отчетливо различимое перекрестие. Контуры перекрестий – зона проявления краевых эффектов от четырех концентраторов. В центре перекрестия различим небольшой квадрат – зона, в которой присутствуют лучи одновременно от всех четырех светодиодов. При увеличении расстояния между рефлекторами и экраном указанная центральная зона увеличивается и

⁴ ZEMAX Users' Knowledge Base. ZEMAX: Software For Optical System Design [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zemax.com/kb/>, свободный. Яз. англ.

трансформируется в центральное световое пятно (рис. 7, в). Отчетливо видно проявление краевых эффектов при использовании концентраторов/рефлекторов – это ряд вертикальных и горизонтальных линий, имеющих колориметрические показатели, отличные от основного поля. Имеется четыре горизонтальных и четыре вертикальных линии – по две линии на один рефлектор в ряду, краевой эффект по периметру светового пятна ярко выражен. Краевой эффект в средней части светового поля различим в меньшей степени благодаря аддитивному принципу цветосмешения. При значительном удалении экрана от образца (рис. 7, г) цветные ореолы от концентраторов, локализованные в средней части светового поля, становятся менее контрастными и менее различимыми [12], сливаясь с общим фоном. Отсутствие контраста и невозможность визуально установить наличие краевых эффектов за счет отсутствия резких границ между соседними сегментами светового поля не исключает наличия групп лучей, формирующих данный эффект от каждого рефлектора. Краевые эффекты от рефлекторов не компенсированы, что по-прежнему увеличивает различия колориметрических показателей ряда локальных областей и понижает однородность светового поля в целом. Численные оценки последовательности формирования светового поля при компьютерном моделировании представлены на графике на рис. 8.

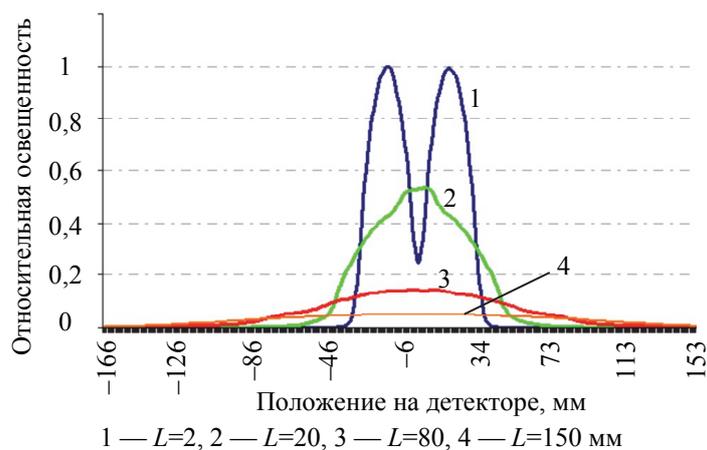


Рис. 8. Распределение относительной освещенности на приемнике для различных положений экрана относительно системы (модуль из четырех RGB-светодиодов с рефлекторами)

При расчетах был взят полный поток в 0,113 Вт (световой поток 24,7 лм), на графике показано распределение освещенности вдоль одного из направлений на площадке приемника для нескольких его положений. Видна последовательность формирования суммарного светового потока за счет взаимного перекрытия потоков от каждого источника в образце при удалении экрана относительно светильника. При малом расстоянии от образца до экрана (2 мм) потоки отдельных источников не перекрываются, четко видны пики от отдельных светодиодов (см. также рис. 7, а). При большем удалении (20 мм) формируется центральное световое пятно – пик на графике, соответствующий перекрестию на рис. 7, б. При значительном удалении (80 мм и 150 мм) сформировано суммарное световое пятно (рис. 7, в, г). Проведенное сравнение данных эксперимента и компьютерного моделирования свидетельствует об идентичности полученных результатов.

В современных осветительных приборах однородность светового поля определяется по совокупности ряда показателей, в частности, равномерности освещения поверхности и идентичности колориметрических показателей локальных областей светового поля. В настоящей работе основное внимание уделялось оценке однородности именно по колориметрическим показателям. Для оценки равномерности цветового распределения на экране в программе ZEMAX можно рассчитать величины x , y или u' , v' (согласно обозначениям Международной комиссии по освещению (МКО) 1931 или 1976 годов соответственно), определяющие цвет на детекторе, полученный в результате аппроксимации колориметрических показателей по каждому пикселю детектора. Однако эти показатели не дают представления об однородности светового поля и (или) колориметрических характеристиках локальных малых областей [12, 13]. Для того чтобы оценить однородность полученного светового поля и различия колориметрических характеристик локальных областей, необходимо использовать несколько детекторов, каждый из которых характеризует соответствующую локальную область светового поля. Далее может быть проведен сравнительный анализ локальных областей по ряду показателей (энергетических или колориметрических). Количество локальных областей и принцип сегментации единой исходной области определяют точность сравнения и время, затрачиваемое комплексом ZEMAX на обработку данных. В настоящей работе разбиение осуществлялось с охватом зон локализации краевых эффектов, центральной и ряда отдельных периферийных областей.

Первоначально рассчитываются средние значения координат u'_{avr} и v'_{avr} по всем локальным областям соответственно сегментации. Дальнейший расчет ведется по формулам (1) и (2) [14]:

$$\Delta uv_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u'_i - u'_{avr})^2 + (v'_i - v'_{avr})^2]}, \quad (1)$$

$$\text{Однородность} = \frac{100}{1 + k \cdot \Delta uv_{rms}} [\%]. \quad (2)$$

Здесь M – число сегментов при разбиении; k – коэффициент, определяющий диапазон значений. Значение 100% в формуле (2) означает идентичность координат u' и v' во всех сегментах. Величина $k=5$ подобрана экспериментально на основе анализа сегментации светового поля и ряда комбинаций значений u' и v' (для R, G, B) в сегментах разбиения.

Результаты расчетов на примере одиночного светодиода и модуля из девяти светодиодов представлены на диаграмме МКО [15] на рис. 9 и 10. Здесь же отмечены линия чистых спектральных цветов (с обозначениями длин волн в нанометрах) и линия, для которой показаны цветовые температуры (с обозначениями в градусах Кельвина). Концентрическими маркерами отмечены цветовые координаты, вычисленные для одного и того же светового прибора, но определенные в разных точках освещаемой поверхности, каждая точка характеризует колориметрические показатели отдельной локальной области (отдельного детектора).

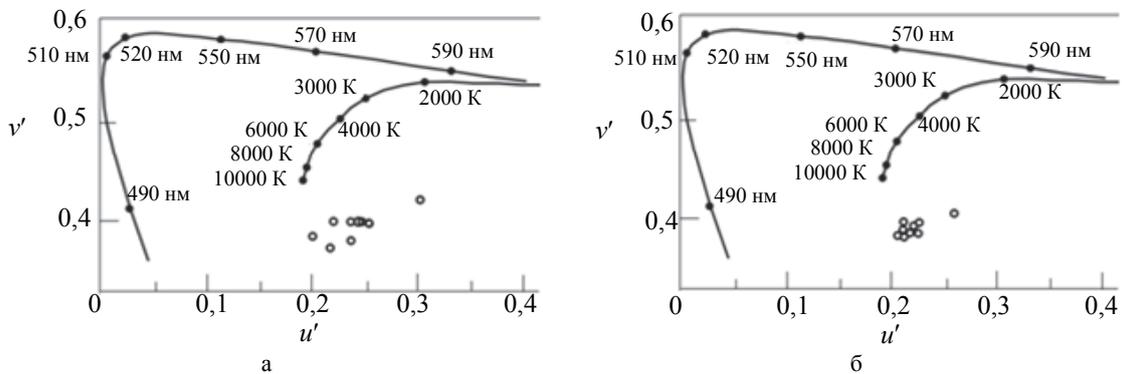


Рис. 9. Результаты расчетов для одиночного диода с рефлектором без диффузора, однородность 88,1% (а); с диффузором, однородность 92% (б)

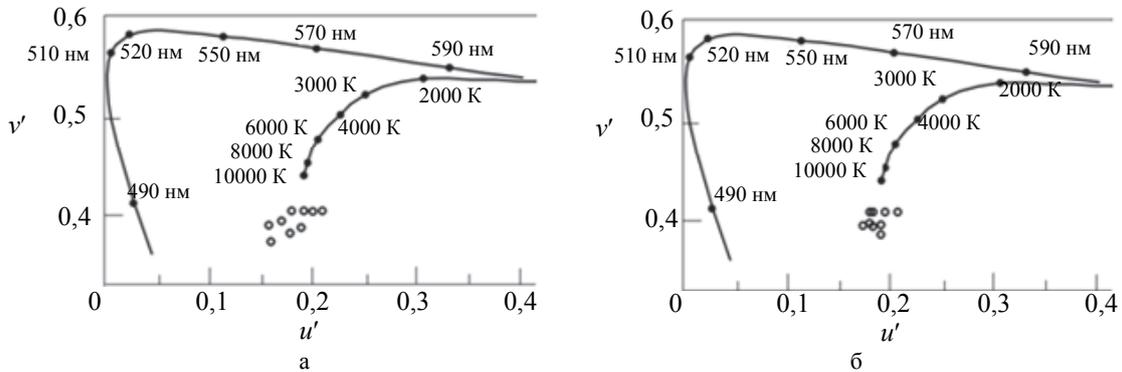


Рис. 10. Результаты расчетов для модуля из девяти светодиодов с рефлекторами: без диффузоров, однородность 92% (а); с диффузорами, однородность 93,5% (б)

Таким образом, наименьший разброс значений рассчитанных координат u' , v' свидетельствует о более высокой однородности светового поля по колориметрическим показателям. Для компенсации проявления краевого эффекта в данном случае использовались растровые диффузоры [16], установленные в рефлектор, а оценка однородности светового поля проводилась также и визуально. Расчеты показали однородность 88,1% для одного светодиода и 92% для модуля из девяти светодиодов без применения диффузоров, а также увеличение однородности до 92% и 93,5% соответственно при применении диффузоров, что хорошо согласуется с визуальными оценками работы светового прибора. Энергетические потери при применении диффузора возрастали до 2% (без учета френелевских потерь).

Заключение

В работе рассмотрены особенности использования многокристалльных RGB-светодиодов в осветительных приборах. Подтверждено, что отклонение направленности излучения кристаллов относительно оптической оси светодиода является причиной наблюдаемой неоднородности светового поля и краевого эффекта даже при использовании рефлекторов и концентраторов – ярко выраженного ореола по периферии светового поля и менее контрастных ореолов в локальных областях. Для исключения трудоемкого этапа многократных поисковых экспериментов на этапе проектирования светового прибора предложено использовать моделирование, а однородность цвета оценивать на этапе расчета путем введения в расчет нескольких плоскостей и вычисления соответствующих показателей однородности цвета на освещаемой поверхности.

Для компенсации краевого эффекта и увеличения однородности светового поля по колориметрическим показателям в рамках работы использовалась вторичная оптика на основе различных растровых диффузоров. Компенсация краевого эффекта достигалась при относительно небольшом увеличении суммарной однородности поля по колориметрическим показателям и малых энергетических потерях. Результаты компьютерного моделирования на основе созданной модели трехкристалльного RGB-светодиода и модели вторичной оптики, в частности, численная оценка однородности светового поля по колориметрическим показателям, соответствуют экспериментальным данным, что подтверждает возможность использования моделирования на этапе проектирования светового прибора для оценки не только эффективности использования светового потока, но и колориметрических показателей.

References

- Schubert E.F. *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, 2006, 327 p.
 - Mukhitdinov M., Musaev E.S. *Svetozluchayushchie Diody i ikh Primenenie* [Light Emitting Diodes and their Applications]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1988, 80 p.
 - Spravochnaya Kniga po Svetotekhnike* [Handbook of Lighting Technology]. Ed. Yu.B. Aizenberga. 3rd ed. Moscow, Znak Publ., 2006, 972 p.
 - Moreno I., Contreras U. Color distribution from multicolor LED arrays. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 6, pp. 3607–3618. doi: 10.1364/OE.15.003607
 - Liu P., Wang H., Wu R., Yang Y., Zhang Y., Zheng Z., Li H., Liu X. Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, no. 17, pp. 3998–4005. doi: 10.1364/AO.52.003998
 - Ramane D., Shaligram A. Optimization of multi-element LED source for uniform illumination of plane surface. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 4, pp. A639–A648.
 - Son C.G., Yi J.H., Gwag J.S., Kwon J.H., Park G. Improvement of color and luminance uniformity of the edge-lit backlight using the RGB LEDs. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 272–277. doi: 10.3807/JOSK.2011.15.3.272
 - Imai K., Fujieda I. Illumination uniformity of an edge-lit backlight with emission angle control. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 16, pp. 11969–11974. doi: 10.1364/OE.16.011969
 - Moreno I. Illumination uniformity assessment based on human vision. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 23, pp. 4030–4032. doi: 10.1364/OL.35.004030
 - ZEMAX Optical Design program: User's Guide*. 2013.
 - Chechurov P.S., Romanova G.E. Using the ZEMAX software complex to form photometric models of LED illuminator devices. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2012, vol. 79, no. 5, pp. 57–60.
 - Gaudin J. *Colorimetrie Appliquee a la Video*. Paris, 2006.
 - Kozlov M.G., Tomskii K.A. *Svetotekhnicheskie Izmereniya* [Measurements in Lighting Engineering]. St. Petersburg, Peterburgskii Institut Pechati Publ., 2004, 320 p.
 - Su Z., Xue D., Ji Z. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 6, pp. A843–A855.
 - Judd D.B., Wyszecki G. *Color in Business, Science and Industry*. NY, Wiley, 1975.
 - Podkin I.A., Shishakov K.V. *Sbornik Referativnykh Rabot po Kursu "Prikladnaya Optika"* [Collection of Abstracts on the Course "Applied Optics"]. Izhevsk, ISTU Publ., 2008, 186 p.
- Подосинников Алексей Иванович** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Cormail34@yahoo.com
- Романова Галина Эдуардовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, romanova_g_e@mail.ru
- Щеглов Сергей Александрович** – руководитель отдела, ЗАО «Оптоган», Санкт-Петербург, 198205, Российская Федерация, Sergey.Scheglov@optogan.com
- Перетягин Владимир Сергеевич** – аспирант, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, peretyagin@mail.ru

- Мынбаев Карим Джафарович* – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Karim.mynbaev@niuitmo.ru
- Липсанен Хари* – PhD, профессор, профессор, Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия, harri.lipsanen@aalto.fi
- Бугров Владислав Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru
- Alexei I. Podosinnikov* – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Cormail34@yahoo.com
- Galina E. Romanova* – PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, romanova_g_e@mail.ru
- Sergey A. Scheglov* – Section Head, «Optogan» LLC, Saint Petersburg, 198205, Russian Federation, Sergey.Scheglov@optogan.com
- Vladimir S. Peretyagin* – postgraduate, research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, peretyagin@mail.ru
- Karim D. Mynbaev* – D.Sc., Professor, Head of Laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Karim.mynbaev@niuitmo.ru
- Harri Lipsanen* – PhD, Professor, Aalto University, Aalto, 02150, Finland, harri.lipsanen@aalto.fi
- Vladislav E. Bougrov* – D.Sc., Department Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru