

Восстановление двунаправленной функции рассеяния света для среды с объемным рассеянием

В.Г. Соколов², Д.Д.Жданов¹, И.С. Потемин¹, Б.Х.Барладян², Н.Н. Богданов¹, А.Д.Жданов¹
 sokolovv1969@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|ipotemin@yandex.ru|bbarladian@gmail.com
 |nbnbogdanov@corp.ifmo.ru|adzhdanov@corp.ifmo.ru

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

² ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия.

Для проектирования и моделирования изображающих или неизображающих оптических систем требуется точное описание оптических свойств рассеивающих материалов. Одним из способов описания таких свойств является двунаправленная функция рассеяния света (ДФР). Не смотря на то, что получить информацию об оптических свойствах образца можно путем измерения ДФР, довольно сложно выделить свойства для отдельных компонентов образца (ДФР для поверхности образца, параметры объемного рассеяния и др.). В таких случаях необходимо восстановить эти свойства. Для такой операции существует множество методов, таких, как восстановление ДФР для микрорельефа, однако они не применимы для объемного рассеяния. В данной работе предложен метод восстановления ДФР путем оптимизации параметров объемно рассеивающей среды. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами измерений ДФР образца.

Ключевые слова: ДФР, измерение ДФР, восстановление ДФР, объемное рассеяние, рассеяние Ми, рассеяние Рэлея.

Reconstruction of BSDF for the volume scattering medium

Vadim G. Sokolov², Dmitry D. Zhdanov¹, Igor S. Potemin¹, Boris Barladian², Nikolai N. Bogdanov¹, Andrey D. Zhdanov¹

sokolovv1969@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|ipotemin@yandex.ru|bbarladian@gmail.com
 |nbnbogdanov@corp.ifmo.ru|adzhdanov@corp.ifmo.ru

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia;

² Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia.

Lighting design or stray light simulation of imaging or non-imaging optical systems requires a precise specification of the optical properties of the scattering materials and one of the ways of the proper specification is the Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF). Although, it is possible to obtain data about the optical properties of the sample for example by measurement of the BSDF, but it is difficult to extract the properties of the sample components (BSDF of the sample boundary, parameters of volume scattering, etc.). In such cases, it is required to reconstruct these properties. For this operation, there are many methods, like the reconstruction of the BSDF of the microrelief, but they not applicable in cases when the volume scattering is used. Authors have developed a method for optimization of the volume scattering media parameters, which shows good agreement with the measured BSDF of the sample.

Keywords: BSDF, BSDF measurements, BSDF reconstruction, volume scattering, Mie scattering, Rayleigh scattering.

1. Введение

В настоящее время существует множество электронных приборов, в конструкции которых используются оптические системы с элементами, создающими сложное пространственное распределение интенсивности света. К таким электронным системам можно отнести, например, светопроводящие системы для жидкокристаллических экранов, автомобильные приборные панели, светодиодные светильники и др. Качество и технические характеристики устройств совершенствуются с каждым днем, в связи с чем повышаются сложность и технические требования к данным изделиям, что создает ряд проблем для разработчиков и проектировщиков таких устройств. Одной из серьезных проблем является физически корректное моделирование оптических систем со светорассеивающими элементами. Ошибки в моделировании света, приводят к некорректной оценке работы проектируемого электронного устройства в целом, что, как правило, приводит к отклонению от технических требований. Также важна скорость расчетов, так как в большинстве случаев разработчикам отведено ограниченное время, в течение которого им необходимо рассмотреть множество вариантов и провести оптимизацию

всей системы. Именно поэтому скорость и корректность вычислений имеют большое значение.

В целом для корректного моделирования важно иметь как можно более точные данные об оптических свойствах рассеивающих материалов. В настоящий момент, одним из способов описания оптических свойств рассеивающих материалов является использование двунаправленной функции рассеяния света (ДФР). Эта функция определяет угловую зависимость диффузного рассеяния для поверхности. Двунаправленная функция рассеяния света имеет довольно сложное выражение. Если говорить кратко, это суперпозиция и обобщение двух функций: двунаправленной функции отражения (ДФО, eng. BRDF) и двунаправленной функции пропускания (ДФП, eng. BTDF). Ключевая особенность всех этих функций заключается в том, что они могут быть представлены в виде «черного ящика», на входе которого подается информация о падающем луче, а на выходе получаем отраженный или пропущенный луч в заданной точке поверхности.

Рассеяние света возникает, когда луч падает на шероховатую поверхность и отражается не зеркально, а диффузно, т.е. по различным направлениям. В настоящее время существует множество разнообразных диффузных рассеивающих материалов, которые включают в себя

шероховатую поверхность или среду с объемным рассеянием или их комбинации, представленные на Рис. 1. [3].

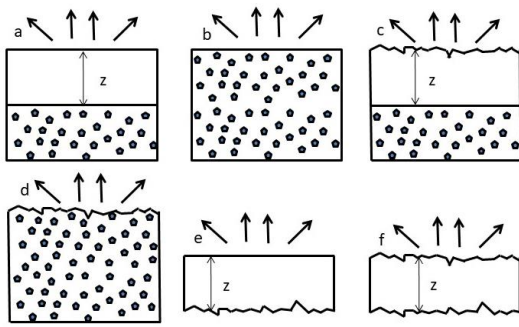


Рис. 1. Схематическое представление 6 типов диффузных образцов. Распределение света измеряется над верхними поверхностями. Области с объемным рассеянием представлены в виде точек. Области без обозначения подразумеваются как нерассеивающие. Шероховатые поверхности представлены на с – f.

В большинстве случаев, у разработчиков и проектировщиков есть образец материала, например, в форме плоскопараллельной пластины, но отсутствуют данные о характеристиках отдельных компонентов, таких как рассеивающая среда и шероховатая поверхность. В таких случаях решение задач, связанных с моделированием отдельных компонентов диффузного образца, к сожалению, становится невозможным.

Главная причина заключается в том, что чрезвычайно сложно определить свойства шероховатой поверхности и рассеивающего слоя по отдельности, т.е. провести измерения ДФР для отдельных компонентов диффузной пластины. Провести измерение ДФР возможно только для всего образца в целом. Результаты таких измерений весьма полезны для моделирования образцов, толщиной которых можно пренебречь. Однако, возникают ситуации, когда форма рассеивающего образца отличается от формы измеренного образца и, таким образом, расчетная модель образца не может быть сведена к модели поверхности. Например, модель с единственной ДФР (для всего образца) не применима, когда этот образец является элементом светопроводящей системы или объемного диффузора ввиду того, что возникают множественные переотражения либо между поверхностями образца, либо между рассеивающими частицами материала образца. По этой причине, важно определять оптические свойства поверхностей и параметров рассеивающего слоя по отдельности. Процесс определения характеристик рассеивающего слоя и параметров рассеивания граничной шероховатой поверхности является процессом восстановления полной ДФР образца.

Существует множество методов восстановления одной из частей ДФР – ДФО. Все эти методы применяются в компьютерной графике и в задачах по моделированию распространения света, однако, они не применимы для решения задач, связанных с диффузными и прозрачными материалами, при условии физически корректного моделирования. Тем не менее, существуют эффективные методы восстановления ДФР в рассеивающих материалах с шероховатой поверхностью [7, 8]. Однако, все они не способны предоставить верные результаты в случаях, когда у оптического материала есть не только одна единственная шероховатая поверхность, но и рассеивающий слой, в котором возникает объемное рассеяние. Совершенно точно можно сказать о том, что существуют эффективные методы для случаев с объемным рассеянием света, например, в работе [4]. Этот метод показывает очень хорошие

результаты, но к сожалению, отсутствует детальная информация о том, как он на самом деле работает. Также, стоит отметить, что он был разработан только для программного комплекса LightTools. В представленной работе, авторы предлагают собственный метод восстановления ДФР для среды с объемным рассеянием.

2. Методы и модели

Существует несколько подходов для описания рассеяния света. В случаях, когда размер рассеивающих частиц сопоставим с длиной волны, причем ненамного больше или меньше длины волны излучения, то применяют теорию рассеяния Ми.

Другой моделью является Рэлеевское рассеяние. Используется в случаях упругого рассеяния света на частицах, размер которых намного меньше длины волны. Такими частицами могут быть отдельные атомы или молекулы. Рассеяние возникает при распространении света через прозрачную среду и лучше всего наблюдается в газах. Размер рассеивающей частицы определяется выражением (1):

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1)$$

где r – характерная длина, λ – длина волны.

Существует фазовая функция Хени - Гринштейна, широко используемая в расчетах рассеяния света. Функция удобна для некоторых численных вычислений благодаря тому, что имеет аналитическое выражение и близка к полиномам Лежандра. Более того, она может обеспечить простые вычисления приближенного распределения светового излучения [1, 4].

Функция Хени – Гринштейна представлена следующим выражением (2):

$$p_{HG}(\mu, g) = \frac{1-g^2}{(1-2g\mu+g^2)^{3/2}}, \mu = \cos v \quad (2)$$

Где v – угол рассеяния, g – асимметричный параметр, равный среднему значению косинуса, $\cos v$ – полное угловое распределение, определяемое как:

$$\cos v = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\mu) \mu d\mu \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\mu) \mu d\mu = 1.$$

Таким образом, в различных ситуациях мы можем использовать соответствующий метод для расчёта объемного рассеяния. Разработанный авторами алгоритм включает все перечисленные методы, и проектировщик может выбрать один из них. В качестве характеристик и параметров, которые могут быть оптимизированы, используются размеры частиц, показатель преломления, концентрацию рассеивающих частиц при рассеянии Ми/Рэлея, или параметры фазовой функции Хени – Гринштейна.

Ранее уже описывался метод восстановления ДФР по параметрам микрорельефа [10]. Сейчас мы предлагаем комбинированный подход. Действия алгоритма включают в себя следующие операции, представленные на Рис.2.

Во-первых, необходимо получить информацию, требуемую для моделирования и оптимизации. Эта информация должна содержать данные о параметрах рельефа (распределение высот) поверхности образца, которые могут быть получены с помощью профилометра или атомно-силового микроскопа. Этот набор данных используется на следующем этапе для оптимизации ДФР образца. Обычно для измерения ДФР используется гониоспектрофотометр. Для этой задачи мы предлагаем использовать GCSM-4 [12] или Gonio-Photometer II производства “Pab Ltd” [9]. Эти измерительные системы сертифицированы, а получаемые данные достоверны.



Рис.2. Обобщенная схема восстановления параметров объемного рассеяния и ДФР оптической среды.

Следующие 4 шага отображают процесс оптимизации:

1. Подготовка модели в соответствии с измеренным образцом. Создать микрорельеф по измеренному распределению высот с помощью инструмента OPTOS MicroRelief [11, 2] используемый для моделирования распространения света. Выбрать модель объемного рассеяния (Ми, Рэлея, функцию Хени – Гринштейна) с соответствующими параметрами. Начальные параметры необходимо принять из измерений или общепринятой величины (параметры объемного рассеяния). Затем оптимизатор изменяет параметры таким образом, чтобы достичь заданной цели.

2. Компьютерное моделирование процесса измерения ДФР виртуального образца, измеренного ранее с использованием гониоспектрофотометра GCSM-4 или Goniо-Photometer II. Результатами измерений легко сравниваются друг с другом, так как алгоритм моделирования полностью соответствует процедуре измерений.

3. Сравнение результатов моделирования и измерений. Обычно результатом сравнения является значение среднеквадратического отклонения (RMS). Принимая во внимание тот факт, что результаты измерений (и соответствующего моделирования) могут содержать от сотен до тысяч значений, мы можем назначить специальный «вес» для каждого значения. Например, мы можем повлиять на результаты измерений, полученных при ортогональном освещении образца таким образом, чтобы эти данные имели большее значение по сравнению с результатами, полученными при скользящих углах.

4. Анализ результатов моделирования. Если отклонение достигает заданного уровня, то процесс оптимизации завершается и выводятся результаты моделирования. В противном случае, процесс оптимизации продолжается с новыми параметрами. Оптимизатор определяет новые параметры объемного рассеяния и параметры изменения микрорельефа (распределение высот). Учитывая то, что распределения высот микрорельефа было измерено, можно заключить, что ДФР микрорельефа изначально корректна, поэтому для оптимизационного процесса «вес» параметров объемного рассеяния назначаем

намного больше «веса» параметров модификации микрорельефа. После изменения параметров процедура оптимизации проходит в цикле.

По завершению процесса оптимизации, данные приводятся к окончательному виду. Оформление результатов состоит из двух шагов. На первом этапе данные плагина OPTOS MicroRelief конвертируются в ДФР границы двух сред. Поскольку мы отделили поверхность от слоя с объемным рассеянием, то преобразование оптимизированного микрорельефа в ДФР проводится для прозрачной среды.

В заключении, проводится проверка оптимизированной модели с ДФР на поверхности образца и рассеивающим слоем. Основное отличие проверочной модели от модели, используемой в оптимизационном процессе, заключается в модели рассеивания света на поверхности. Оптимизатор использует плагин OPTOS MicroRelief, в то время как в финальной сцене используется ДФР, сконвертированная с помощью плагина OPTOS MicroRelief. Учитывая, что плагин OPTOS MicroRelief применяет лучевой подход, в то время как в процедуре конвертации может использовать как лучевой подход, так и волновое решение, то возможны отклонения между оптимизированной и финальной ДФР.

3. Эксперименты и результаты

Как было отмечено ранее, основной целью рассматриваемого процесса является восстановление свойств рассеивающей среды таким образом, чтобы они были близки к свойствам реального образца и сведены к модели бесконечно тонкого листа.

Нами были исследованы несколько проблемных образцов. Прежде всего, было необходимо продемонстрировать, что методы, используемые для оптимизации рельефа поверхности рассеивающего материала не применимы при моделировании объемного рассеяния. На рисунке 3 показаны результаты исследования случая, указанного выше. Сплошная кривая на графике соответствует измерениям, пунктирной линией обозначен результат моделирования, и как видно из графика, результаты моделирования существенно отличаются от результатов измерений. Это доказывает, что метод оптимизации микрорельефа не следует использовать в случае объемного рассеяния.

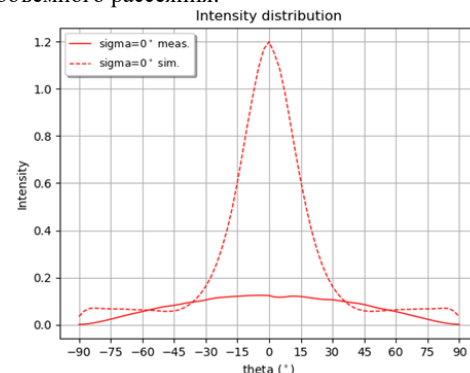


Рис. 3. Результаты восстановления ДФР, полученные на основе оптимизации микропрофиля для материалов с объемным рассеянием. Сплошная линия соответствует измеренной интенсивности, пунктирной линией обозначена интенсивность, полученная путем моделирования.

Для следующего эксперимента требуется подробное описание используемого метода. Исследуемый образец (пластина толщиной 1 мм) имеет размеры 100 x 100 мм, толщина слоя материала с объемным рассеянием, который располагался в верхней части образца, составляет 0.15 мм, показатель преломления 1.5 (Рисунок 5).

Также для эксперимента требуются данные ДФР исследуемого образца, и в связи с этим, необходимы ДФП и ДФО измеренные с обеих сторон исследуемой пластины. После определения указанных данных осуществляется подготовка компьютерной модели образца.

Параметры оптимизации включают в себя параметры рассеивающего компонента: объемную концентрацию частиц, радиус частиц, мнимая и действительная части показателя преломления частиц, а также параметры слоя связующей среды: размер слоя, показатель преломления. Можно выбрать подходящие параметры, а также задать диапазон от минимального до максимального значения и шаг изменения. На этом этапе, также можно отрегулировать необходимый диапазон длин волн и количество итераций.

На рисунке 4 представлен процесс оптимизации параметров объемного рассеивания.

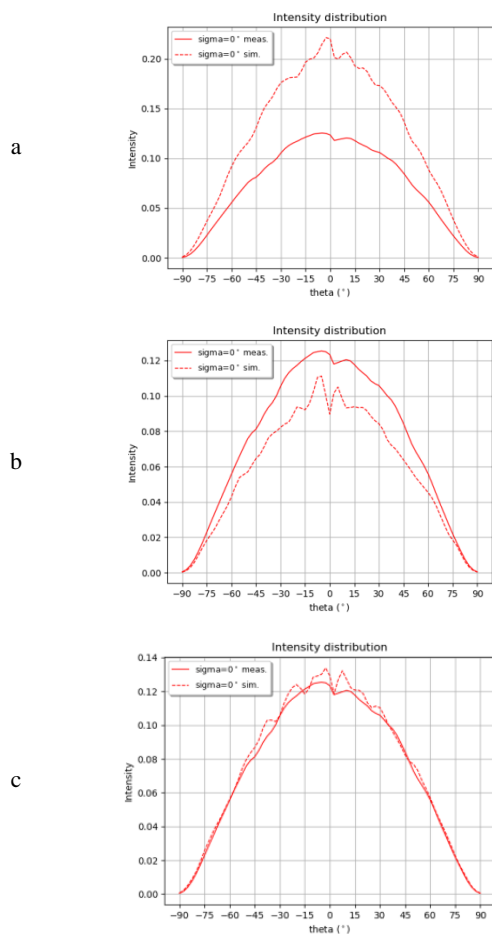


Рис. 4. Результаты ДФО восстановления, основанные на оптимизации параметров материала с объемным рассеиванием.

Мы предположили, что для исследуемого образца (Рисунок 5) наиболее подходящей является модель рассеивания Ми и, соответственно, в качестве параметров оптимизации использовались параметры модели Ми. Для графика Рис. 4а исходное значение объемной концентрации частиц составляет 3%, минимальное значение – 2% и максимальное – 4%.

Следующий параметр - радиус частиц: исходное значение составляло 500нм, минимальное значение - 100нм и максимальное – 1000нм. Кроме того, мы попытались оптимизировать показатель преломления образца: при его исходном значении 1.7 минимальное значение составило 1.5, а максимальное – 2.0.

Последний параметр оптимизации – размер слоя. Его исходная величина составляла 0.2 мм, минимальное значение 0.1 мм и максимальное – 0.3 мм. Стандартное отклонение для первой итерации составляло 37.4 %. На пятнадцатом шаге оптимизации (Рисунок 4б) параметры изменились следующим образом: значение концентрации частиц возросло до 4.09%, радиус частиц - 521.07 нм, показатель преломления увеличился до 1.9, а размер слоя – до 0.203 мм.

Среднеквадратическое отклонение для пятнадцатой итерации составило 12.7 %. Фактически полный процесс оптимизации составил тридцать четыре итерации, однако наилучший результат оптимизации был достигнут на двадцать девятом шаге (Рисунок 4с). На данном этапе оптимизации наблюдались следующие параметры: концентрация частиц составила 3.17 %, радиус частиц – 547.93 нм, показатель преломления – 1.93, и толщина слоя – 0.18 мм. Среднеквадратическое отклонение для двадцать девятой итерации составило 4.5 %.

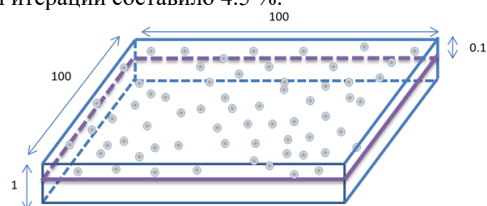


Рис. 5. Схема модели исследуемого образца

Этот пример демонстрирует хорошую эффективность предлагаемого метода, поэтому мы применили его для более сложной ситуации, которая тесно связана с реальной ДФР.

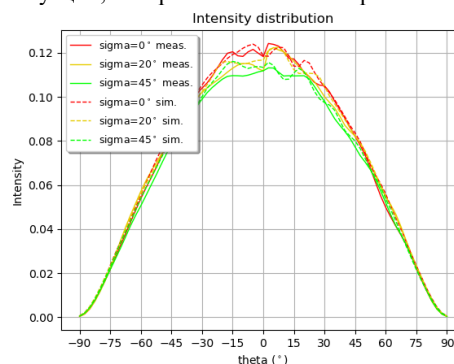


Рис. 6. Результаты восстановления ДФР, основанное на оптимизации параметров материала с объемным рассеиванием для конкретных углов луча: 0°, 20°, 45°.

На Рисунок 6 приведены результаты для нескольких углов падения. Процесс оптимизации состоял из тридцати пяти итераций, а наилучший результат был достигнут при значении стандартного отклонения 3.5 %. Процесс оптимизации достаточно быстрый, время прохождения всех шагов - 7 минут.

4. Заключение

Предложенный метод восстановления оптических характеристик образцов материалов с объемным рассеиванием и шероховатыми границами хорошо согласуется с результатами измерений ДФР соответствующих образцов материала.

Применение данного метода обеспечивает быстрое и физически корректное восстановление отдельных оптических параметров (ДФР граничной поверхности и характеристик среды объемного рассеивания) для образцов со сложными оптическими свойствами.

5. Благодарности

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке грантами РФФИ № 17-01-00363, № 16-01-00552 и № 18-01-00569, а также компанией Integra Inc.

6. Литература

- [1] Calabro, K.W. and Cassarly, W., Modeling scattering in turbid media using the Gegenbauer phase function // Proc. SPIE 9333, Biomedical Applications of Light Scattering IX, 93330F (2015). doi: 10.1117/12.2079695
- [2] Ershov, S.V. and Zhdanov, D.D., Efficient application of Optical Objects in light simulation software // Proc. 15th International Conference on Computer Graphics and Applications - GraphiCon-2005, Russia, Novosibirsk, 2005, p. 284-288.
- [3] Germer, T.A., Bidirectional scattering distribution function measurements from volume diffusers: correction factors and associated uncertainties // Applied optics. – 2016. Vol.55, No. 25 – P. 75-85. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.006978>
- [4] Kuperman-Le Bihan, Q., Volume scattering characterization for illumination design // Proc. SPIE 8550, Optical Systems Design – 2012. 85502K; doi: 10.1117/12.981995
- [5] Magarill, S., Cassarly, W.J., Jenkins, D.R. and others. Parametric Model of Volumetric Scattering // Design and Fabrication Congress 2017 (IODC, Freeform, OFT), OSA – 2017.
- [6] Официальный сайт компании Muracami Color Research Laboratory. URL: <http://www.mcrl.co.jp/english/index.html> (дата обращения 14.05.2018)
- [7] Nielsen, J.B., Jensen, H.W. and Ramamoorthi, R., On Optimal, Minimal BRDF Sampling for Reflectance Acquisition // ACM TOG. – 2015. № 34(6). – P.1-11.
- [8] Nurcan, S., Serkan, E. and Aydın, Ö., BRDF Reconstruction Using Compressive Sensing // 21st International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. – 2013, – P. 88-94.
- [9] Официальный сайт компании Pab advanced technologies Ltd, URL: <http://www.pab.eu/?d=gonio-photometer> (дата обращения 14.05.2018)
- [10] Sokolov, V.G., Zhdanov, D.D., Potemin, I.S., Bogdanov, N.N., Zhdanov, A.D. and Denisov, E.U., Reconstruction of BSDF based on optimization of Micro-Relief normal distribution // Proc. of 27th International Conference on Computer Graphics and Vision. – 2017. –P. 37-41.
- [11] Sokolov, V.G., Zhdanov, D.D., Potemin, I.S., Garbul, A.A., Voloboy, A.G., Galaktionov, V.A. and Kirilov, N., Reconstruction of scattering properties of rough air-dielectric boundary // Optical Review. – 2016. Vol.23(5), – P. 834-841. doi: 10.1007/s10043-016-0250-6.
- [12] Zhdanov, D.D., Garbul, A.A., Potemin, I.S., Voloboy, A.G., Galaktionov, V.A., Ershov, S.V. and Sokolov, V.G., Photorealistic Volume Scattering Model in the Bidirectional Stochastic Ray Tracing Problem // Programming and Computer Software. – 2015. Vol. 41, No. 5. – P. 295–301. doi: 10.1134/S0361768815050102.
- [13] Zhdanov, D.D., Potemin, I.S., Sokolov, V.G., Garbul, A.A., Voloboy, A.G. and Galaktionov, V.A., Simulation of the BSDF measurement capabilities for various materials with GCMS-4 goniospectrophotometer // Proceedings of 12th International Conference "Applied Optics 2016". – 2016. Vol. 2. –P. 219-223.

Об авторах

Соколов Вадим Геннадиевич, научный сотрудник информационно вычислительного центра ИПМ.

Его e-mail sokolovv1969@gmail.com.

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологий визуализации университета ИТМО. Его e-mail ddzhdanov@mail.ru.

Потемин Игорь Станиславович, к.т.н., доцент кафедры технологий визуализации университета ИТМО. Его e-mail ipotemin@yandex.ru.

Борис Хаимович Барладян, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела компьютерной графики и вычислительной оптики ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. Его e-mail bbarladian@gmail.com.

Богданов Николай Николаевич, аспирант кафедры технологий визуализации университета ИТМО. Его e-mail nnbogdanov@corp.ifmo.ru.

Жданов Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры технологий визуализации университета ИТМО. Его e-mail adzhdanov@corp.ifmo.ru.