

# Моделирование спектра излучения светильника с дихроичным светофильтром при помощи метода спектральной трассировки лучей<sup>1</sup>

Г. ДЮРИНК, Ф.Б. ЛЕЛУП, Я. ОДЕНАЕР, П. ХАНСЕЛАЕР

Светотехническая лаборатории Католического университета Лувена, Гент, Бельгия  
E-mail: guy.durinck@kuleuven.be

## Аннотация

Трассировка лучей является полезным инструментом проектирования оптической части светильника. При этом моделирование обычно проводят применительно к одной длине волны. Однако в некоторых светильниках имеются оптические элементы, способные изменить спектр излучения источника света. В торговых помещениях широко используются светильники с дихроичными светофильтрами, способные усилить привлекательность продуктов. В данной работе спектральная трассировка лучей используется для моделирования спектрального распределения силы излучения такого светильника. В качестве входных параметров используются геометрическая модель светильника, спектральное распределение излучения лампы и спектральные коэффициенты отражения и пропускания отражателя и светофильтра. Для нескольких углов излучения проведено сравнение полученных посредством моделирования спектральных распределений силы излучения с экспериментальными данными, продемонстрировавшее очень хорошее совпадение результатов. Кроме того, моделирование при помощи трассировки лучей позволяет получить подробную информацию о влиянии переотражения света в светильнике на спектр излучения.

**Ключевые слова:** спектральная трассировка лучей, освещение торговых помещений, оптическое моделирование.

## 1. Введение

Трассировка лучей методом Монте-Карло часто используется в качестве инструмента для оценки характе-

ристик оптических систем и виртуальных прототипов светильников [1–3]. Во многих случаях оптические характеристики материалов светильников более или менее независимы от длины волны, что позволяет проводить трассировку лучей применительно к одной длине волны, значительно сокращая тем самым время моделирования. Однако в конструкциях некоторых светильников специального назначения заложено изменение спектра излучения источника света одной или несколькими деталями светильника. Типичным примером служит освещение торговых помещений, в которых применяются как традиционные источники света с цветными светофильтрами, так и специальные полупроводниковые источники света. Документально подтверждено, что привлекательность пищевых продуктов сильно зависит от их внешнего вида и что одним из наиболее важных зрительных ориентиров служит воспринимаемый цвет продукта [4]. В частности, если свежее мясо и некоторые виды имеющей тёмный цвет свежей рыбы освещаются светом, в котором преобладает красная составляющая, то покупатели воспринимают их как более привлекательные [5, 6]. При компьютерном моделировании оптических характеристик снабжённых

светофильтрами светильников для освещения пищевых продуктов следует учитывать влияние, оказываемое на спектр излучения светильника как источником света, так и оптическими элементами и светофильтром. Поэтому осуществляемое при помощи трассировки лучей моделирование подобного прибора должно производиться с учётом всей видимой части спектра излучения источника света. Здесь рассмотрен светильник для освещения мясных продуктов *Flexio* компании *LUNOO NV*, содержащий 100-ваттную лампу *Philips SDW-T 100W* и дихроичный светофильтр. Этот светофильтр был специально разработан для того, чтобы вместе с лампой *SDW-T* освещать мясные продукты. Интерференционные светофильтры лучше основанных на поглощении света цветных светофильтров в том отношении, что в них практически нет потерь светового потока. Однако типичным недостатком этих светофильтров является зависимость спектрального коэффициента пропускания от угла падения света. Как следствие, спектр излучаемого светильником света зависит от угла излучения. При малых углах излучения это не очень заметно, тогда как при больших углах излучения сдвиг цвета становится заметным для глаза. В данной работе спектральное распределение силы излучения светильника измерялось при помощи гониофотометра для разных углов излучения, и для этих же углов излучения оно рассчитывалось посредством трассировки лучей методом Монте-Карло. При моделировании учитывались отражательные характеристики поверхности отражателя и зависимость от угла падения спектральных коэффициентов отражения и пропускания интерференционного светофильтра. Разрядная лампа модели-

Рис. 1. Зависимость  $BRDF$  материала отражателя от угла отражения для длины волны 555 нм и углов падения 13, 33 и 53°



<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

Рис. 2. Зависимость  $BRDF$  материала отражателя от длины волны для угла падения  $53^\circ$  и угла отражения  $75^\circ$

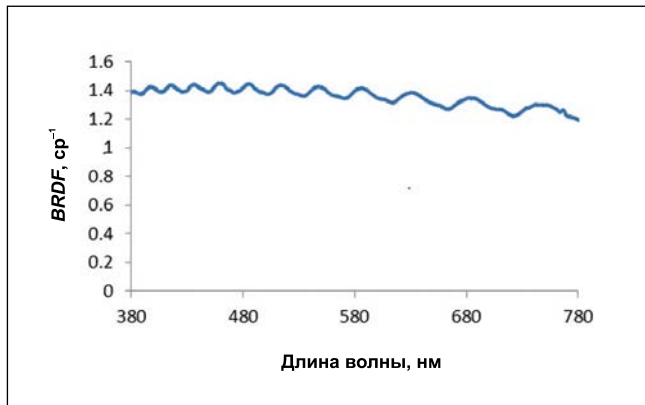
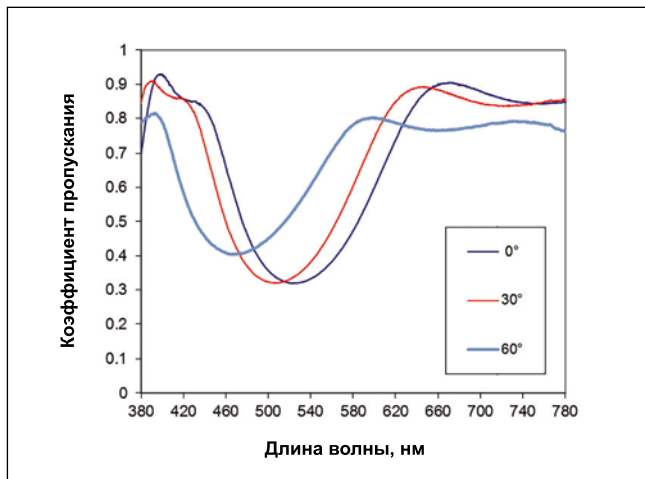


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания интерференционного светофильтра от длины волны для углов падения  $0, 30$  и  $60^\circ$



ривалась при помощи сравнительно простой геометрической модели. Помимо прочего, было исследовано влияние переотражения отражателем света (*light recycling*), который перед этим был отражён интерференционным светофильтром.

## 2. Экспериментальная установка и измерения

Поверхность отражателя рассеивает свет в пределах широкого угла вокруг направления зеркального отражения. Для реалистичной трассировки лучей следует с высокой точностью смоделировать угловые характеристики отражения света [7, 8]. Отражательные свойства поверхности математически описывают при помощи двунаправленной функции распределения отражения ( $BRDF$ ), которая представляет собой отношение бесконечно малого приращения энергетической яркости облучаемого образца в заданном направлении наблюдения  $dE_{e,s}$  к бесконечно малому приращению облучённости образца падающим на него с заданного направления излучением  $dE_{e,i}$  (уравнение 1). Индекс  $e$  указывает на то, что это радиометрическая,

а не фотометрическая характеристика, а индексы  $i$  и  $s$  обозначают, соответственно, падающее и отражённое излучение. Так как отражение света поверхностью может зависеть от длины волны, то  $BRDF$  является функцией пяти переменных: сферических координат  $\theta_s$  и  $\phi_s$ , описывающих направление отражения света относительно нормали к поверхности, сферических координат  $\theta_i$  и  $\phi_i$ , описывающих направление падения света, и длины волны  $\lambda$ :

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda) = \frac{dL_{e,s}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda)}{dE_{e,i}(\theta_i, \phi_i, \lambda)}, \text{ ср}^{-1}, \quad (1)$$

В рассматриваемом случае общая формула (1) для расчёта  $BRDF$  преобразуется в:

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s, \lambda) = \frac{\Phi_{e,s}}{\Phi_{e,i} \cdot \Omega_s \cdot |\cos(\theta_s)|}, \text{ ср}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{e,s}$  и  $\Phi_{e,i}$  — падающий и отражённый световые потоки соответственно,  $\Omega_s$  — телесный угол, стягиваемый при-

ёмником,  $\theta_s$  — угол между нормалью к поверхности и направлением отражения излучения [9].

Спектральные измерения  $BRDF$  были проведены с использованием разработанного и изготовленного нами гониофотометра [10]. На рис. 1 для разных углов падения приведены зависимости  $BRDF$  материала отражателя от угла отражения. Данные приведены для длины волны  $555$  нм. Зависимость  $BRDF$  от длины волны для угла падения  $53^\circ$  и угла отражения  $75^\circ$  относительно нормали к поверхности приведена на рис. 2. При всех углах падения и отражения наблюдаются небольшие колебания амплитуды  $BRDF$ .

Использовавшийся в светильнике интерференционный светофильтр состоит из нескольких тонких прозрачных слоёв с разными показателями преломления. В этой многослойной конструкции усиливающая и ослабляющая интерференция применяется для пропускания падающего под определёнными углами излучения с определёнными длинами волн и для отражения падающего под другими углами излучения с теми же длинами волн. В качестве подложки в этом интерференционном светофильтре используется прозрачная стеклянная пластина с пренебрежимо малыми поглощением и отражением. В многослойной конструкции поглощается порядка  $3\%$  излучения, а диффузным отражением излучения можно пренебречь [10]. Этот светофильтр характеризуется направленным пропусканием и зеркальным отражением излучения, которые описываются коэффициентами пропускания и отражения (уравнения (3) и (4)). Значения коэффициентов пропускания и отражения определялись экспериментально в установке для измерения  $BRDF$ .

$$T(\lambda, \theta) = \frac{\Phi_{e,t}}{\Phi_{e,i}}, \quad (3)$$

$$R(\lambda, \theta) = \frac{\Phi_{e,r}}{\Phi_{e,i}}, \quad (4)$$

где индексы  $i, t$  и  $r$  обозначают, соответственно, падающий, прошедший и отражённый потоки излучения, а индекс  $e$  означает, что это поток излучения, а не световой поток. Коэффициенты пропускания и отражения были измерены в функции

Рис. 4.  
Нормализованный  
измеренный спектр  
лампы *SDW-T*

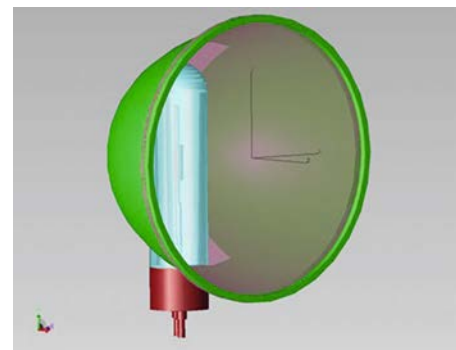
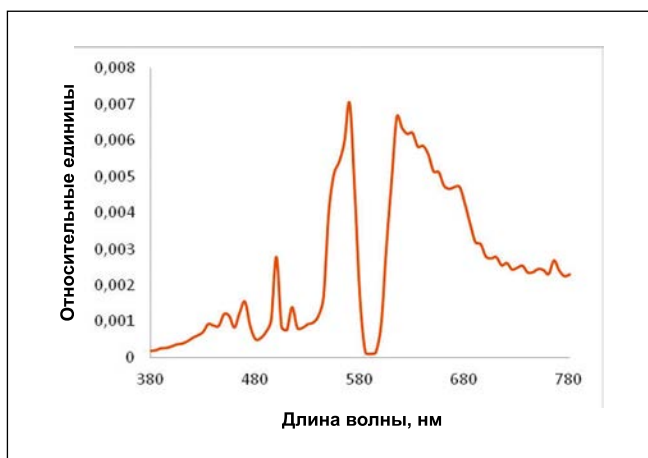


Рис. 5. Модель светильника, использованная при моделировании методом трассировки лучей

длины волны для нескольких углов падения. На рис. 3 приведены измеренные для трёх углов падения значения коэффициента направленного пропускания. Обратите внимание на то, что на зависимость коэффициента пропускания от длины волны сильно влияет угол падения.

Для измерения зависимости спектра излучения светильника от угла падения светильник был помещён в гониофотометр типа 1 МКО [11], который может поворачивать осветительный прибор вокруг горизонтальной и вертикальной осей. Свет захватывается камерой *Topcom 100*, расположенной в дальнем поле на расстоянии 8,72 м от светильника. Захваченный свет по оптическому волокну передаётся на спектрограф *Oriel Multispec*. Так как приёмник расположен в дальнем поле, а весь осветительный прибор находится в пределах его поля зрения, то регистрируемый спектр можно считать спектральным распределением силы излучения светильника. Спектр излучения

голой лампы *SDW-T* измерялся аналогичным образом. Спектр лампы в относительных единицах приведён на рис. 4.

### 3. Спектральная трассировка лучей методом Монте-Карло

Для спектральной трассировки лучей методом Монте-Карло использовался коммерческий пакет программ *TracePro®* компании *Lambda Research Corporation*. Геометрию светильника смоделировали в этом пакете программ с использованием файлов с характеристиками отражателя, предоставленных изготовителем светильника, и типовой модели лампы *SDW-T*, содержащейся в библиотеке пакета программ. Геометрическая модель светильника приведена на рис. 5. Поверхность цилиндрической разрядной трубки лампы рассматривалась в качестве источника света и была смоделирована как равномерно излучающая свет поверхность. Эта относительно простая модель источ-

ника света вполне приемлема, так как источник имеет малые размеры и расположен на относительно большом расстоянии от отражателя. Кроме того, спектр излучения лампы не сильно зависит от угла излучения. В ином случае потребовалась бы гораздо более сложная спектральная модель источника света, основанная на файлах спектральных лучей [12, 13]. Отражательные характеристики материала отражателя и коэффициенты пропускания и отражения интерференционного светофильтра были преобразованы в подходящий формат и загружены в программу трассировки лучей. Отражательные характеристики были несколько упрощены, так как не имело смысла включать небольшие колебания, немного разные для разных углов падения. Поэтому *BRDF* считалась постоянной в интервале 380–570 нм и линейно уменьшающейся в интервале 570–780 нм, так чтобы полный интегральный коэффициент отражения совпадал с результатами измерений. Для моделирования

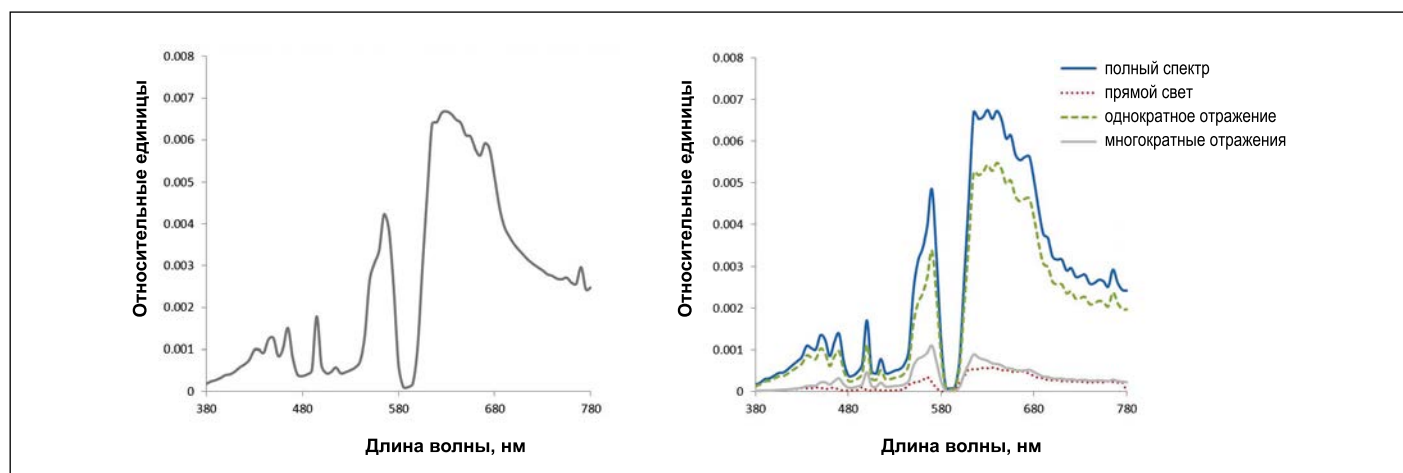


Рис. 6. Измеренный (слева) и смоделированный (справа) спектры для угла излучения  $0^\circ$  и расстояния 8,72 м от светильника. В спектре преобладает вклад однократно отражённого света, а многократные отражения вносят больший вклад, чем прямой свет

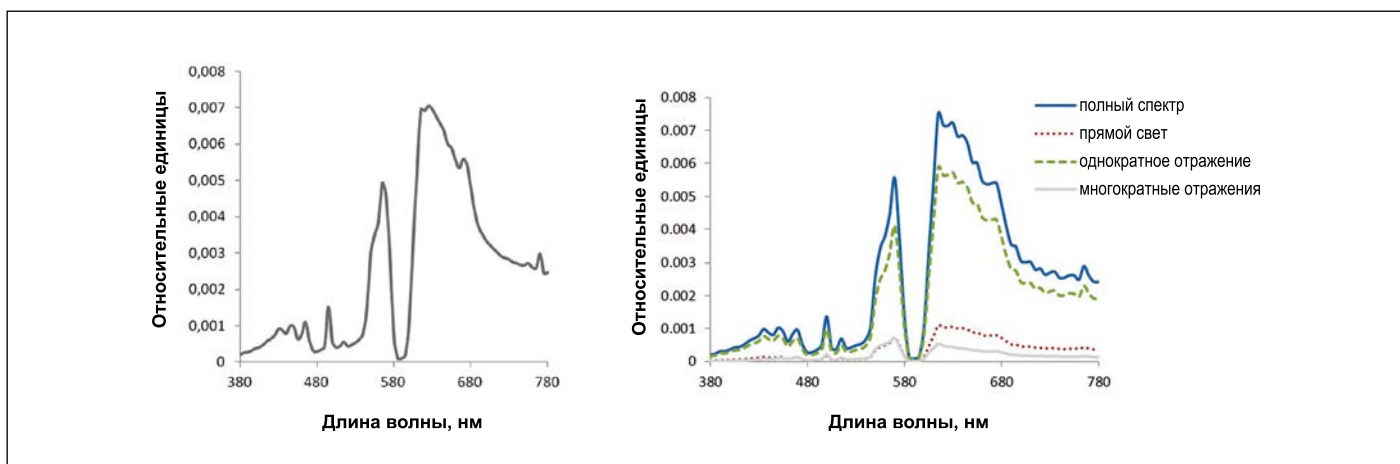


Рис. 7. Измеренный (слева) и полученный методом трассировки лучей (справа) спектры для угла излучения  $30^\circ$  и расстояния 8,72 м от светильника. В спектре преобладает вклад однократно отражённого света, а прямой свет вносит больший вклад, чем многократные отражения

приёмника была сформирована имеющая форму диска цель диаметром 3 мм (то есть размеры цели совпадали с размерами входного отверстия камеры *Torcom 100*), расположенная на расстоянии 8,72 м от светильника. Из-за малых размеров использовавшейся при трассировке лучей цели и большого расстояния от источника света, вероятность попадания на цель случайного луча была чрезвычайно мала, что делало нецелесообразной классическую трассировку лучей между источником и целью. Поэтому был реализован метод обратной трассировки лучей, который часто используется в компьютерной графике [14]. При обратной трассировке прослеживается прохождение лучей через оптическую систему в обратном направлении, то есть от цели к источнику, и учитываются сопровождающие это прохождение процессы (например, френелевское отражение, отражение от поверхности и т.д.). Если

и когда луч падает на источник, ему ставится в соответствие поток, соответствующий излучательной способности источника. На основе этого исходящего потока и истории прохождения луча рассчитывается попавший на цель поток. Для моделирования спектра излучения лампы *SDW-T* в интервале 380–780 нм была проведена трассировка 1 млн лучей для каждой из 81 длин волн, расположенных в интервале 380–780 нм с шагом 5 нм. Для каждой из этих длин волн относительный поток излучения был взвешен в соответствии со спектром излучения разрядной лампы.

#### 4. Результаты и обсуждение

Измеренный и смоделированный спектры были нормализованы таким образом, чтобы результат интегрирования соответствующего спектра был равен 1. Спектры, полученные посредством обратной трассировки лу-

чей, можно разложить на составляющие, соответствующие свету, который прошёл через оптику по разным путям [15]. Были рассмотрены три составляющие: прямой свет (то есть свет, прошедший от источника к цели напрямую через светофильтр), свет, который был один раз отражён отражателем, а затем через светофильтр попал на цель, и свет, который до попадания через светофильтр на цель был несколько раз отражён отражателем. На рис. 6–8 проведено сравнение измеренных и рассчитанных спектров для углов излучения  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $60^\circ$ . Во всех трёх случаях наблюдается хорошее соответствие между измеренными и рассчитанными спектрами. Моделирование показало, что относительный вклад трёх составляющих в результирующий спектр зависит от угла излучения. В спектре излучения, соответствующем  $0^\circ$ , преобладает свет, который был один раз отражён отражателем. Составляющая,

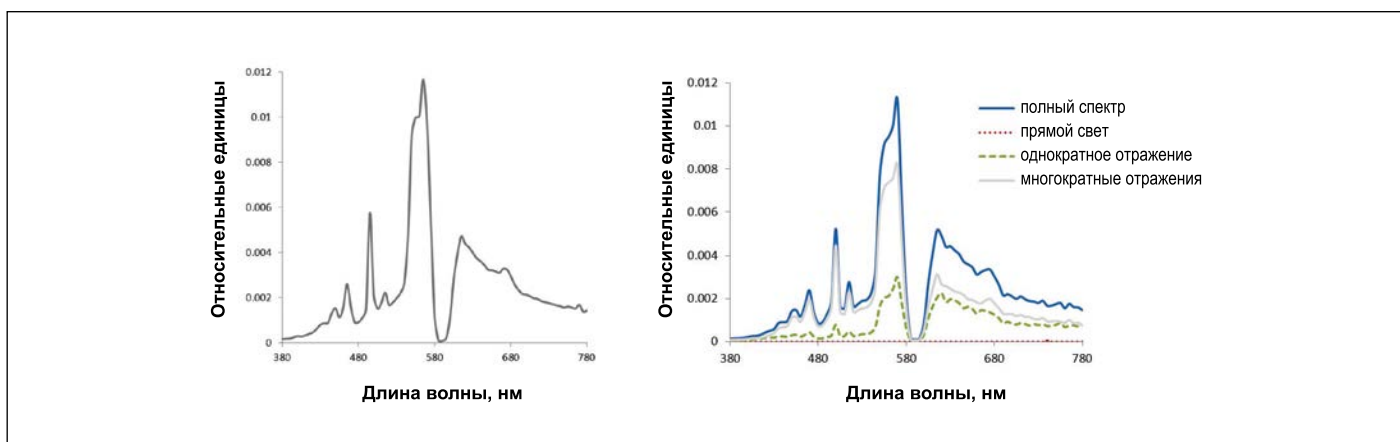


Рис. 8. Измеренный (слева) и смоделированный (справа) спектры для угла излучения  $60^\circ$  и расстояния 8,72 м от светильника. В спектре преобладает вклад света, попадающего на приёмник после многократного отражения. Прямой свет не вносит в спектр никакого вклада

**Координаты цветности МКО ( $u'$ ,  $v'$ ), рассчитанные на основе измеренного и смоделированного спектров. Разности цветностей, полученных на основе результатов измерений и моделирования, возрастают по мере увеличения угла излучения**

Угол излучения, град.	Эксперимент	Моделирование	$\Delta(u', v')$
0	$u' = 0,3125$ $v' = 0,5088$	$u' = 0,3119$ $v' = 0,5086$	0,0006
30	$u' = 0,3097$ $v' = 0,5196$	$u' = 0,3163$ $v' = 0,5191$	0,0066
60	$u' = 0,1982$ $v' = 0,5360$	$u' = 0,2087$ $v' = 0,5365$	0,0105

соответствующая свету, несколько раз отражённому отражателем, превышает вклад прямого света. При угле излучения  $30^\circ$  вклад прямого света становится больше вклада многократно отражённому свету, но доминирующим всё ещё остаётся свет, отражённый отражателем один раз. При угле излучения  $60^\circ$  линия зрения между приёмником и разрядной трубкой заслонена отражателем, и вклад прямого света равен нулю. Однако при этом часть внутренней поверхности отражателя всё ещё видна из точки расположения приёмника, и на приёмник попадает свет, хотя бы один раз отражённый отражателем. Моделирование при помощи трассировки лучей показало, что в спектре преобладает свет, несколько раз отражённый от поверхности отражателя.

В соответствии с рекомендациями МКО, цветности световых стимулов и разности цветностей источников света лучше всего изображать на графике цветности ( $u'$ ,  $v'$ ) МКО [16]. Разность цветностей  $\Delta(u', v')$  двух источников света  $A$  и  $B$  описывается выражением:

$$\Delta(u', v') = \sqrt{(u'_A - u'_B)^2 + (v'_A - v'_B)^2}. \quad (5)$$

Минимальная различаемая (с вероятностью 50 %) разность цветностей соответствует равной 0,0013 разности координат цветности. В табл. 1 приведены координаты цветности ( $u'$ ,  $v'$ ), рассчитанные на основе измеренного и смоделированного спектров, а также разности соответствующих цвет-

ностей. Обратите внимание на то, что разность цветностей увеличивается по мере увеличения угла излучения. При каждой обратной трассировке лучей «запускался» 1 млн лучей, однако из-за различий в геометрии количество лучей, реально достигших источника света, было разным. При равном  $0^\circ$  угле излучения на источник света обычно попадало 29 % лучей, тогда как при угле излучения  $30^\circ$  их число уменьшалось до 19 %, а при  $60^\circ$  в формировании смоделированного спектра участвовало менее чем 1 % лучей. Так как по мере увеличения угла излучения количество лучей, вносящих вклад в смоделированный спектр, уменьшается, то при увеличении угла излучения увеличивается и содержание шумов в смоделированном спектре.

Интересно посмотреть на то, какое влияние на спектр оказывает переотражение света. Излучение источника света отражается интерферен-

ционным светофильтром обратно на отражатель. На поверхности отражателя оно отражается по меньшей мере один раз, после чего опять попадает на светофильтр, пропускается им и вносит вклад в спектральное распределение силы излучения светильника. Для ответа на вопрос, влияет ли это переотражение света на спектр излучения светильника, было проведено соответствующее изменение модели трассировки лучей. В новой модели интерференционный светофильтр был извлечён из светильника и помещён на большом (8 м) расстоянии от светильника параллельно своему первоначальному расположению. При этой конфигурации линия зрения приёмника, проходящая через интерференционный светофильтр к отражателю, а затем к лампе, не изменилась, тогда как отражённый светофильтром свет уже не попадал на отражатель и не участвовал в моделировании, тем самым исключая пе-

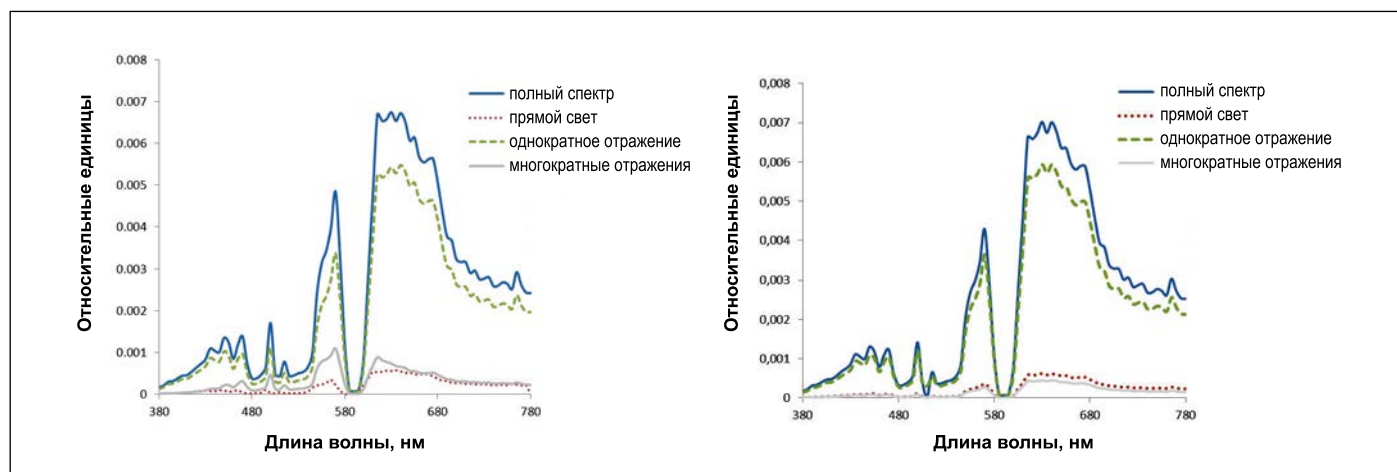


Рис. 9. Соответствующие углу излучения  $0^\circ$  спектры, полученные методом трассировки лучей применительно к светильнику (слева) и применительно к модифицированному варианту, исключающему переотражение света (справа). Обратите внимание на то, что при отсутствии переотражения вклад многократно отражённого света существенно уменьшается

Координаты цветности МКО ( $u'$ ,  $v'$ ), соответствующие измеренному спектру излучения светильника, смоделированному спектру излучения светильника, спектру, смоделированному без учёта переотражения света, и спектру, полученному умножением спектра излучения лампы на соответствующий  $0^\circ$  коэффициент пропускания интерференционного светофильтра. Приведены также разности цветностей, полученных применительно к измеренному и смоделированным спектрам

	Измеренный спектр	Смоделированный спектр	Смоделированный спектр без учёта переотражения	(Спектр лампы) x (коэффициент пропускания)
Координаты цветности	$u' = 0,3125$ $v' = 0,5088$	$u' = 0,3119$ $v' = 0,5086$	$u' = 0,3271$ $v' = 0,5056$	$u' = 0,3289$ $v' = 0,5058$
Разность цветностей, соответствующих смоделированному и измеренному спектрам, $\Delta(u', v')$		0,0006	0,0150	0,0166

реотражение света. На рис. 9 проведено сравнение спектров излучения для угла излучения  $0^\circ$ . В случае изменённой геометрии, вклад, вносимый в спектр многократно отражённым светом, по порядку величины совпадает с вкладом прямого света, тогда как при обычной геометрии светильника при длинах волн 540–650 нм вклад многократно отражённого света превосходит вклад прямого света. Это подразумевает различие цветностей света в этих двух случаях. Следует отметить, что так как характеристики материала отражателя практически не зависят от длины волны, то при отсутствии переотражения спектр излучения светильника совпадает со спектром, наблюдаемым при рассмотрении источника света через интерференционный светофильтр при отсутствии каких бы то ни было других оптических элементов. В табл. 2 приведены координаты цветности МКО ( $u'$ ,  $v'$ ), соответствующие измеренно-

му спектру, смоделированному спектру, спектру, смоделированному без учёта переотражения света, и спектру, полученному умножением спектра излучения лампы на коэффициент пропускания интерференционного светофильтра. Там же приведены разности цветностей, полученных применительно к смоделированным и измеренному спектрам. Из таблицы следует, что так как отражательные свойства отражателя практически не зависят от длины волны, то цветность света, излучаемого светильником, можно определить посредством простого умножения спектра излучения лампы на коэффициент пропускания интерференционного светофильтра. Результаты моделирования говорят о том, что переизлучение света оптически элементами светильника оказывает существенное влияние на спектр и цветность света. В спектрах, смоделированных применительно к углам излучения  $30^\circ$  и  $60^\circ$  (рис. 10, 11), при-

сутствует больше флуктуационных шумов, вследствие чего соответствующие этим спектрам цветности хуже согласуются с экспериментальными данными (табл. 1). При угле излучения  $30^\circ$  спектр без переизлучения света демонстрирует уменьшение вклада света, несколько раз отражённого поверхностью отражателя. Однако форма спектра в целом и относительный вклад каждой из составляющих не сильно изменились по сравнению со спектром, приведённым на рис. 7. В этом конкретном случае переизлучение света оказывает относительно малое влияние. При угле излучения  $60^\circ$  ситуация совершенно другая (рис. 11), так как в этом случае исключение переотражения света приводит к очень сильному изменению спектра. При этом угле линия зрения от приёмника до разрядной трубки, являющейся реальным источником света, блокируется отражателем, и в спектре, полученном с учётом переотраже-

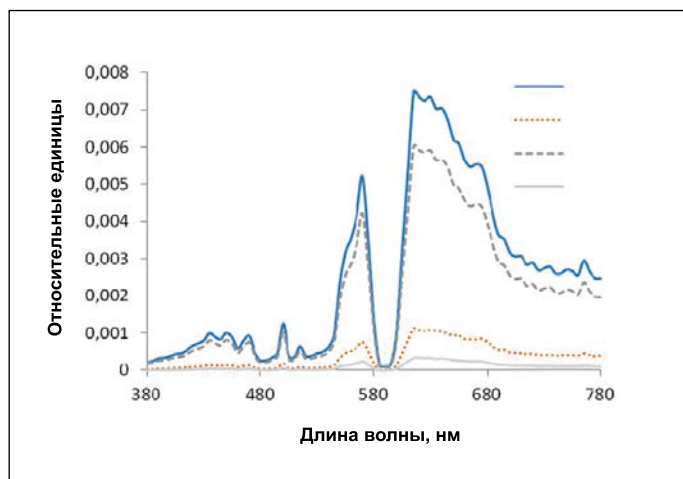


Рис. 10. Смоделированный спектр для равного  $30^\circ$  угла излучения и отсутствия переотражения света

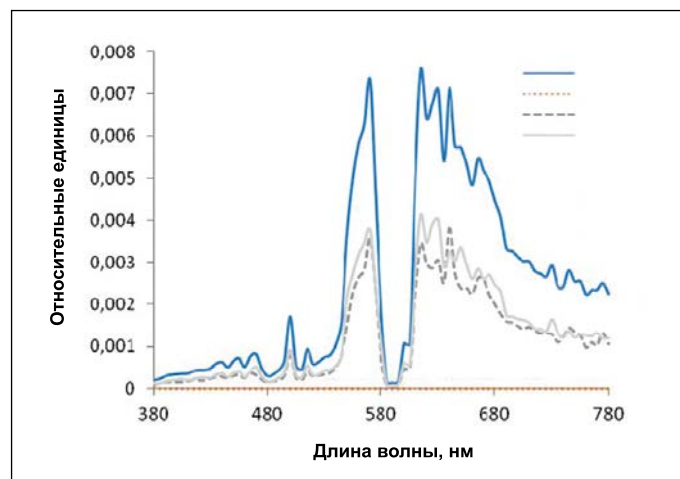


Рис. 11. Смоделированный спектр для равного  $60^\circ$  угла излучения и отсутствия переотражения света

ния света, преобладает свет, который был отражён несколько раз. Исключение переотражения света приводит к равенству вкладов однократного и многократных отражений, и получаемый в этом случае спектр становится совершенно другим.

## 5. Выводы

Спектральная трассировка лучей методом Монте-Карло может использоваться для точного моделирования зависящих от угла излучения спектров излучения светильников, содержащих ненейтральные оптические элементы, например, интерференционные светофильтры. Полученные при помощи компьютерного моделирования спектры очень хорошо согласуются с результатами измерений и предоставляют интересную дополнительную информацию о том, какой вклад в спектр вносит свет, распространяющийся в светильнике по разным траекториям, и как этот вклад зависит от угла излучения. При помощи компьютерного моделирования светильника с несколько изменённой геометрией, в которой было исключено переотражение света, было рассмотрено влияние преотражения на спектр излучения светильника. Было установлено, что переотражение света имеет важное значение для объяснения характера спектрального распределения силы излучения и цветности излучаемого светильником света. Подобное моделирование не только способствует лучшему пониманию нежелательных сдвигов спектров излучения светильников, но и может оказаться полезным инструментом проектирования осветительных установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee, X.H., Moreno, I., Sun, C.C. High-performance LED street lighting using microlens arrays// Optics Express. — 2013. — Vol. 21, No. 9. — P. 10612–10621.  
 2. Wang, K., Chen, F., Liu, Z., Luo, X., Liu S. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging// Optics Express. — 2010 — Vol. 18, No. 2. — P. 414–425.  
 3. Vandeghinste, F., Durinck, G., Forment S., Deconinck G., Hanselaer, P. A narrow beam reflector for a two-dimensional array of power light emitting diodes// Leukos. — 2008. — Vol. 4, No. 4. — P. 243–254.

4. Imram, N. The role of visual cues in consumer perception and acceptance of a food product// Nutrition & Food Science. — 1999. — No. 5. — P. 224–228.

5. Barbut, S. Effect of illumination source on the appearance of fresh meat cuts// Meat Science. — 2001. — No. 59. — P. 187–191.

6. Barbut, S. Effect of three commercial light sources on acceptability of Salmon, Snapper and Sea Bass fillets// Aquaculture. — 2004. — No. 236. — P. 321–329.

7. Audenaert, J., Leloup, F.B., Durinck, G., Deconinck, G., Hanselaer, P. Bayesian deconvolution method applied to experimental bidirectional transmittance distribution functions// Meas. Sci. Technol. — 2013. — Vol. 24. — Publ. 035202 (9pp).

8. Audenaert, J., Leloup, F.B., Van Giel, B., Durinck, G., Deconinck, G., Hanselaer, P. Impact of the accurateness of bidirectional reflectance distribution function data on the intensity and luminance distributions of a light-emitting diode mixing chamber as obtained by simulations// Optical Engineering. — 2013. — Vol. 52, No. 9. — P. 095101–1 – 095101–7.

9. Standard practice for angle resolved optical scatter measurements on specular or diffuse surfaces// ASTM E1392–96 (2002). 12p

10. Leloup, F.B., Forment, S., Dutré, P., Pointer, M., Hanselaer, P. Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function// Applied Optics. — 2008. — Vol. 47, No. 29. — P. 5454–5467.

11. CIE121–1996: The photometry and goniophotometry of luminaires.

12. Rykowski, R.F. Spectral ray tracing from near field goniophotometer measurements// Light & Engineering. — 2011. — Vol. 19, No. 1. — P. 23–29.

12 а. Рыковский, Р. Спектральная трассировка лучей на основе результатов гониофотометрии ближнего поля//Светотехника. — 2010. — № 6. — С. 29–35.

13. Jacobs, V.A., Audenaert, J., Bleumers, J., Durinck, G., Rombouts, P., Hanselaer, P. Rayfiles including spectral and colorimetric information// Optics Express. — 2015. — Vol. 23, No. 7. — P. A361–A370.

14. Dutré, P., Bekaert, P., Bala, K. Advanced Global Illumination. A K Peters Ltd., 2006.

15. Durinck, G., Leloup, F.B., Audenaert, J., Hanselaer, P. Spectral ray tracing to model the spectrum of a luminaire equipped with an interference filter// Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Optical Measurement Techniques for Structures & Systems OPTIMESS2015, Antwerp, 8–9 April 2015, pp. 85–93

16. CIE TN001:2014. Chromaticity Difference Specification for Light Sources.



**Гай Дюринк (Guy Durinck), Ph.D.** (1999 г.). Научный сотрудник светотехнической лаборатории Католического университета Лёвена. Читает лекции по математике, общей физике

и физической оптике в Католическом университете Лёвена и университетском колледже Odisee. Область научных интересов: проектирование оптики осветительных приборов, оптическое моделирование при помощи трассировки лучей



**Фредерик Б. Лелуп (Frédéric B. Leloup), Ph.D.** (2012 г.). Координатор по обеспечению научных исследований светотехнической лаборатории Католического университета Лёвена. Об-

ласть научных интересов: корреляции между оптическими параметрами, влияющими на зрительный облик (цвет, глянец, текстура и т.д.), вопросы качества применительно к испытательным и поверочным лабораториям



**Ян Оденаерт (Jan Audenaert), Ph.D.** (2014 г.). Научный консультант светотехнической лаборатории Католического университета Лёвена. Область научных интересов: трассировка лучей, гониофотометрия ближнего поля

рассировка лучей, гониофотометрия ближнего поля



**Петер Ханселаер (Peter Hanselaer), Ph.D.** (1986 г.). Профессор Католического университета Лёвена, основатель светотехнической лаборатории этого университета.

Ведёт курсы фотоники, оптоволоконной связи и освещения. Область научных интересов: освещение, восприятие и облик, проектирование оптических систем, источники света и оптические измерения