

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО–
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,
METROLOGY AND
INFORMATION
MEASUREMENT DEVICES
AND SYSTEMS

УДК 628.931

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197

Декомпозиционная оптико-механическая модель светодиодного излучающего элемента^{*}

Ю.В. ЮЛАЕВА^а, А.Ю. ХОМЯКОВ^б, В.И. ТУЕВ^с

634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

^а yuliya.ryapolova@mail.ru ^б khomyakov.a.yu@gmail.com

^с tvi_retam@main.tusur.ru

Светоизлучающие диоды по значению световой отдаче (светового потока на единицу потребляемой электрической мощности) опередили традиционные источники света, что вызывает повышенный интерес разработчиков светодиодных ламп в типоразмере ламп накаливания. При проектировании светодиодных ламп для прямой замены ламп накаливания необходимо и в этих световых приборах обеспечить сферическое распределение света. Наилучшей по равномерности пространственного распределения света признана конструкция лампы с нитевидными светодиодными излучающими элементами (СИЭ).

В настоящей работе разработана декомпозиционная модель светодиодного излучающего элемента, которая создана на основе параметров оптико-механической модели светодиодных излучающих кристаллов и включает следующие последовательно выполняемые действия:

- построение геометрической модели СИЭ;
- определение свойств поверхностного источника СИЭ и углового распределения излучения модели СИЭ как точечного излучателя;
- разработка первичной модели светодиодного кристалла с последующей настройкой ее параметров;
- проверка адекватности декомпозиционной модели сравнением с экспериментально измеренными параметрами СИЭ.

Проведена оценка качества модели СИЭ как точечного излучателя, для этого сравнили усредненные измеренные и смоделированные КСС при одинаковых азимутальных углах.

Расхождения между расчетными и экспериментальными данными не превышают 10 %, что подтверждает высокую точность модели СИЭ как точечного излучателя. Полученный файл определяет свойства поверхностного источника и значение светового потока СИЭ, равного 254 мВт.

Модель характеризуется повышенной универсальностью и может быть использована разработчиками светотехнических устройств с произвольной конфигурацией светодиодных излучающих элементов и светодиодных кристаллов в них.

^{*} Статья получена 12 августа 2020 г.

Ключевые слова: нитевидный светодиодный излучающий элемент, кривая силы света, декомпозиционная модель, световой поток, ламбертовский излучатель, программная среда TracePro, полиномиальное приближение, Normal-вектор, Up-вектор, полярный угол, азимутальный угол.

ВВЕДЕНИЕ

Светодиодные лампы по значению световой отдачи (светового потока на единицу потребляемой электрической мощности) опередили традиционные источники света [1], что вызывает повышенный интерес разработчиков светотехнических устройств различного назначения: уличных и офисных светильников [2], прожекторов [3], устройств досветки растений [4] и т. д. Твердотельные энергоэффективные генераторы света используются и в конструкциях ламп в типоразмере ламп накаливания [5]. Конструирование таких светодиодных ламп имеет важную особенность. По требованиям пожарной и электрической безопасности лампы используются в составе светотехнических устройств – светильников, люстр, бра и т. д. Изначально такие светотехнические устройства проектировались под лампы накаливания, имеющие равномерное пространственное распределение светового потока. При проектировании светодиодных ламп для прямой замены ламп накаливания необходимо и в этих световых приборах обеспечить сферическое распределение света. Наилучшей по равномерности пространственного распределения света признана лампа с нитевидными светодиодными излучающими элементами (СИЭ) [6–9]. Световой поток лампы определяется пространственным суммированием световых потоков нескольких (в реальных конструкциях от 2 до 12) излучающих элементов, собранных внутри лампы в объемную излучающую свет конструкцию.

Имеются усредненные кривые сил света (КСС) светодиодного излучающего элемента, состоящего из 28 светодиодных кристаллов синего цвета свечения, приклеенных через равные промежутки на одной стороне керамической основы. КСС измерялись для азимутальных углов 0, 30, 45, 60 и 90 градусов. Полярный угол при этом изменялся от минус 150 до 150 градусов. Всего было измерено 40 образцов СИЭ. Усреднение КСС проводилось после исключения из результатов измерений грубых ошибок. Усредненные КСС для пяти различных значений азимутальных углов θ показаны на рис. 1.

Сила света при $\theta = 0^\circ$ изменяется в пределах полярного угла α от минус 90 градусов до 90 градусов. При других значениях θ полярный угол α изменяется от минус 100 градусов до 100 градусов. Значения силы света вне этих диапазонов изменения угла α обусловлены шумами фотоприемника и фоновым излучением. При расчете параметров математических моделей «шумовые» значения сил света не учитываются.

После исключения грубых ошибок и усреднения КСС были нормализованы. Нормализованные КСС аппроксимировались полиномами вида

$$I(\alpha) = \beta_0 + \beta_1 \alpha^2 + \beta_2 \alpha^4, \quad (1)$$

где $I(\alpha)$ – сила света в направлении полярного угла α ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – коэффициенты множественной линейной регрессии.

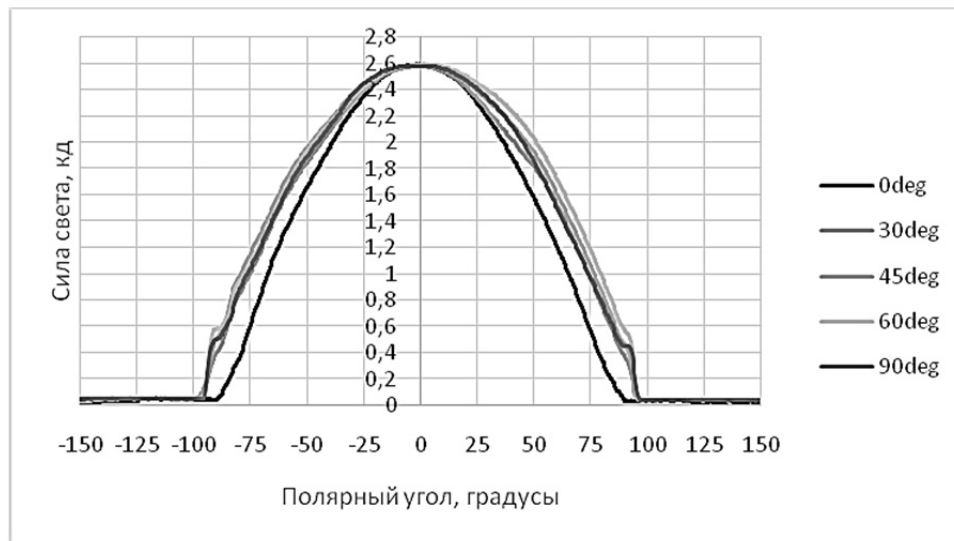


Рис. 1. Усредненные КСС СИЭ при различных азимутальных углах

Fig. 1. Average LIDCs of the LED emitting element at different azimuth angles

В табл. 1 сведены коэффициенты β_0 , β_1 , β_2 выражения (1) для нормализованных КСС при различных азимутальных углах θ . В этой же таблице приведены коэффициенты детерминации и средние ошибки аппроксимации.

Таблица 1

Table 1

Параметры моделей КСС в выражении (1)

LIDC model parameters in expression (1)

θ , град.	Диапазон α , град.	β_0	β_1 , град. ⁻²	β_2 , град. ⁻⁴	R^2	$\eta_{\text{аппрокс.}} \%$
0	-90°...90°	$9,978 \cdot 10^{-1}$	$-1,613 \cdot 10^{-4}$	$4,527 \cdot 10^{-9}$	0,9978	5,87
30	-100°...100°	$9,924 \cdot 10^{-1}$	$-1,181 \cdot 10^{-4}$	$1,691 \cdot 10^{-9}$	0,9981	7,15
45	-100°...100°	$9,984 \cdot 10^{-1}$	$-9,974 \cdot 10^{-5}$	$-2,835 \cdot 10^{-10}$	0,9975	10,42
60	-100°...100°	$9,995 \cdot 10^{-1}$	$-9,664 \cdot 10^{-5}$	$-4,408 \cdot 10^{-10}$	0,9963	11,60
90	-100°...100°	1,008	$-1,191 \cdot 10^{-4}$	$1,775 \cdot 10^{-9}$	0,9974	9,71

Полученные математические модели можно использовать для создания файлов поверхностных источников (surface source) системы оптико-механического моделирования Trace Pro для СИЭ с односторонним регулярным расположением кристаллов. Недостатком модели является недостаточная универсальность, так как модель не позволяет рассчитывать световые параметры ламп со спиральными, дуговыми и другими формами СИЭ, характеризующимися неодинаковым расположением кристаллов в пространстве, а также различными расстояниями между ними.

Целью работы является разработка декомпозиционной модели светодиодного излучающего элемента.

Декомпозиционная модель светодиодного излучающего элемента строится на основе параметров оптико-механической модели светодиодных излучающих кристаллов и включает следующие последовательно выполняемые действия:

- построение геометрической модели СИЭ;
- определение свойств поверхностного источника СИЭ и углового распределения излучения модели СИЭ как точечного излучателя;
- разработка первичной модели светодиодного кристалла с последующей настройкой ее параметров;
- проверка декомпозиционной модели сравнением с экспериментально измеренными параметрами СИЭ.

Работы выполнены с учетом следующих упрощений и допущений:

- все кристаллы светодиодного излучающего элемента считаются одинаковыми;
- кристаллы не влияют друг на друга в процессе излучения, и световой поток СИЭ есть величина аддитивная световых потоков кристаллов.

1. ГЕОМЕТРИЯ И СТРУКТУРА СИЭ

Геометрические размеры керамического основания СИЭ: $27 \times 0,8 \times 0,4$ мм. Марка керамики для текущей задачи моделирования СИЭ не важна. Важно лишь то, что основание имеет белый цвет и шероховатую поверхность, также оно не пропускает излучение синего цвета.

Модель светодиодных кристаллов A17G-CFBW05, производитель HCSemitec (Китай). Геометрические размеры кристалла: $0,345 \times 0,175 \times 0,13$ мм. Кристалл состоит из сапфирового основания с эпитаксиально выращенной на нем гетероструктурой GaN/InGaN. Кристаллы имеют синий цвет свечения, доминирующая длина волны в спектре $\lambda_D = 457$ нм, полная ширина спектра на уровне половинного значения составляет 20 нм.

На рис. 2 представлен чертеж СИЭ, а на рис. 3 – геометрическая модель СИЭ, построенная в программной среде TracePro.

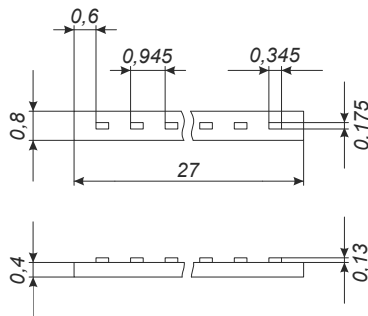


Рис. 2. Чертеж СИЭ

Fig. 2. A drawing of the LED emitting element

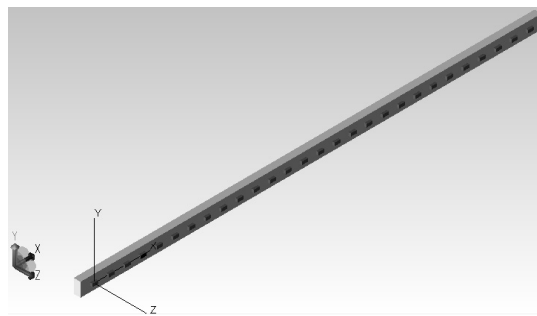


Рис. 3. СИЭ в TracePro

Fig. 3. A LED emitting element in TracePro

В текущей геометрической модели (см. рис. 3) отсутствуют контактные площадки на светодиодных кристаллах и нет проволочек, подводящих ток к кристаллам. Для целей моделирования такие упрощения допустимы, так как в результате явлений дифракции эти элементы «оггибаются» излучаемыми кристаллом световыми волнами.

2. К ЗАДАЧЕ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО КРИСТАЛЛА

После построения геометрической модели СИЭ поверхностям кристаллов нужно задать свойства излучателей. Так как доступны только результаты измерений КСС СИЭ из 28 кристаллов, а не результаты измерения одного кристалла, необходимо решить задачу о нахождении КСС одного кристалла.

Согласно [10] при расчете светораспределения многомодульного светодиодного прибора (СП) со светодиодами мы имеем право располагать фотометрические тела светодиодов в одной точке и арифметически складывать силы света, совпадающие по направлению. При этом эквивалентность реальному прибору не нарушается. На форму и размеры фотометрических тел накладывается лишь такое ограничение: лучи света, излучаемые одним источником света, не должны экранироваться поверхностями других источников света или иными конструктивными элементами СП. Понятие силы света строго применимо лишь к так называемому точечному источнику [10].

Расстояние между фотоприемником гониометрической установки и СИЭ в процессе измерения КСС составляло 2 м, а продольный размер самого СИЭ равен 27 мм (см. рис. 2). Размер СИЭ в 74 раза меньше, чем расстояние до фотоприемника, поэтому в первом приближении СИЭ можно считать точечным источником излучения, а отдельно взятый светодиодный кристалл и подавно. Все кристаллы СИЭ в пространстве ориентированы одинаково (см. рис. 3), поэтому КСС всех кристаллов СИЭ есть арифметическая сумма сил света, совпадающих по направлению. Это значит, что нормализованная КСС одного кристалла СИЭ совпадает с нормализованной КСС всего СИЭ.

Рассмотрение СИЭ как точечного источника излучения не дает никакой информации о распределении светового потока между кристаллами и тем более о долях светового потока, приходящихся на каждую грань кристалла.

Можно считать, что всё излучение выходит через верхнюю грань «кристалла» (в положительном направлении оси OZ на рис. 3), а точнее, геометрического примитива, выступающего в роли кристалла, и именно на этой грани формируется имеющееся угловое распределение света. Однако такая модель не учитывает выход излучения через боковые грани кристалла и, значит, не учитывает взаимное влияние кристаллов друг на друга. То есть не будут учтены эффекты преломления лучей света на боковых гранях соседних кристаллов, эффекты прохождения света сквозь материал основания соседних кристаллов. Также не будет учтено рассеяние света на границе керамического основания СИЭ.

В рамках настоящей работы рассматривается процесс создания оптико-механической модели светодиодного кристалла, излучающего из верхней и боковых граней, и СИЭ на основе моделей таких кристаллов в TracePro.

3. СВОЙСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА В TRACEPRO

Чтобы поверхность излучала так, как необходимо разработчику СП, необходимо создать файл свойства поверхностного источника для TracePro (Surface Source Property).

Файл свойства поверхностного источника является текстовым файлом. Файл свойства поверхностного источника содержит информацию о потоке, о спектральном составе и об угловом распределении света.

Изменение полярного угла α и азимутального угла θ в TracePro продемонстрировано на рис. 4.

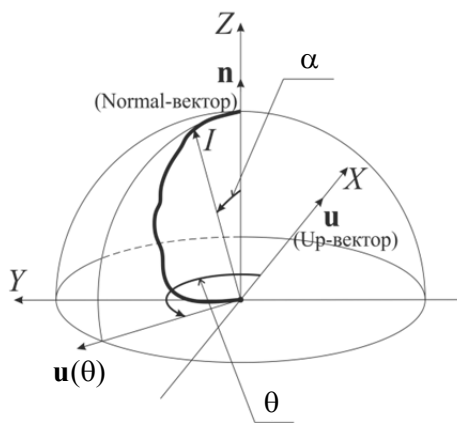


Рис. 4. Полярный и азимутальный углы
в TracePro и КСС $I(\theta, \alpha)$

Fig. 4. Polar and azimuth angles in TracePro
and LIDCs $I(\theta, \alpha)$

В TracePro для задания нулевых полярного и азимутального углов используются два вектора: Normal-вектор (\mathbf{n} на рис. 4) и Up-вектор (\mathbf{u} на рис. 4). Up-вектор задает направление, от которого отсчитываются азимутальные углы (или встречающееся в терминологии TracePro название «горизонтальные углы»). Вектор нормали задает направление, от которого отсчитываются полярные углы (или встречающееся в терминологии TracePro название «вертикальные углы»). Например, на рис. 4 вектор нормали \mathbf{n} совпадает по направлению с осью Z, а Up-вектор \mathbf{u} – с осью X. Поворачивая Up-вектор вокруг вектора нормали на некоторый угол θ ($\mathbf{u}(\theta)$, см. рис. 4), получаем сечение фотометрического тела излучателя плоскостью, образованной векторами \mathbf{n} и $\mathbf{u}(\theta)$. В этой плоскости строится КСС $I(\theta, \alpha)$ для азимутального угла θ [11, 12].

Имея результаты измерения КСС или их математические модели для различных азимутальных и полярных углов, а также зная суммарный световой поток и спектр излучения, можно сформировать свойство поверхностного источника для TracePro и применить его к любой излучающей поверхности опико-механической модели. Если файл поверхностного свойства излучателя сформирован корректно и параметры моделирования заданы верно (вектора \mathbf{n} и \mathbf{u} , достаточное количество моделируемых лучей света), то смо-

делированная КСС излучающей поверхности должна повторять измеренную КСС (или КСС, заданную аналитически) или же иметь минимальные расхождения с последней.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЭ КАК ТОЧЕЧНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В TRACEPRO

TracePro для моделирования КСС использует «ушедшие в бесконечность» лучи, т. е. оптико-механическая модель любых геометрических размеров для моделирования КСС в TracePro является точечным источником излучения. Это означает, что в TracePro можно получить КСС реального СП, угловое распределение которого описано файлом свойства поверхностного источника, вне зависимости от его геометрии. Моделирование СП как точечного источника излучения очень удобно для оценки и корректировки полного светового потока СП.

Для создания файла свойства поверхностного источника, описывающего угловое распределение света СИЭ, необходимо проанализировать нормализованные измеренные КСС, представленные на рис. 1. Полярный угол α в файле свойства поверхностного источника может изменяться от нуля до 90 градусов, а азимутальный угол θ – от нуля до 359 градусов. Однако на рис. 1 полярный угол изменяется от минус 90 до 90 градусов и от минус 100 до 100 градусов. Необходимо избавиться от отрицательных полярных углов. Для этого на рис. 5 схематически изобразим СИЭ сверху (вектор \mathbf{n} направлен на читателя перпендикулярно плоскости рисунка) и обозначим полярные и азимутальные углы в диапазонах, используемых при гониометрических измерениях, и в диапазонах, используемых в файлах поверхностных источников TracePro.

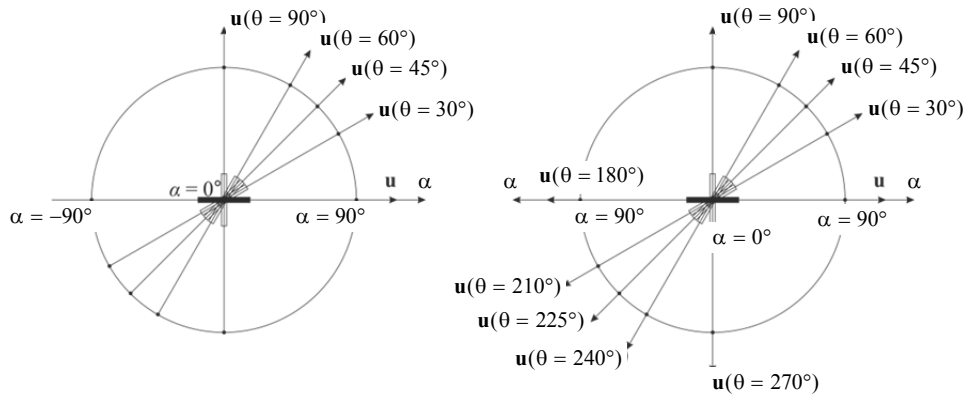


Рис. 5. Полярные и азимутальные углы при гониометрических измерениях (слева) и углы, используемые в файлах поверхностных источников TracePro (справа)

Fig. 5. Polar and azimuth angles for goniometric measurements (left) and angles used in TracePro surface source files (right)

При сопоставлении левой и правой частей рис. 5, видно, что отрицательным значениям полярного угла α при гониометрических измерениях соответствуют равные им по модулю значения полярного угла файла поверхност-

ного источника TracePro, но при азимутальных углах, больших на 180 градусов. Таким образом, обладая набором измеренных нормализованных КСС для пяти азимутальных углов с диапазонами изменения полярного угла от минус 90 до 90 градусов, изображенных на рис. 1, можно получить набор КСС для десяти азимутальных углов с диапазонами изменения полярного угла от нуля до 90 градусов для файла поверхностного источника TracePro.

Однако количество азимутальных углов для файла поверхностного источника можно увеличить, приняв во внимание симметрию СИЭ. Действительно, если обратить внимание на рис. 5 справа, то вторую и четвертую четверти этого рисунка можно равносильно заполнить либо симметричным отражением первой и третьей четверти относительно горизонтальной оси, либо относительно вертикальной оси. Тогда для файла свойства поверхностного источника будет уже набор КСС для шестнадцати азимутальных углов.

Следует отметить, что некоторые графики на рис. 1 построены в диапазонах изменения полярного угла от минус 100 до 100 градусов, но TracePro при загрузке файлов свойств поверхностных источников не воспринимает полярные углы больше 90 градусов.

Создание файла свойства поверхностного источника вручную – задача трудоемкая и займет много времени. Поэтому лучшим решением будет автоматизация генерирования такого файла с помощью компьютерной программы. Практически все необходимые для программы входные данные уже есть:

- 1) известен формат файла свойства поверхностного источника;
- 2) имеется набор аналитических выражений, описывающих КСС при различных азимутальных углах;
- 3) известен диапазон изменения полярного угла;
- 4) известен спектр излучения СИЭ.

Единственный параметр, который остался неопределенным, – это полный световой поток СИЭ, но с помощью TracePro его можно определить, не прибегая к сложным математическим расчетам. Помимо перечисленных выше параметров, понадобится шаг изменения полярного угла. Его не следует делать слишком большим из соображений точности описания КСС дискретным набором пар значений «полярный угол–сила света», но и не стоит делать слишком маленьким, чтобы вычисления не заняли продолжительное время и файл свойства поверхностного источника не получился слишком большим. В настоящей работе выбраны значения 0,5...1 градус.

На основании изложенных выше требований была написана программа-генератор файлов свойств поверхностного источника на языке программирования C#. С помощью этой программы был сгенерирован файл, описывающий угловое распределение излучения модели СИЭ как точечного излучателя.

Первоначальный полный световой поток СИЭ выбирался из следующих соображений. В процессе измерений КСС СИЭ при различных азимутальных углах контролировалось потребление электрической энергии СИЭ. Так, в среднем падение напряжения на образцах СИЭ при фиксированном прямом токе $I_{\text{потр}} = 10$ мА составляет $U_{\text{потр}} = 76,3$ В. В спецификации на светодиодные кристаллы, из которых состоит СИЭ, приведен график зависимости относительной световой отдачи (светового потока), нормализованной на 20 мА, от прямого тока (рис. 6), по которому можно определить КПД кристалла при токе 10 мА.

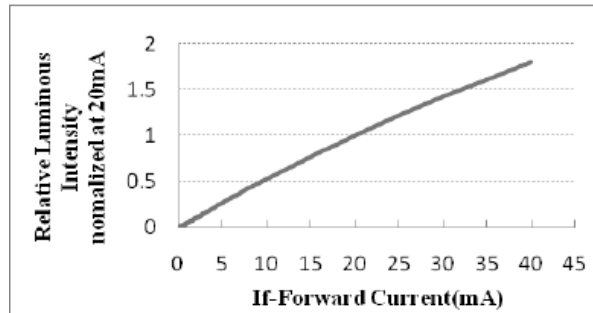


Рис. 6. Зависимость относительной световой отдачи, нормализованной по его значению при токе 20 мА (из спецификации на светодиодный кристалл)

Fig. 6. Dependence of the relative luminous efficiency normalized by its value at a current of 20 mA (from the specification for the LED crystal)

Как видно из рис. 6, КПД одного кристалла при прямом токе 10 мА составляет $\eta = 0,5$. Тогда, световой поток СИЭ в ваттах в первом приближении можно оценить по формуле

$$\Phi_{W\text{СИЭ}} = \eta U_{\text{потр}} I_{\text{потр}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{потр}}$ – напряжение в вольтах; $I_{\text{потр}}$ – ток в амперах.

Расчет по формуле (2) для СИЭ дает световой поток

$$\Phi_{W\text{СИЭ}} = \eta U_{\text{потр}} I_{\text{потр}} = 0,5 \cdot 76,3 \cdot 0,01 = 0,3815 \text{ Вт} = 381,5 \text{ мВт}.$$

В качестве геометрической модели для моделирования КСС СИЭ как точечного излучателя в TracePro был использован куб со сторонами $1 \times 1 \times 1$ мм (для точечного излучателя в TracePro это допустимо). В качестве излучающей поверхности выбрана грань куба, перпендикулярная положительному направлению оси Z. Этой грани присвоено сгенерированное свойство поверхностного источника с полным световым потоком $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 381,5$ мВт.

На рис. 7 показано смоделированное семейство КСС СИЭ как точечного излучателя с полным световым потоком $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 381,5$ мВт.

Как видно на рис. 7, максимальная сила света (в направлении полярного угла $\alpha = 0^\circ$) равна 3,9 кд, что больше, чем максимальная сила света, равная 2,6 кд на рис. 1. Это связано с тем, что первичная оценка светового потока СИЭ в $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 381,5$ мВт ошибочна. Ошибка связана с тем, что нам не известны процессы взаимодействия соседних кристаллов СИЭ, и простая формула (2) их не учитывает. Однако теперь, обладая свойством поверхностного источника, световой поток можно изменять прямо в TracePro. Скорректированный световой поток модели СИЭ как точечного излучателя составляет $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 254$ мВт, и смоделированное семейство КСС при таком значении потока представлено на рис. 8.

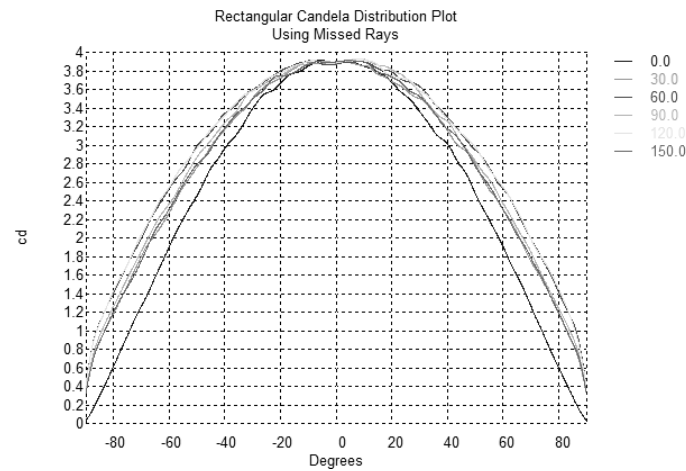


Рис. 7. Смоделированное семейство КСС СИЭ как точечного излучателя с полным световым потоком $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 381,5$ мВт

Fig. 7. A modeled family of light intensity curves of an LED emitting element as a point emitter with a total luminous flux $F_W = 381,5$ mW

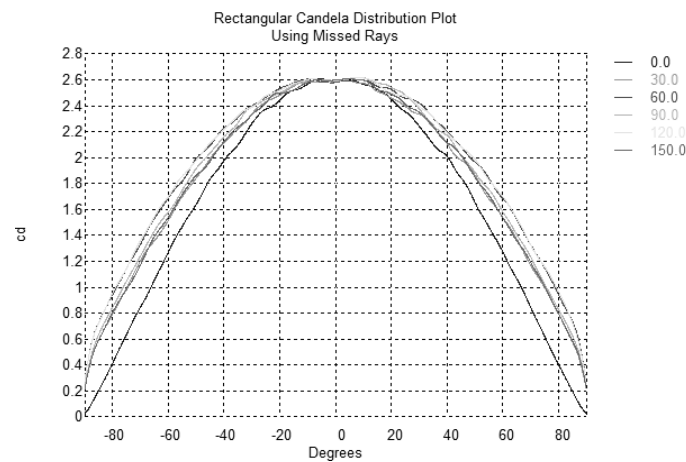


Рис. 8. Смоделированное семейство КСС СИЭ как точечного излучателя с полным световым потоком $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 254$ мВт

Fig. 8. A modeled family of light intensity curves of an LED emitting element as a point emitter with a total luminous flux $F_W = 254$ mW

Как видно на рис. 8, теперь максимальная сила света модели СИЭ как точечного излучателя составляет 2,6 кд, что соответствует максимальной силе света (см. рис. 1). Уменьшение светового потока связано с процессами поглощения света, излучаемого боковыми гранями кристаллов, материалом соседних кристаллов, а также возможным более низким КПД кристаллов, чем заявлено в спецификации.

Теперь для оценки качества модели СИЭ как точечного излучателя необходимо сравнить усредненные измеренные и смоделированные КСС при

одинаковых азимутальных углах. На рис. 9–13 сравниваются усредненные измеренные и смоделированные КСС.

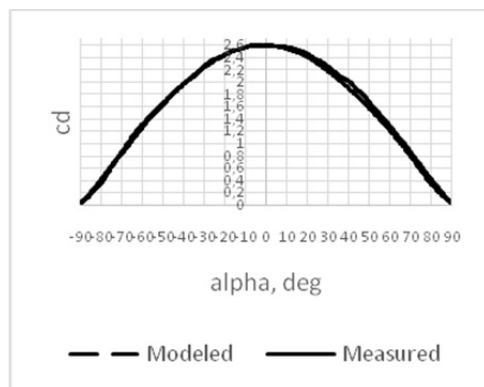


Рис. 9. Усредненная измеренная КСС СИЭ (сплошная линия) и смоделированная КСС (пунктирная линия) при $\theta = 0^\circ$

Fig. 9. An average measured LIDC of the LED emitting element (solid line) and simulated LIDC (dashed line) at $\theta = 0^\circ$

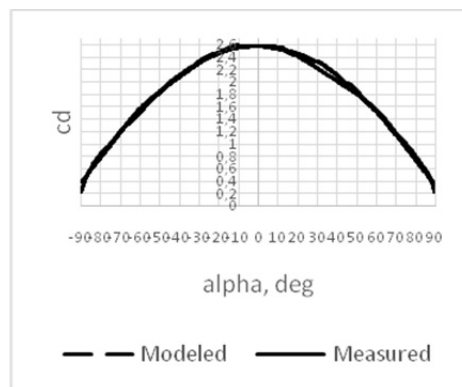


Рис. 10. Усредненная измеренная КСС СИЭ (сплошная линия) и смоделированная КСС (пунктирная линия) при $\theta = 30^\circ$

Fig. 10. An average measured LIDC of the LED emitting element (solid line) and simulated LIDC (dashed line) at $\theta = 30^\circ$

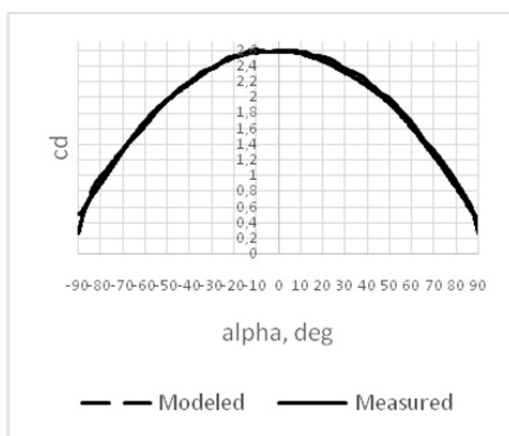


Рис. 11. Усредненная измеренная КСС СИЭ (сплошная линия) и смоделированная КСС (пунктирная линия) при $\theta = 45^\circ$

Fig. 11. An average measured LIDC of the LED emitting element (solid line) and simulated LIDC (dashed line) at $\theta = 45^\circ$

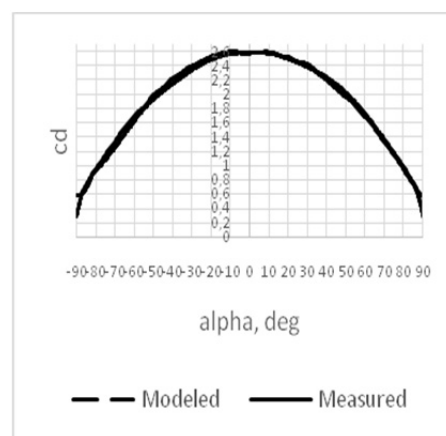


Рис. 12. Усредненная измеренная КСС СИЭ (сплошная линия) и смоделированная КСС (пунктирная линия) при $\theta = 60^\circ$

Fig. 12. An average measured LIDC of the LED emitting element (solid line) and simulated LIDC (dashed line) at $\theta = 60^\circ$

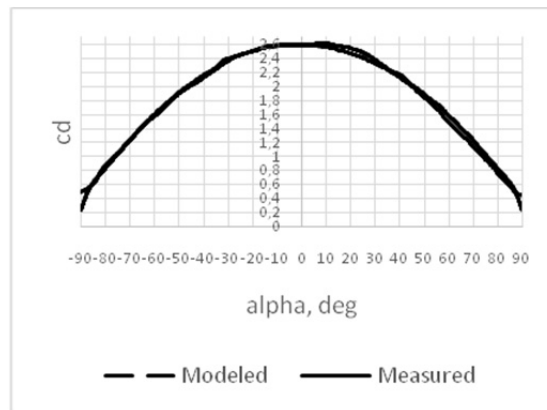


Рис. 13. Усредненная измеренная КСС СИЭ (сплошная линия) и смоделированная КСС (пунктирная линия) при $\theta = 90^\circ$

Fig. 13. An average measured LIDC of the LED emitting element (solid line) and simulated LIDC (dashed line) at $\theta = 90^\circ$

Расхождения между расчетными и экспериментальными данными не превышают 10 %, что подтверждает высокую точность модели СИЭ как точечного излучателя. Полученный файл свойства поверхностного источника и значение светового потока СИЭ, равного $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 254$ мВт, можно использовать для дальнейшего создания модели светодиодного кристалла.

5. ПЕРВИЧНАЯ МОДЕЛЬ СВЕТОДИОДНОГО КРИСТАЛЛА

Чтобы перейти от модели СИЭ как точечного излучателя к модели одного светодиодного кристалла, излучающего как из верхней, так и из боковых граней, необходимо знать КСС одного кристалла, геометрию кристалла и его полный световой поток. Нормализованная КСС одного кристалла СИЭ совпадает с нормализованной КСС всего СИЭ. Геометрические размеры кристалла известны из спецификации. Неизвестным остается лишь световой поток одного кристалла. Для первичной оценки светового потока одного кристалла в настоящей работе принято допущение, что кристаллы СИЭ никак не влияют друг на друга в процессе излучения и световой поток СИЭ есть величина аддитивная световых потоков кристаллов. Исходя из этого допущения мощность светового потока одного кристалла можно рассчитать по формуле

$$\Phi_{W\text{кр}} = \Phi_{W\text{СИЭ}} / n, \quad (3)$$

где $\Phi_{W\text{СИЭ}}$ – световой поток СИЭ в ваттах; n – количество кристаллов в СИЭ.

Так как СИЭ состоит из $n = 28$ кристаллов, а мощность светового потока СИЭ равна $\Phi_{W\text{СИЭ}} = 254$ мВт, расчет по формуле (3) дает первичную оценку мощности светового потока кристалла:

$$\Phi_{W_{кр}} = \Phi_{W_{СИЭ}} / n = 254 / 28 = 9,07 \text{ мВт.}$$

Теперь, зная мощность, световой поток одного кристалла и его КСС, можно построить модель кристалла как точечного источника излучения.

Чтобы перейти от модели кристалла как точечного излучателя к оптико-механической модели с реальными геометрическими размерами, необходимо:

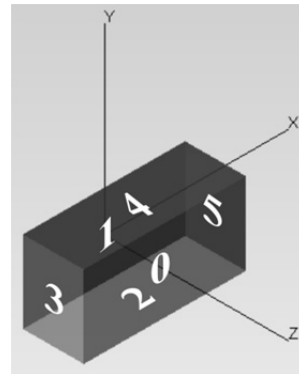
1) распределить полный световой поток кристалла между излучающими гранями модели;

2) рассматривать каждую грань как точечный источник излучения со своей частичной КСС.

Светодиодный кристалл имеет форму параллелепипеда. В рамках оптико-механической модели излучающими являются пять граней этого параллелепипеда. Чтобы посчитать световой поток сквозь эти грани, зададим в качестве точечного излучателя грань параллелепипеда, которая соприкасается с керамическим основанием СИЭ, как показано на рис. 14 (грань 1). Свет распространяется в положительном направлении оси Z (нулевой полярный угол совпадает с осью OZ). Параллелепипеду не присвоены никакие свойства материалов, поэтому свет внутри него распространяется без потерь и выходит из граней 0, 2, 3, 4 и 5.

Рис. 14. Нумерация граней графического примитива «параллелепипед» в TracePro

Fig. 14. Numbering of faces of the "parallelepiped" graphic primitive in TracePro



TracePro считает световой поток, приходящийся на каждую грань параллелепипеда, а также есть возможность построить КСС каждой грани по отдельности. Эти возможности позволяют создать отдельные файлы свойств поверхностных источников граней.

На рис. 15–20 представлены смоделированные КСС граней 0, 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно (рис. 14).

Графики КСС, представленные на рис. 15–20, TracePro позволяет сохранить в текстовом формате. При сохранении главное помнить, что в текстовый файл сохранится тот набор азимутальных углов, который указан на графике, а также углы, большие на 180 градусов, чем указанные на графике, но не больше 360 градусов. В случае рис. 15–20 сохраняются углы 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 и 330 градусов. Чем большее количество азимутальных углов будет сохранено в текстовые файлы, тем более точные файлы свойств поверхностных источников можно сгенерировать на их основе.

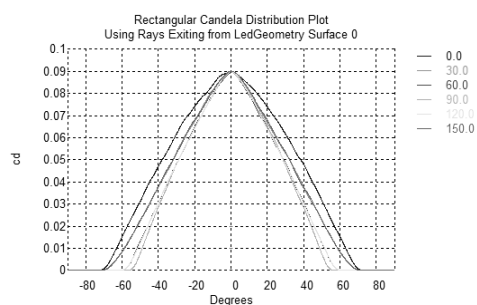


Рис. 15. Смоделированные в TracePro КСС грани 0

Fig. 15. Faces (0) modeled in TracePro LIDC

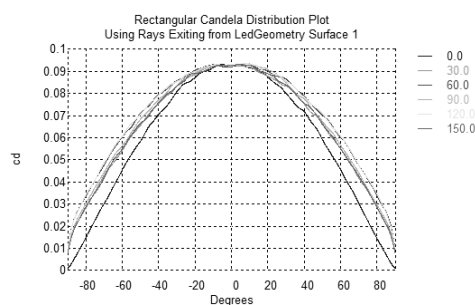


Рис. 16. Смоделированные в TracePro КСС грани 1

Fig. 16. Faces (1) modeled in TracePro LIDC

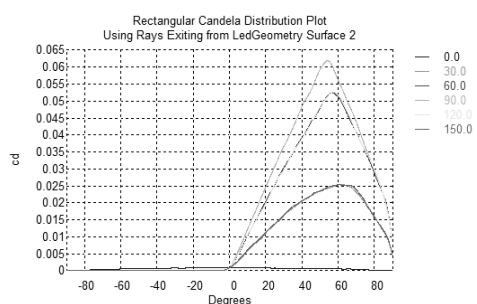


Рис. 17. Смоделированные в TracePro КСС грани 2

Fig. 17. Faces (2) modeled in TracePro LIDC

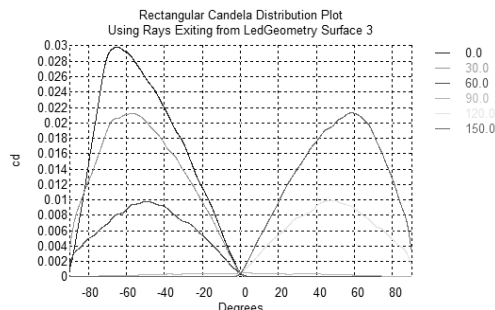


Рис. 18. Смоделированные в TracePro КСС грани 3

Fig. 18. Faces (3) modeled in TracePro LIDC

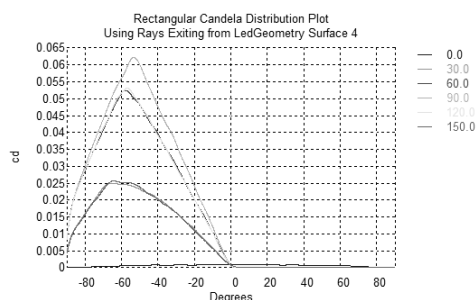


Рис. 19. Смоделированные в TracePro КСС грани 4

Fig. 19. Faces (4) modeled in TracePro LIDC

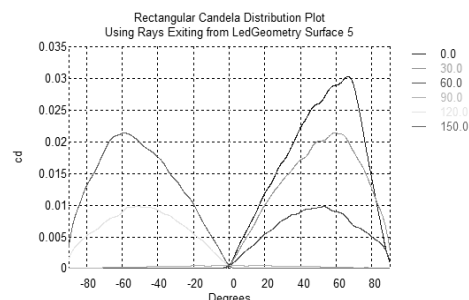


Рис. 20. Смоделированные в TracePro КСС грани 5

Fig. 20. Faces (5) modeled in TracePro LIDC

Есть еще одно обстоятельство, которое необходимо учитывать при сохранении текстовых файлов частичных КСС граней. Мы имеем право располагать фотометрические тела светодиодов в одной точке и арифметически складывать силы света, совпадающие по направлению. Так как для каждой грани смоделирован набор КСС, то, по сути, этот набор описывает фотометрическое тело грани. Чтобы сложить эти фотометрические тела, необходимо

«сжать» все грани в одну точку (чтобы получить модель точечного излучателя), а для сложения КСС все грани необходимо ориентировать одинаково (чтобы полярные и азимутальные углы всех фотометрических тел совпадали по направлению).

Оптико-механическая модель любых геометрических размеров для моделирования КСС в TrasePro является точечным источником излучения. По сути, все грани модели светодиодного кристалла и так «сжимаются» в одну точку, если наблюдать модель из бесконечности. А для правильной ориентации фотометрических тел граней можно использовать векторы **n** и **u**, которые можно задать перед сохранением текстового файла КСС грани [13–15]. На рис. 21 изображена развертка излучающих граней параллелепипеда модели светодиодного кристалла и соответствующие граням ориентации векторов **n** и **u**, чтобы набор КСС совпадающих азимутальных и полярных углов суммы всех фотометрических тел граней будущей модели светодиодного кристалла совпадал с рис. 16. Положительное направление оси *Z* соответствует направлению максимальной силы света.

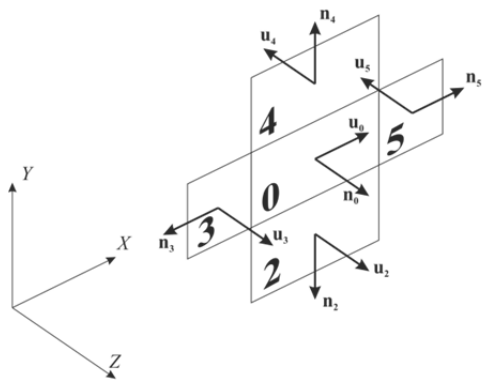


Рис. 21. Normal-вектор и Up-вектор граней

Fig. 21. Normal-vector and Up-vector of faces

Для удобства ввода ориентаций векторов **n** и **u** в TrasePro, рис. 21 представлен в виде табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Ориентации нормальных и Up-векторов граней
Orientations of normal and Up-vectors of faces

Номер грани	Нормальный вектор n			Up-вектор u		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
0	0	0	1	1	0	0
2	0	−1	0	0	0	1
3	−1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	−1
5	1	0	0	0	0	−1

Для создания файлов поверхностных источников была написана программа, конвертирующая файлы смоделированных КСС каждой грани в файлы свойств поверхностных источников. Также в качестве обязательного параметра в программе используются световые потоки.

Смоделированные КСС светодиодного кристалла, для каждой излучающей грани которого задано свое свойство поверхностного источника, показаны на рис. 22.

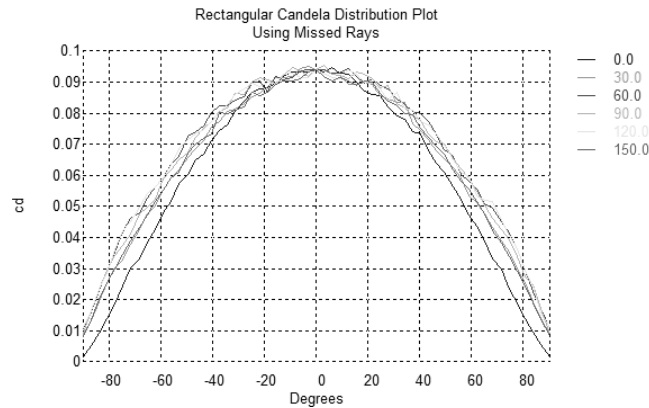


Рис. 22. Смоделированные КСС светодиодного кристалла с индивидуальными свойствами поверхностных источников у каждой грани

Fig. 22. Modeled LED chip LICDs with individual surface source properties on each face

Сравнивая КСС рис. 16 и 22, убеждаемся в повторяемости результатов моделирования светодиодного кристалла как точечного излучателя и объемной оптико-механической модели.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЭ И НАСТРОЙКА МОДЕЛИ СВЕТОДИОДНОГО КРИСТАЛЛА

Теперь, имея объемную оптико-механическую модель светодиодного кристалла, полученную выше, в TracePro можно смоделировать СИЭ согласно описанию, приведенному в разделе 1. Поверхностям светодиодных кристаллов рис. 3 назначены свойства поверхностных источников. Объему кристаллов в окне свойств TracePro задан материал сапфир (Sapphire (Al_2O_3)). Поверхностям керамического основания заданы свойства белых диффузных поверхностей (DiffuseWhite).

На рис. 23 построено семейство КСС СИЭ рис. 3.

При сравнении рис. 8 и 23 видно, что максимальная сила света на рис. 23 выше требуемой, равной 2,6 кд. Это связано с тем, что в модель СИЭ были добавлены материалы кристаллов и основания, поэтому необходимо настроить модель одного кристалла еще раз. Чтобы уменьшилась сила света, необходимо уменьшить суммарный световой поток и повторно получить свойства поверхностных источников для каждой грани кристалла.

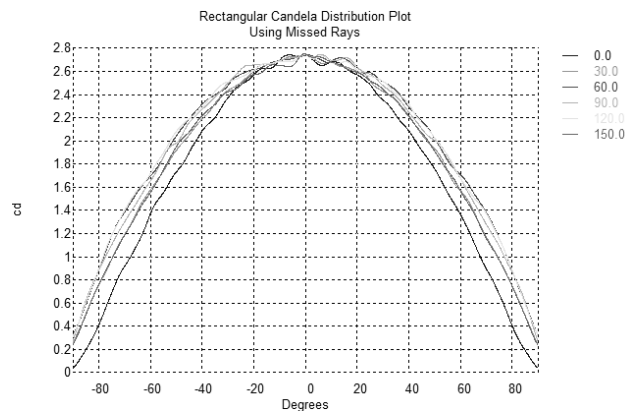


Рис. 23. Семейство КСС первичной модели СИЭ

Fig. 23. Family of LIDCs of the primary model of the LED emitting element

Итоговый световой поток одного кристалла составляет $\Phi_{W_{кр}} = 8,9$ мВт. На рис. 24 построены КСС финальной модели СИЭ рис. 3. Суммарный световой поток СИЭ составил 249,15 мВт.

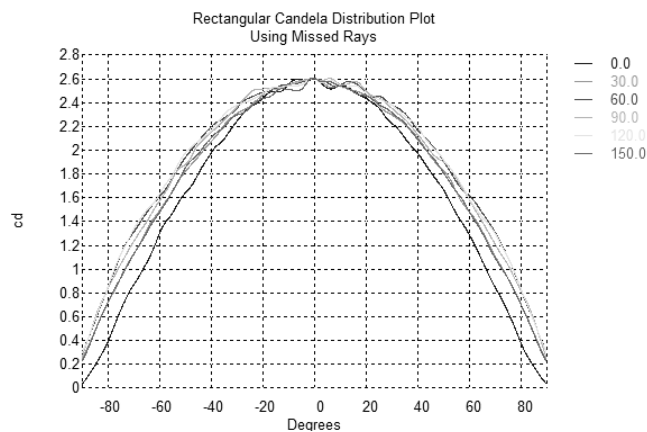


Рис. 24. Финальные КСС СИЭ

Fig. 24. Final LIDCs of the LED emitting element

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе измеренных семейств КСС СИЭ получена практически применимая оптико-механическая модель одного кристалла. Оптико-механическая модель GaN/InGaN полупроводникового кристалла позволяет учесть излучение пяти граней, за исключением той стороны кристалла, которая граничит с основанием, что увеличивает универсальность модели и повышает точность моделирования сложных световых приборов с большим количеством излучателей.

Разработанная декомпозиционная модель СИЭ с погрешностью не более 10 % описывает реальный СИЭ.

Описанный алгоритм экстракции модели может использоваться для получения оптико-механических моделей светодиодных кристаллов других марок и производителей.

Полученная в работе оптико-механическая модель светодиодного кристалла может быть полезна разработчикам светодиодных излучающих элементов с произвольным пространственным расположением светодиодных кристаллов и светодиодных ламп на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schubert E.F.* Light emitting diodes. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 422 p.
2. Акционерное общество "Физтех-Энепро". – URL: <https://ft-e.com/contacts/> (дата обращения: 21.12.2020).
3. ООО "Промышленная группа Светодиодные Технологии". – URL: <http://led02.ru/contacts/> (дата обращения: 21.12.2020).
4. ГроуТехно. Фитосветильники: web-сайт. – URL: <https://growtechno.ru/> (дата обращения: 21.12.2020).
5. LEADlight. – URL: <http://svet21veka.ru/?from=website80.com> (дата обращения: 13.04.2020).
6. Патент на полезную модель № 188947 Российская Федерация, F 21 V 29/10 (2015.01), F 21 V 15/04 (2006.01), F 21 K 9/66 (2016.01). Светодиодная лампа / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Туев В.И., Юлаева Ю.В. – № 2018119785; заявл. 23.05.2018; опубл. 30.04.2019, Бюл. № 13.
7. Исследование макетных образцов светодиодных ламп общего назначения, изготовленных на основе светодиодных линеек / В.С. Солдаткин, В.И. Туев, А.В. Иванов, А.Ю. Олисовец, Ю.В. Ряполова, А.П. Алексеев // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы: тезисы докладов 10-й Всероссийской конференции. – СПб., 2015. – С. 61–62.
8. Investigation of temperature regime and luminous flux of light-emitting element of light emitting diode lamp / D.G. Starosek, D.V. Ozerkin, V.I. Tuev, Y.V. Ryapolova, A.U. Olisovets, A.V. Ermolaev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10, iss. 16. – P. 6944–6948.
9. Ряполова Ю.В., Неверовский К.А., Постолова Е.О. Оптическое моделирование светодиодной лампы // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2016. – Т. 7. – С. 96–98.
10. Прытков С.В. Исследования и расчет оптических систем световых приборов на основе светодиодов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саранск, 2014. – URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovaniya-i-raschet-opticheskikh-sistem-svetovyykh-priborov-na-osnove-svetodiodov> (дата обращения: 21.12.2020).
11. ГОСТ Р 54350–2011. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2011. – 37 с.
12. Азизян Г., Артамонов А., Никифоров С. Гониофотометрическая установка для определения углового распределения силы света // Полупроводниковая светотехника. – 2010. – № 1. – URL: https://www.led-e.ru/articles/measuring/2010_1_41.php (дата обращения: 21.12.2020).
13. Заляжных В.В. Критерий трех сигм. – Режим доступа: <https://arhiuch.ru/st3a.html> (дата обращения: 21.12.2020).
14. Закон Ламберта. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Ламберта (дата обращения: 21.12.2020).
15. Расчет коэффициентов множественной линейной регрессии матричным способом. – URL: <http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-linejnoy-regressii-matricnym-sposobom/> (дата обращения: 21.12.2020).

Юлаева Юлия Витальевна, аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – оптико-механическое моделирование энергоэффективных световых устройств на основе светодиодов. Имеет более 30 печатных работ и учебных пособий. E-mail: yuliya.ryapolova@mail.ru

Хомяков Артем Юрьевич, инженер, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – полупроводниковая светотехника. Имеет более 20 печатных работ и учебных пособий. Email: khomyakov.a.yu@gmail.com

Тувев Василий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

Yulaeva Yulia V., postgraduate student, assistant lecturer at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main direction of her scientific research is the optical-mechanical modeling of energy-efficient lighting devices based on LEDs. She has more than 30 publications and teaching manuals. E-mail: yuliya.ryapolova@mail.ru

Khomyakov Artem Yu., engineer, senior lecturer at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main direction of his scientific research is semiconductor lighting technology. He has more than 20 publications and teaching manuals. Email: khomyakov.a.yu@gmail.com

Tuev Vasily I., D.Sc. (Eng.), associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main direction of his scientific research is technologies for the production of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 publications and teaching manuals. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197

A decomposition optical-mechanical model of a led emitting element*

YU. V. YULAEVA^a, A.YU. KHOMEYAKOV^b, V.I. TUEV^c

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a *yuliya.ryapolova@mail.ru* ^b *khomyakov.a.yu@gmail.com*

^c *tvi_retem@main.tusur.ru*

Abstract

Light-emitting diodes are ahead of traditional light sources in terms of luminous efficacy (luminous flux per unit of electrical power consumption), which arouses an increased interest in the developers of LED lamps in the standard size of incandescent lamps. When designing LED lamps for direct replacement of incandescent lamps, it is necessary to ensure a spherical light distribution in these lighting devices. The design of the lamp with filamentary LED emitting elements is recognized as the best in terms of uniformity of the spatial distribution of light.

In this work, a decomposition model of an LED emitting element has been developed, which is created on the basis of the parameters of an optical-mechanical model of LED emitting crystals, and includes the following sequentially performed actions:

* Received 12 August 2020.

- construction of a geometric model of the LED emitting element;
- determination of the properties of the surface source of the LED emitting element and the angular distribution of radiation of the LED emitting element model as a point emitter;
- development of a primary model of an LED crystal with subsequent adjustment of its parameters;
- verification of the decomposition model by comparison with the experimentally measured parameters of the LED emitting element.

An assessment of the quality of the LED emitting element model as a point emitter was carried out; for this, the averaged measured and modeled LIDCs were superimposed at the same azimuthal angles on top of each other.

The discrepancies between the calculated and experimental data do not exceed 10%, which confirms a high accuracy of the LED emitting element model as a point emitter. The resulting file is the properties of the surface source and the value of the luminous flux of the LED emitting element, equal to $F_W = 254$ mW.

The model is characterized by increased versatility and can be used for LED emitting elements with an arbitrary configuration of LED crystals and LED lamps based on them.

Keywords: Filamentary LED emitting element, luminous intensity curve, decomposition model, luminous flux, Lambert emitter, TracePro software environment, polynomial approximation, Normal vector, Up-vector, polar angle, azimuth angle

REFERENCES

1. Schubert E.F. Light emitting diodes. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 422 p.
2. *Aktsionernoe obshchestvo "Fiztekhn-Energo"* [Joint Stock Company "Phystech-Energo"]. Available at: <https://ft-e.com/contacts/> (accessed 21.12.2020).
3. *ООО "Промышленная группа Светодиодные Технологии"* [Industrial Group LED Technologies LLC]. Available at: <http://led02.ru/contacts/> (accessed 21.12.2020).
4. *Growtechno. Phyto-lamps*. Website. Available at: <https://growtechno.ru/> (accessed 21.12.2020).
5. *LEADlight*. (In Russian). Available at: <http://svet21veka.ru/?from=website80.com> (accessed 21.12.2020).
6. Afonin K.N., Vilisov A.A., Soldatkin V.S., Tuev V.I., Yulaeva Yu.V. *Svetodiodnaya lamp* [LED Lamp]. Patent RF, no. 2018119785, 2019.
7. Soldatkin V.S., Tuev V.I., Ivanov A.V., Olisovets A.Yu., Ryapolova Yu.V., Alekseev A.P. [Study prototypes of LED lamps general purpose produced based of the LED strips]. *Nitridy galliya, indiya i alyuminiya – struktury i pribory: tezisy dokladov 10-i Vserossiiskoi konferentsii* [10th All-Russian Conference Gallium, aluminum and indium nitrides]. St. Petersburg, 2015, pp. 61–62. (In Russian).
8. Starosek D.G., Ozerkin D.V., Tuev V.I., Ryapolova Y.V., Olisovec A.U., Ermolaev A.V. Investigation of temperature regime and luminous flux of light-emitting element of light emitting diode lamp. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, iss. 16, pp. 6944–6948.
9. Ryapolova Yu.V., Neverovsky K.A., Postolova E.O. [Optical simulation of an LED lamps]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: sbornik nauchnykh trudov XIII Mezhdunarodnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Prospects of fundamental sciences development. XIII International Conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, 2016, vol. 7, pp. 96–98. (In Russian).
10. Prytkov S.V. *Issledovaniya i raschet opticheskikh sistem svetovykh priborov na osnove svetodiodov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research and calculation of optical systems of light devices based on LEDs. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Saransk, 2014. Available at: <https://www.disscat.com/content/issledovaniya-i-raschet-opticheskikh-sistem-svetovykh-priborov-na-osnove-svetodiodov> (accessed 21.12.2020).
11. *GOST R 54350–2011. Pribory osvetitel'nye. Svetotekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [State Standard R 54350–2011. Lighting devices. Lighting requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 37 p.

12. Azizyan G., Artamonov A., Nikiforov S. Goniofotometricheskaya ustanovka dlya opredeleniya uglovogo raspredeleniya sily sveta [Goniophotometric setup for determining the angular distribution of luminous intensity]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Solid-state lighting*, 2010, no. 1. Available at: https://www.led-e.ru/articles/measuring/2010_1_41.php (accessed 21.12.2020).

13. Zalyazhnykh V.V. *Kriterii trekh sigm* [Three sigma criterion]. Available at: <https://arhiuch.ru/st3a.htm> (accessed 21.12.2020).

14. *Lambert's cosine law*. (In Russian). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Lambert's law](https://ru.wikipedia.org/wiki/Lambert's_law) (accessed 21.12.2020).

15. *Raschet koefitsientov mnozhestvennoi lineinoi regressii matrichnym sposobom* [Calculated multiple linear regression coefficients by matrix method]. Available at: <http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-linejnoj-regressii-matrichnym-sposobom/> (accessed 21.12.2020).

Для цитирования:

Юлаева Ю.В., Хомяков А.Ю., Туев В.И. Декомпозиционная световая математическая модель светодиодного излучающего элемента // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 177–197. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197.

For citation:

Yulaeva Yu.V., Khomyakov A.Yu., Tuev V.I. Dekompozitsionnaya svetovaya matematicheskaya model' svetodiodnogo izluchayushchego elementa [A decomposition optical-mechanical model of a led emitting element]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 177–197. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-177-197.