

В. В. Байнев, аспирант кафедры Автоматизированных систем обработки информации и управления, Институт электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, г. Саранск, bw14@mail.ru

Компьютерный расчет и моделирование светодиодных осветительных систем

В статье рассмотрены оптические системы для светодиодов (СД). Проанализированы особенности применения вторичных оптических элементов в виде линз и отражателей для получения различных диаграмм направленности излучения светодиодов в пространстве. Автором сформулированы требования, предъявляемые к оптическим элементам. Рассмотрены особенности и проблемы расчета вторичных оптических систем. Кроме того, описаны возможности разработанного программного обеспечения для моделирования и исследования светодиодных осветительных систем.

Ключевые слова: светодиод, источник света, оптическая система, кривая силы света, фотометрическое тело, линза, коллиматор, отражатель, расчет, диаграмма, программа, моделирование.

Введение

Светодиоды как источники света начали применяться в 60-х гг. XX в. В настоящее время светодиоды, используемые для освещения, занимают наряду с другими источниками прочную позицию на рынке осветительных систем. Светодиодные светильники, прожекторы и другая осветительная техника, получившие широкое распространение, активно применяются для создания искусственного освещения, декоративной подсветки, для ландшафтного и архитектурного освещения, при оформлении рекламных объектов.

Принцип действия светодиодов как полупроводниковых приборов основан на преобразовании электрической энергии непосредственно в световое излучение. Перечислим основные свойства светодиодов, которые в ближайшем будущем сделают их самыми экономичными по сравнению с другими источниками света: высокая световая отдача (100–150 лм/Вт); малое энергопотребление (единицы ватт); малые габариты (возмож-

ность использования в точечных или плоских приборах); высокая долговечность (десятки тысяч часов); отсутствие пульсации светового потока; возможность получения излучения различного спектрального состава; высокая устойчивость к внешним воздействиям (температуре, вибрации, ударам, влажности); электробезопасность и взрывобезопасность; возможность существенного уменьшения размера, материалоемкости и трудоемкости производства световых приборов (СП); возможность создания необслуживаемых светильников; высокая степень управляемости (возможность построения систем многоуровневого управления освещением); высокая технологичность при массовом производстве.

Широкое применение светодиодов в системах подсветки, освещения и индикации делает актуальным расчет и проектирование светодиодных оптических систем, обладающих высокой световой эффективностью и широкими возможностями контроля энергетических характеристик излучения.

Вторичная светодиодная оптика

Использование светодиодов в системах освещения требует применения вторичной оптики, назначение которой — направлять излученный светодиодом световой поток в заданную область пространства и обеспечивать формирование в этой области требуемого распределения освещенности [1, 2]. В последнее время стремительно нарастает заинтересованность ведущих мировых производителей источников света и потребителей в замене традиционных ламп накаливания, а также люминесцентных ламп дневного света на светодиодные СП, основу которых составляют полупроводниковые светодиоды, объединенные в светодиодные модули (СДМ).

Светодиод обладает косинусным светораспределением (рис. 1), но для освещения помещений с высокими пролетами или улиц оно не подходит. Для создания энергоэффективного освещения требуется специализированная оптика. Вторичная оптика — линза или зеркальный отражатель из пластика, монтирующийся на один светодиод или их группу, представляет собой отдельный компонент, не являющийся частью светодиода.

Использование вторичной оптики позволяет решить следующие задачи:

- изменить светораспределение светодиода, например, сосредоточить излучение в нужном угле или сделать его несимметричным;
- перенаправить световой поток от светодиода в освещаемую область, повышая эффективность светотехнического устройства и понижая его стоимость;
- сформировать требуемое распределение освещенности, соответствующее всем стандартам освещения.

В качестве вторичной оптики СД используются оптические элементы с преломляющими или отражающими поверхностями, устанавливаемые непосредственно над излучающим элементом. Наиболее перспективными деталями вторичной оптики являются асферические неизображающие (не создающие изображения, а преобразующие световое распределение источника света к требуемому виду) охватывающие (источник света целиком помещается внутри линзы) линзы, изготовленные методом литья под давлением и имеющие отражающие и преломляющие поверхности.

Оптические системы можно разделить на два основных типа — линзовые и отражательные. Не последнюю роль в увеличении коэффициента пропускания играет материал, из которого изготовлена оптика. Линзы

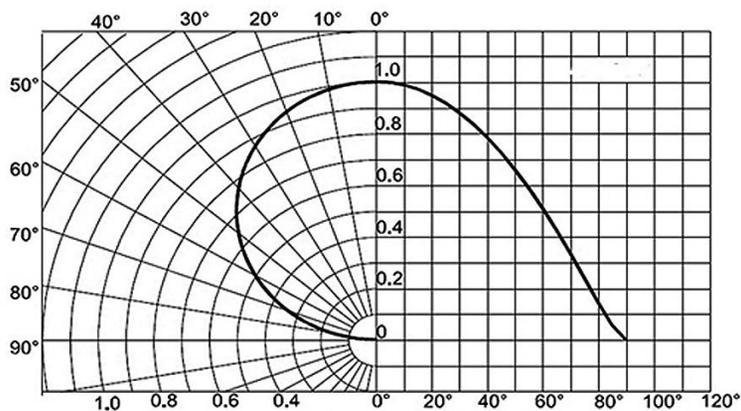


Рис. 1. Типичная диаграмма светораспределения СД

Fig. 1. Typical of light distribution chart of LED

для СД изготавливаются в основном из полиметилметакрилата, оптического поликарбоната с коэффициентом пропускания 95–98% или кремнийорганических соединений (силикона).

В настоящее время выпускается линзовая и отражательная вторичная оптика с широкими, полуширокими, косинусными, глубокими и концентрированными кривыми силы света (КСС). Для уличных светильников с СД производятся линзы с асимметричным светораспределением (широким в поперечной плоскости и концентрированным боковым в продольной).

Линза полного внутреннего отражения (ПВО) — коллиматор (TIR-оптика) — работает по схеме, представленной на рис. 2. Практически весь свет от СД эффективно используется и не теряется. Одним из критериев, влияющих на эффективность оптики и, в частности, линзы, является соотношение между ее размером и излучающей поверхностью светодиода. Часть 1 внутренней поверхности полости соответствует гиперболоиду вращения и обеспечивает коллимацию центральных лучей от источника. Лучи, преломленные на боковой поверхности внутренней полости, испытывают полное внутреннее отражение на наружной параболической поверхности 2. За счет использования ПВО эффективность коллиматора составляет около 90%.

Для формирования узкоугольных распределений освещенности с угловым размером менее 50–60° используется TIR-оптика с плоской верхней поверхностью, содержащая внутреннюю поверхность, через которую лучи от источника попадают внутрь оптического элемента, на боковую поверхность, на которой боковые лучи испытывают полное внутреннее отражение и поворачиваются на большие углы порядка 60–90°, и верхнюю внешнюю поверхность, через которую лучи выходят из оптического элемента.

Оптический элемент с поверхностью свободной формы имеет единственную рабочую

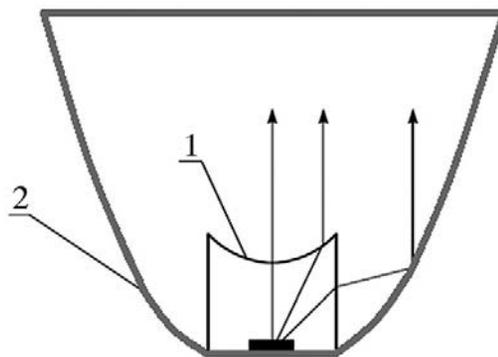


Рис. 2. Стандартный вид TIR-оптики
Fig. 2. Standard view of TIR-optics

поверхность свободной формы, позволяющую создавать заданные световые распределения в квадратных, прямоугольных, эллиптических и подобных областях. Данное решение позволяет разрабатывать так называемую «первичную оптику» светодиодов и обеспечивает эффективное перераспределение светового потока в области с угловыми размерами порядка 80°–140°.

Задачи расчета и моделирования вторичной светодиодной оптики

В настоящее время на рынке представлен широкий ассортимент вторичной оптики от самых различных производителей. Порой разработчику осветительной системы довольно сложно сделать выбор в пользу той или иной компании. В ряде случаев требуется разработка собственной оптики под определенные светодиоды. Поэтому актуальна задача моделирования светотехнических характеристик СД и СДМ и их оптических систем на стадии проектирования СП [3].

Проектирование и производство современных оптических систем требует моделирования сложных физических явлений [4, 5]. Модели распространения света в светорассеивающих элементах являются частью систем оптического моделирования. Расчет вторичной оптики светодиодов — одна из наиболее

сложных задач, возникающих в светотехнике. Это связано с большим количеством требований, одновременно предъявляемых к таким оптическим элементам:

- обеспечение высокой световой эффективности;
- минимальное расстояние от светодиода до освещаемой области при максимальном угловом размере освещаемой области;
- высокая равномерность формируемого распределения освещенности.

В качестве исходных данных для расчета используются следующие параметры: КСС (функция, описывающая зависимость силы света светодиода от направления наблюдения в выбранной плоскости, например, в горизонтальной; является сечением светового распределения этой плоскостью) светодиода, стандартная (требуемая) КСС прибора, показатель преломления материала оптики, габаритные размеры линзы.

Критерий эффективности преобразования света линзой — отношение светового потока на выходе детали к световому потоку, излучаемому источником, — интегральный коэффициент эффективности. Эффективность вторичной оптики зависит от числа пересечений луча света с границами поверхности линзы и отношения преломляющих и отражающих поверхностей линзы, при наименьшем числе пересечений и максимальной доле отражающих поверхностей эффективность оптики максимальна.

При выборе программного обеспечения следует принимать во внимание не только основные функциональные возможности, но и возможность интеграции этой программы в единое информационное пространство оптических приборов и других изделий. С использованием существующего программного обеспечения для моделирования, анализа и оптимизации работы оптических систем и элементов этап разработки оптических систем может быть полностью автоматизирован. На сегодняшний день предлагается несколько десятков универсальных пакетов

программ для проектирования оптических систем различного назначения и ряд систем, предназначенных для проектирования специализированных систем [6]. Среди наиболее популярных систем для проектирования и анализа оптики — Code V, OSLO, ZEMAX, LightTools, ASAP, TracePro и др.

К сожалению, далеко не все отечественные предприятия светотехнической отрасли могут позволить себе приобретение современных программных комплексов. Это связано как со стоимостью подобных программ (порядка 30 тыс. евро), так и с их функционалом, не всегда отвечающим требованиям разработчиков СП. Поэтому потребности светотехнических производственных предприятий и научно-исследовательских учреждений в программных комплексах для моделирования и проектирования СП и их оптических компонентов весьма ощутимы.

Таким образом, актуальной является разработка программного комплекса для моделирования светодиодной оптики, позволяющего по известному световому распределению светодиода и требуемому световому распределению прибора рассчитать геометрию линзы с излучающей поверхностью, обеспечивающей комфортное зрительное восприятие и легко воспроизводимой современными методами производства.

Программный комплекс для моделирования и расчета светодиодной оптики

Для разработки программного комплекса в качестве основной среды разработки и языка программирования были выбраны Microsoft Visual Studio и C#, в основе которых лежит платформа .NET [7]. Для создания дополнительных модулей, содержащих сложные математические и геометрические расчеты, по мере необходимости использовался язык Managed C++/CLI [8].

Применение древовидной (иерархической) структуры при построении моделей ка-

ких-либо деталей и систем на их основе является очень удобным оптимальным подходом при расчете и проектировании многих технических систем, в качестве которых можно рассматривать и СП. В связи с этим было принято решение рассматривать СП также в виде иерархической структуры. В этом случае корневым элементом дерева выступает непосредственно сам СП, на следующем уровне иерархии расположены корпус, оптическая система, источник света, защитное стекло, узел подвеса, электрика (рис. 3). Каждая из этих частей в свою очередь может быть представлена более детально. Например, оптическая система — в виде совокупности отражателя, линзы и рассеивателя.

Один из главных этапов оптического расчета светового прибора — трассировка световых лучей через оптическую систему.

В качестве примера рассмотрим оптическую систему, состоящую из двух собирающих линз, сферического зеркала и светозлучающей плоскости. Чтобы произвести трассировку, нужно на вкладке «Светораспределение» (Light Distribution) выбрать одно из доступных расширений для трассировки лучей и нажать кнопку «Трассировать тестовые лучи» (Trace Test

Rays). После этого из всех граней, излучающих свет, перпендикулярно будет выпущено по одному лучу и будет рассчитан маршрут каждого такого луча через оптическую систему.

Стоит отметить, что в некоторых случаях после пересечения лучом поверхности получается два новых луча: отраженный и преломленный, и чтобы не загромождать сцену ненужными лучами, для дальнейшей трассировки выбирается луч, обладающий большей энергией после пересечения. Этот вариант используется только при трассировке тестовых лучей, во всех других расчетах каждый из двух лучей обрабатывается отдельно.

Главной оптической характеристикой любого светового прибора является светораспределение. Его удобно представлять в виде так называемого фотометрического тела — геометрического места концов радиус-векторов, выходящих из светового центра, длина которых пропорциональна силе света в данном направлении.

Описываемый программный комплекс позволяет моделировать любые оптические системы, в том числе светодиодные модули и осветительные приборы на их основе.



Рис. 3. Иерархическая структура СП
 Fig. 3. The hierarchical structure of the light device

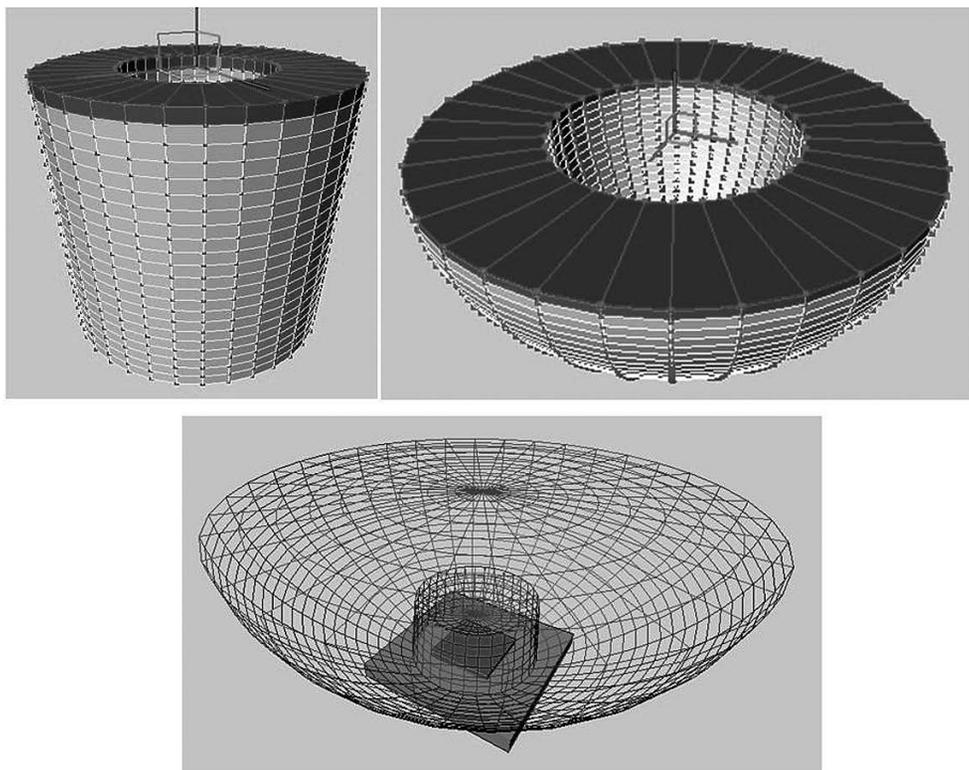


Рис. 4. Построение модели TIR-оптики для светодиода
Fig. 4. Construction of model TIR-optics for LED

Рассмотрим процесс создания моделей оптических систем для светодиодов и моделирования их светораспределения. На рисунках 4–6 показан процесс построения модели TIR-оптики для единичного светодиода, трассировки лучей для заданного типа поверхности с получением фотометрического тела.

Для проектирования СП с различными типами светораспределения удобно использовать заранее заготовленные оптические системы, т. е. из базы данных, и варьировать их для определенных приборов с заданными КСС.

На рисунке 7 представлены модели вторичной светодиодной оптики с поверхностями свободной формы, разработанные в описываемом программном комплексе, для обеспечения соответствующих КСС.

На рисунках 8–9 показаны трассировка лучей для этих систем и полученные их светораспределения.

При необходимости кроме фотометрического тела может быть представлена КСС светодиодного модуля (рис. 10).

Заключение

В современной светотехнике расчет и моделирование светотехнических характеристик светодиодных модулей и световых приборов является актуальной задачей. Использование светодиодов в системах освещения требует применения вторичной оптики — линзовой и отражательной, которая позволяет изменить светораспределение светодиода, повышает эффективность светотехнического устройства в целом, формирует требуемое распределение освещенности. В разработанном программном комплексе световой прибор как сложное изделие рассматривается в виде иерархической структуры с родитель-

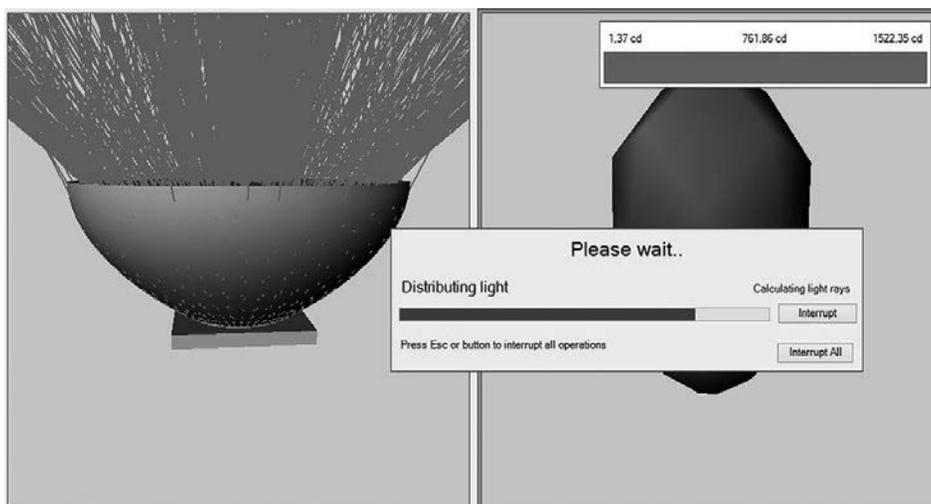


Рис. 5. Отображение процесса расчета лучей для трассировки и построения фотометрического тела
Fig. 5. Displaying of rays tracing calculation process and the building of photometric body

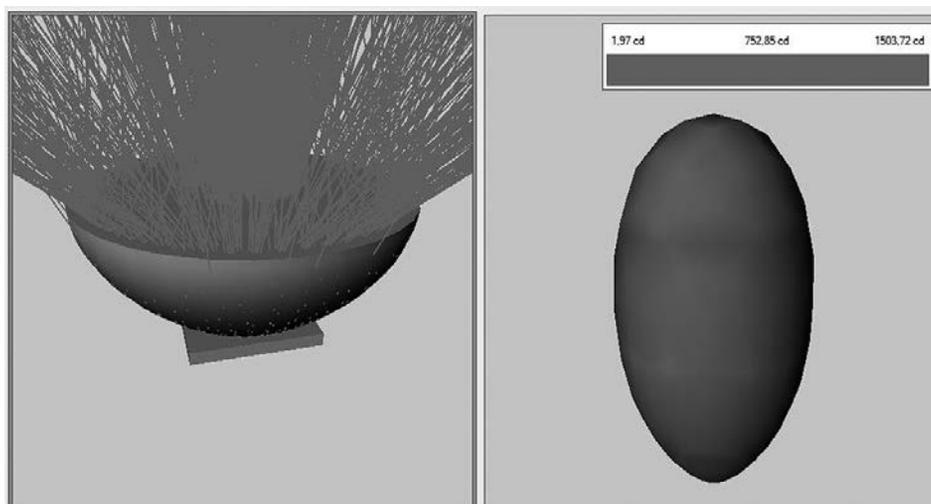


Рис. 6. Результат расчета светораспределения для модели светодиода с TIR-оптикой
Fig. 6. The result of the calculation of light distribution for the LED model with TIR-optics

скими и дочерними узлами, геометрия которых моделируется с помощью триангуляционных сеток. С помощью описанной программы было осуществлено моделирование светодиодной вторичной оптики путем разработки моделей поверхностей, трассировки лучей для заданного типа поверхности с получением фотометрического тела. Таким образом, программный комплекс позволяет зна-

чительно облегчить процесс проектирования оптических светодиодных систем и повысить их качество.

Список литературы

1. Байнев В. В., Байнева И. И. Оптические системы для светодиодов // Фотоника. 2016. № 2 (56). С. 84–93.
2. Цюпак Ю. А. Оптические системы светодиодных световых приборов. Саранск, 2009. — 38 с.

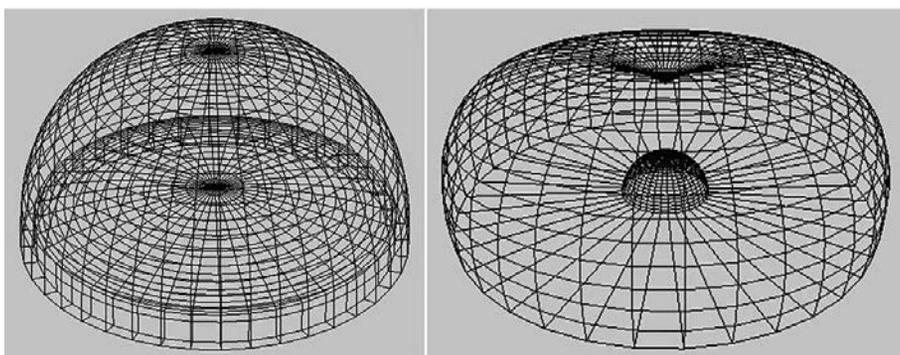


Рис. 7. Модели вторичной светодиодной оптики

Fig. 7. Models of secondary LED optics

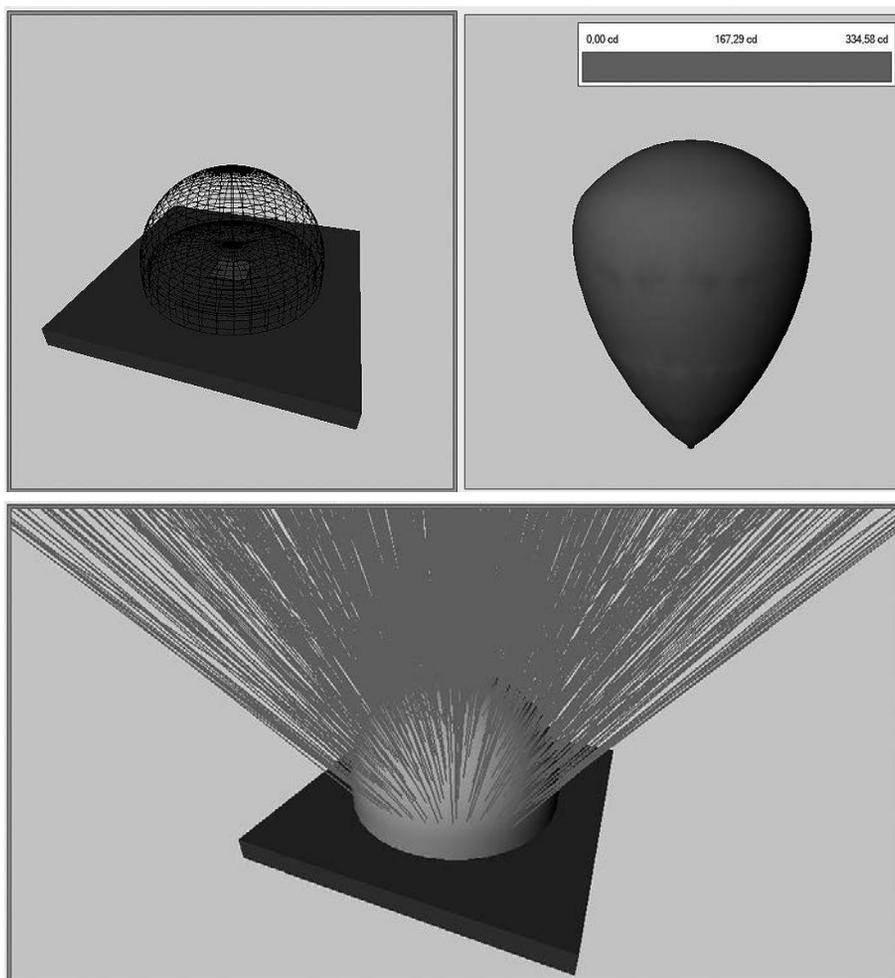


Рис. 8. Пример расчета и моделирования вторичной сферической светодиодной оптики

Fig. 8. Example of calculation and modeling of spherical secondary LED optics

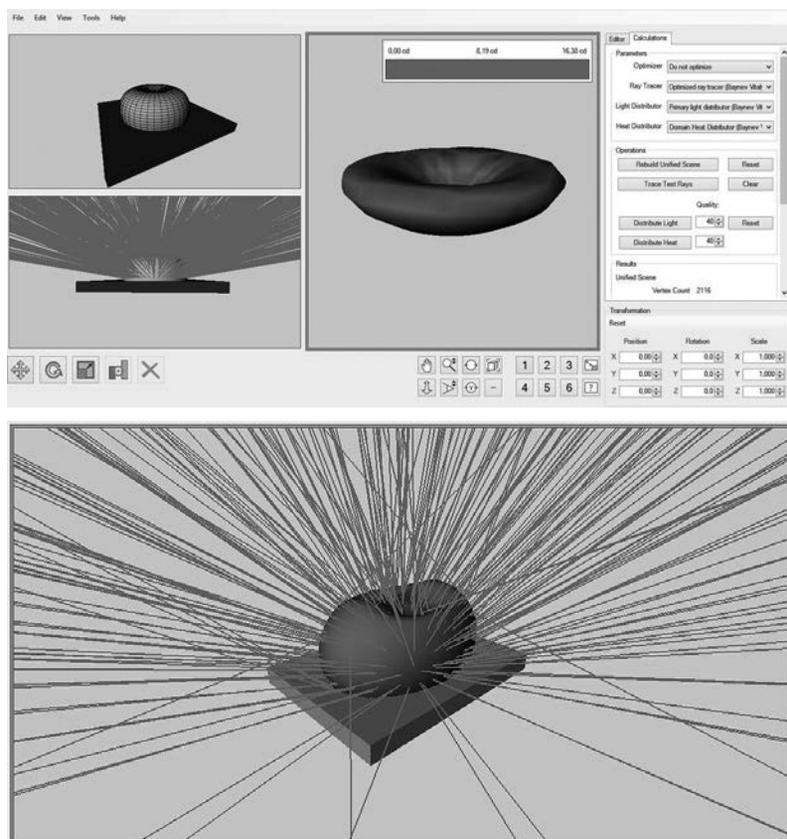


Рис. 9. Пример расчета и моделирования вторичной светодиодной оптики свободной формы
Fig. 9. Example of calculation and simulation of secondary LED freeform optics

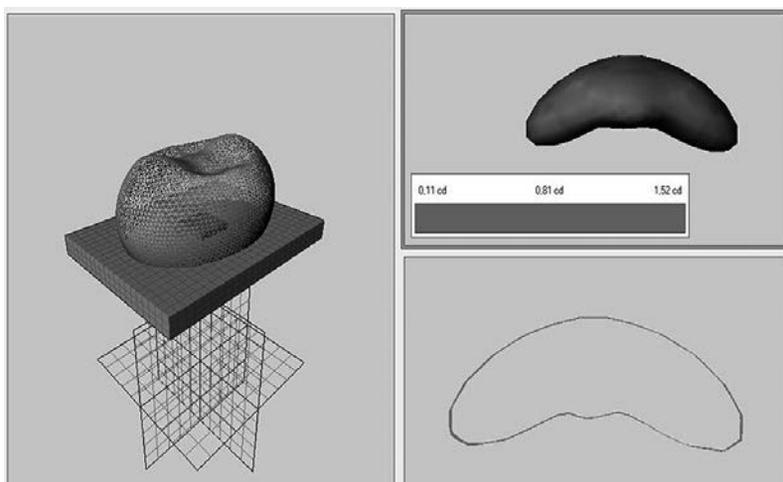


Рис. 10. Модель светодиода и вторичной оптики в виде триангуляционной сетки, его фотометрическое тело и КСС
Fig. 10. Model of LED and secondary optics in a triangulation grid, his photometric body and luminous intensity curve

3. Bayneva I. I. Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 3. P. 6479–6487.
4. Fournier F. R., Cassarly W. J., Rolland J. P. Fast freeform reflector generation using source-target maps // Optics Express. 2010. Vol. 18. No. 5. P. 5295–5304.
5. Ries H., Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces // Journal of Optical Society of America A. 2002. Vol. 19. No. 3. P. 590–595.
6. Байнева И. И., Байнев В. В. Применение программ оптического моделирования в учебной и научной деятельности // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. №4 (28). С. 53–62.
7. Федосин С. А., Байнев В. В. Геометрические модели и их программная реализация для компьютерного исследования и проектирования световых приборов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. №6. С. 35–40.
8. Байнев В. В. Программная реализация моделей оптических систем для проектирования осветительных приборов // Прикладная информатика. 2017. №2 (68). С. 52–59.
2. Tsyupak Yu. A. *Opticheskie sistemy svetodiodnykh svetovykh priborov* [The optical system of LED light devices]. Saransk, 2009. 38 p.
3. Bayneva I. I. Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 3, pp. 6479–6487.
4. Fournier F. R., Cassarly W. J., Rolland J. P. Fast freeform reflector generation using source-target maps. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 5, pp. 5295–5304.
5. Ries H., Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces. *Journal of Optical Society of America A*. 2002, vol. 19, no. 3, pp. 590–595.
6. Bayneva I. I., Baynev V. V. *Primenenie programm opticheskogo modelirovaniya v uchebnoi i nauchnoi deyatel'nosti* [Application of programs of optical modeling in educational and scientific activity]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* — Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making, 2015, no. 4 (28), pp. 53–62.
7. Fedosin S. A., Baynev V. V. *Geometricheskie modeli i ikh programmaya realizatsiya dlya komp'yuternogo issledovaniya i proektirovaniya svetovykh priborov* [The Geometric Models for Computer Research and Design of Lighting Devices]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2016, no. 6, pp. 35–40.
8. Baynev V. V. The Program Realization of Optic Models for Design of Lighting Devices. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2017, no. 2 (68), pp. 52–59 (in Russian).

References

1. Baynev V. V., Bayneva I. I. *Opticheskie sistemy dlya svetodiodov* [Optical systems for light-emitting diodes]. *Fotonika* — Photonics, 2016, no. 2 (56), pp. 84–93.
8. Baynev V. V. The Program Realization of Optic Models for Design of Lighting Devices. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2017, no. 2 (68), pp. 52–59 (in Russian).

V. Baynev, Department of Automated information processing systems and Management, Institute of Electronic and Light Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, bw14@mail.ru

Computer modeling and calculation of LED lighting systems

The article describes the optical system for the light-emitting diodes. Analyzed the features of the secondary use of the optical elements in the form of lenses and prisms for different LED emission patterns in space. Formulated the requirements imposed on the optical elements. The paper considers the problem of designing modern lighting devices and optical systems. Analysis of the development of lighting devices shows that the main stage in their development is the calculation of the optical system, the results of which largely determine the lighting fixtures and functional characteristics. Application and development of specialized software for the calculation and simulation of lighting devices significantly facilitates and speeds up the process of their design. The paper presents a mathematical model developed by the software system, described in the hierarchical structure of the simulation geometry of lighting devices. Building an extended triangulation grid facilitates the approximation of smooth surfaces of the optical element and the photometric body. The software package is carried out modeling of LED optical systems and luminaires based on them using surface models, ray tracing and calculation of photometric body.

Keywords: LED, light source, optical system, luminous intensity curve, photometric body, lens, collimator, reflector, calculation, chart, program, modeling.

About authors: V. Baynev, *Postgraduate*

For citation: Baynev V. Computer modeling and calculation of LED lighting systems.

Prikladnaya informatika — Journal of Applied Informatics, 2017, vol. 12, no. 3 (69), pp. 40–49 (in Russian).