

Метод восстановления двунаправленной функции рассеяния, основанный на оптимизации распределения нормалей микрорельефа

Н.Н. БОГДАНОВ¹, Е.Ю. ДЕНИСОВ, А.Д. ЖДАНОВ, Д.Д. ЖДАНОВ,
И.С. ПОТЁМИН, В.Г. СОКОЛОВ

ИПМ им. Келдыша РАН, Москва, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: 'nbnbogdanov@corp.ifmo.ru

Аннотация

Работа посвящена разработке метода восстановления рассеивающих свойств шероховатой поверхности. Под шероховатой поверхностью в данном случае понимается граница раздела диэлектрик-воздух. Обычно эти свойства описываются с помощью двунаправленной функции рассеяния. Прямое измерение таких функций либо невозможно, либо его стоимость очень высока. Метод восстановления двунаправленной функции рассеяния, основанный на распределении высот микрорельефа, требует сложной процедуры подгонки и зачастую даёт не очень хорошие результаты. В предлагаемом решении шероховатая поверхность моделируется параметрической функцией, эмулирующей плотность распределения нормалей к граням микрорельефа поверхности. Результат оптимизации плотности распределения нормалей к граням поверхностного микрорельефа хорошо согласуется с ожидаемым.

Ключевые слова: Микрорельеф, двунаправленная функция рассеяния, шероховатая поверхность, диффузия, рендеринг, светопроводящие системы, полное внутреннее отражение, волновая оптика, лучевая оптика.

1. Введение

Светопроводящие оптические элементы с шероховатыми поверхностями широко применяются в приборах со сложным распространением света. Как правило, шероховатые поверхности применяют в двух случаях: либо для формирования специальной гониометрической диаграммы рассеяния светового излучения, либо для создания требуемого пространственного распределения яркости в различных светопроводящих устройствах, таких

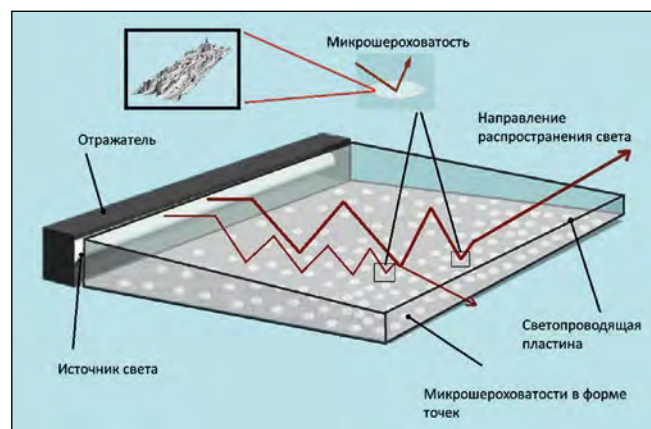
как системы подсветки жидкокристаллических дисплеев, приборные панели автомобилей, светодиодные светильники и др. При моделировании распространения света внутри материала светопроводящего элемента необходимо учитывать оптические свойства шероховатой границы раздела между двумя средами, тогда как оптические свойства всего элемента лишены смысла. Более того, эти свойства отличаются в зависимости от того, падает ли свет на границу раздела со стороны материала светопроводящего элемента или же свет падает на поверхность из воздуха. Поэтому для физически корректного моделирования такого рода устройств оптические свойства шероховатой поверхности необходимо учитывать индивидуально для каждой стороны.

На рис. 1 представлен пример использования шероховатой поверхности. На нижнюю поверхность светопроводящей пластины (СПП) нанесены пятна с микрорельефом. Эти пятна являются рассеивающими поверхностями. Они имеют относительно малый размер, и поэтому их иногда называют диффузными точками. Внутри СПП луч света распространяется согласно закону полного внутреннего отражения. После рассеяния на диф-

фузных точках луч отклоняется от направления зеркального отражения и может покинуть СПП. Изменяющаяся по поверхности СПП плотность распределения диффузных точек позволяет получить равномерное излучение по всей площади выходной поверхности.

Параметры рассеяния света шероховатой поверхности описываются двунаправленной функцией рассеяния (ДФР). Функция имеет сложное многомерное представление и зависит от множества параметров, таких как: направление падения света, направление наблюдения света и спектральный состав (цвет) излучения. ДФР является суперпозицией двух функций: двунаправленной функции отражательной способности (ДФОС) и двунаправленной функции пропускания (ДФП). Для плоских тонких образцов ДФР может быть измерена с помощью гониофотометра. В случаях, когда толщиной образца с микрорельефом можно пренебречь, его физически корректная модель может быть представлена как одиночная поверхность, на которую назначены свойства ДФР, полученной в результате измерений. Такая «поверхностная» модель, схематически представленная на рис. 2а, может быть применена для моделирования различных диффузных плёнок или фильтров. К сожалению, эта модель не применима, если толщина образца с микрорельефом важна для распространения света внутри прозрачного материала СПП. В таком случае должна использоваться «твердотельная» модель, показанная на рис. 2б. Это означает, что для корректного моделирования необходимо иметь две ДФР шероховатой поверхности, одна из которых описывает рассеивающие свойства при прохождении излучения из воздуха в стекло, а другая – из стекла в воздух.

Рис. 1. Пример использования шероховатой поверхности



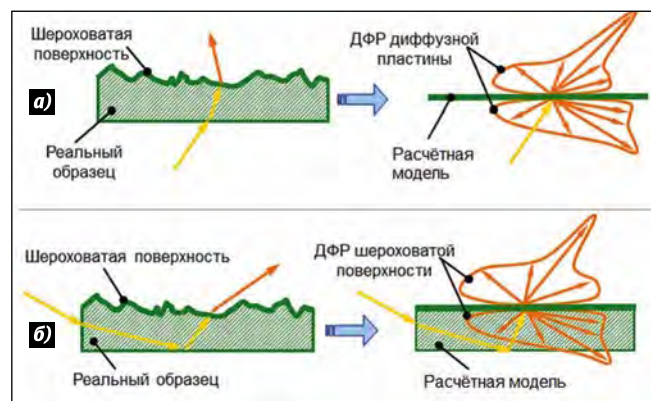
Главная проблема в том, что ДФР шероховатой поверхности СПП не может быть измерена напрямую. Этому есть несколько причин. Во-первых, это наличие многократных отражений между шероховатой поверхностью и другими поверхностями измеряемого образца. Во-вторых, невозможность осветить образец или детектировать свет под скользящими углами к шероховатой поверхности. Решение проблем дорогостоящее и требует специального оборудования для исключения многократных отражений между поверхностями и преломления на стороне, противоположной измеряемой шероховатой поверхности.

Многие исследователи занимаются решением сложной проблемы восстановления ДФР [1–8]. Ряд работ [1–5, 7] посвящён точному и физически корректному восстановлению путём сравнения с базой данных измерений ДФР MERL [9]. Эта база данных содержит функции отражения для 100 видов материалов. Авторы этой базы данных приводят описание своего метода получения ДФР [10], но возникает вопрос о корректности измерений. Сложно сказать, насколько точны измерения ДФР, приведённые в базе данных MERL, ввиду отсутствия информации о сертифицированном измерительном оборудовании. Вот почему возникает вопрос о достоверности измерений.

Следует также отметить, что в большинстве работ авторы рассматривают вопрос о восстановлении только двунаправленной функции отражательной способности (ДФОС), а не в целом двулучевой функции рассеяния (ДФР). Как правило, ДФОС применяется только к поверхностям, но этого не достаточно для точного моделирования, например, матового стекла.

Одним из альтернативных способов восстановления ДФР является компьютерное моделирование рассеяния света на границе микрорельефа среды образца [11]. Такой косвенный способ также имеет ряд недостатков. В частности, отклонение профиля поверхности может быть сопоставимо с длиной волны падающего света. Это означает, что расчёты должны осуществляться с учётом аспектов волновой оптики, которые, во-первых, очень сложные, и во-вторых, могут быть не достоверными из-за недостаточной точности измерений профиля поверхности.

Рис. 2.
«Поверхностная» модель диффузной пластины (а), «твердотельная» модель СПП (б)



В данной статье представлен комбинированный подход. В нём используется оптимизация ДФР, основанная на приближении формы к функции Гаусса и Коши, с ограниченным числом параметров. Такой подход обеспечивает более корректное восстановление ДФР, чем метод, предложенный в [11].

Авторы предлагают способ восстановления ДФР, который позволяет физически корректно моделировать сложные сцены с матированным стеклом. Для проведения экспериментов использовалось сертифицированное измерительное оборудование GCMS-4 [12], которое позволило провести физически точное измерение ДФР. В данном исследовании проводилось восстановление ДФР и результаты сравнивались с измерениями на оборудовании GCMS-4, поэтому можно быть уверенным, что полученные результаты являются физически корректными.

2. Численные методы восстановления ДФР

Существует несколько численных подходов к вычислению ДФР шероховатых поверхностей как на основе волновой оптики, так и на основе лучевого приближения. В предыдущем исследовании было описано решение, в котором поверхностный микрорельеф представлен в виде распределения высот в пределах репрезентативной области образца [11].

Восстановление ДФР пластины с шероховатой поверхностью было основано на использовании двух наборов измеренных данных: распределения высот микрорельефа и ДФР всего образца (ДФП и/или ДФО). Зачастую результаты восстановления были не очень хорошими и требовали комплексной оптимизации микрорельефа (изменения масштаба и филь-

трации профиля). Однако фильтрация не может гарантировать успешного решения задачи.

Новый подход основан на использовании только одного типа данных, а именно: ДФР (ДФП и/или ДФО), измеренной для всего образца. Несмотря на разницу с предыдущим алгоритмом, базовая модель нового подхода та же самая. Исходной информацией для восстановления ДФР является угловое распределение силы света, рассчитанное после преобразования лучей на границе двух сред, представленной в виде микрограней. Единственное отличие заключается в том, что микрограни определяются как плотность распределения нормалей к поверхностям этих микрограней. Приложение *OPTOS MicroRelief tool* [13], интегрированное в программный комплекс *Lumicept* [14], обеспечивает корректные вычисления распределения силы света, рассеянного на микрорельефе.

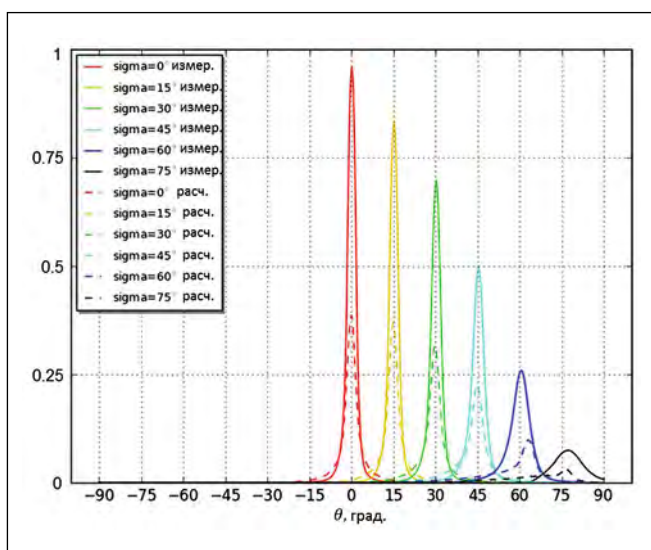
Начальное распределение нормалей к микрограням рельефа, необходимое для моделирования распространения света, может быть восстановлено по измеренной ДФО образца. При отсутствии затенения соседних микрограней друг другом угловое распределение нормалей примерно в 2 раза уже, чем ДФО. Конечно, это является грубой аппроксимацией, но вполне может быть использовано в качестве начального шага для всей процедуры по восстановлению ДФР.

Для восстановления ДФР мы использовали реальный образец в виде плоскопараллельной пластины, у которой одна поверхность – полированная, а другая – шероховатая (матированная). Пластина освещалась коллимированным пучком света. Для каждого направления падения измерялась интенсивность отражённого и прошедшего света. Для упрощения измерения проводились в одной пло-

Рис. 3. Схема модели гониофотометра для измерения ДФР диффузной пластины



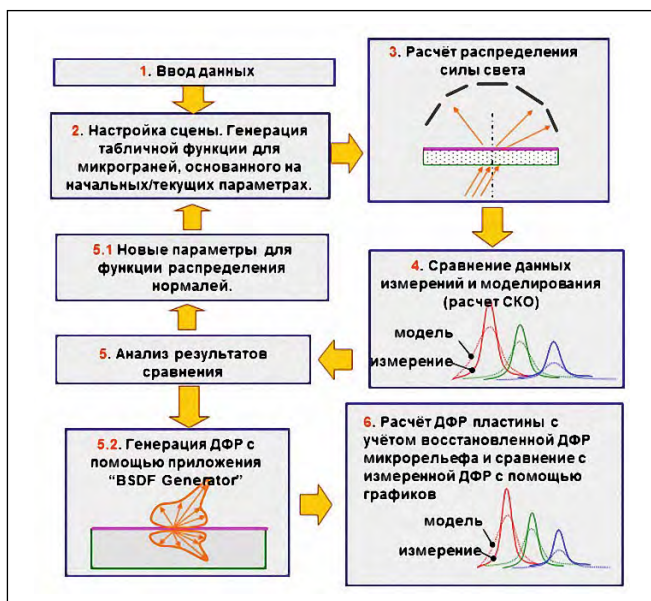
Рис. 4. Результаты измерений и расчёта ДФП



нерации ДФР, входящего в комплекс программ *Lumiccept* [15], используя плотность углового распределения нормалей. Рассеянный пластиной свет аккумулировался крутыми виртуальными детекторами, расположенными по заданной угловой сетке. Расстояния между детекторами и измеряемым образцом и радиус детекторов соответствуют характеристикам измерительной установки: взаиморасположению измеряемого образца и фотоприёмника, угловому и пространственному разрешению гониофотометра.

На рис. 4 представлены графики измеренной и рассчитанной ДФП в виде относительного углового распределения силы света, прошедшего через образец с одной шероховатой поверхностью. Объединённый график содержит ДФП для всех измеренных направлений падения света: 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° (σ – угол между нормалью к поверхности образца и направлением падения света). Направления падения на графике обозначены различными цветами. Отметим, что все измерения и расчёты проведены в плоскости падения. Сплошными линиями обозначены результаты измерений реального образца. Пунктирные линии соответствуют результатам моделирования образца с восстановленной ДФР. Видно, что есть существенная разница между результатами моделирования и измерений. Похожую тенденцию можно наблюдать и на графике с результатами по отражению света (не представлены в статье).

Рис. 5. Процедура оптимизации углового распределения нормалей к микрограням рельефа шероховатой поверхности



3. Алгоритм оптимизации восстановления ДФР, основанный на распределении нормалей

Главная причина отличий между результатами измерений и расчёта, показанных на рис. 4, состоит в том, что начальное восстановленное отклонение нормалей не подходит для реальной модели рассеяния света на образце. С другой стороны, угловое распределение нормалей является косвенным способом определения ДФР. Таким образом, разумно предположить, что оптимизация углового распределения нормалей к микрограням рельефа шероховатой поверхности позволит получить целевую ДФР образца.

Основная идея предлагаемого оптимизационного метода состоит в том,

скости – в плоскости падения. Схема моделирования (рис. 3) очень близка к схеме измерения. Коллимированный пучок света с соответствующей апертурой и угловой расходимостью освещает пластину. Шероховатая поверхность образца моделировалась ДФО, рассчитанной с помощью модуля ге-

что для восстановления искомой ДФР шероховатой поверхности достаточно использовать только один набор измеренных данных, например, характеристик пропускания всего образца или, другими словами, его ДФП. На рис. 5 представлена процедура оптимизации. Шероховатая поверхность определяется плотностью углового распределения нормалей к микрограням поверхности. Алгоритм оптимизации содержит следующие шаги:

1. На первом шаге вводится информация о размерах образца, показатель преломления, ДФП образца, начальные параметры для описания функции плотности распределения нормалей.

2. Второй шаг включает в себя настройку тестовой сцены, генерацию табличной функции для микрограней, основанной на начальных параметрах. После этого распределение микрограней добавляется в дополнительное приложение OPTOS MicroRelief [13], генерирующее соответствующую ДФР.

3. На третьем шаге вычисляется угловое распределение силы света для подготовленного образца.

4. Далее оптимизатор сравнивает результаты расчёта с результатами измерений и вычисляет среднеквадратическое отклонение (СКО).

5. Следующим шагом является анализ отклонения между оптимизированным и измеренным результатами, чтобы принять решение о продолжении или остановке процесса оптимизации.

5.1. Если желаемое отклонение не достигнуто, тогда оптимизатор меняет параметры плотности распределения нормалей и возвращается к шагу 2 для продолжения процесса.

5.2. Впоследствии, если отклонение приемлемо, генерируется финальная ДФР при помощи инструмента «BSDF Generator» программного комплекса Lumiccept [14].

6. Наконец, оптимизатор строит графики измеренной ДФР образца и рассчитанной ДФР образца с учётом восстановленной ДФР шероховатой поверхности образца.

Важной особенностью данного метода является то, что при восстановлении ДФР параметром оптимизации является распределение плотности нормалей к микрограням поверхности. Однако табличное определение распределения плотности нормалей не подходит для большинства опти-

Рис. 6. Общий вид функций Гаусса и Коши

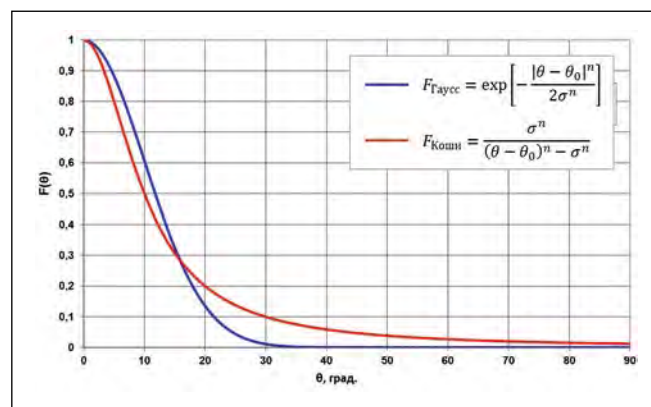
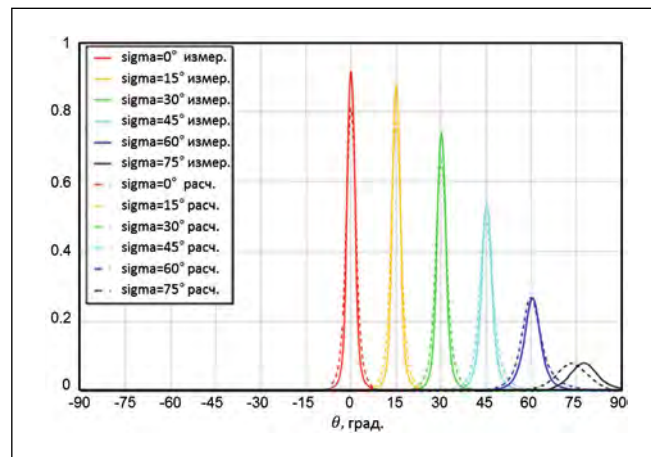


Рис. 7. Результаты восстановления ДФР, полученные ранее



мизационных инструментов, поскольку многопараметрические процедуры требуют очень много расчётного времени. Наиболее удобным представлением закона распределения является аналитическая функция с минимальным числом параметров. Проведённые авторами эксперименты позволили определить два наиболее подходящих в данном случае типа базовых функций: Гаусс-образная и Коши-образная. Для большинства случаев распределение Коши даёт более хороший результат, хотя для некоторых микрорельефов приближение Гаусса представляется лучшим. По мнению авторов, аппроксимация по Гауссу даёт хорошее согласование с измерениями ДФП в зонах с высокой прозрачностью (по крайней мере, с точки зрения среднеквадратического отклонения между результатами моделирования и измерения). Поэтому в процессе оптимизации разумно использовать оба типа функций. Общий вид функций Гаусса и Коши представлен на рис. 6. Хорошо видно, что распределение Коши шире в зонах дальних углов. Параметр θ_0 , определяющий сдвиг пика распределения вдоль оси углов, является довольно формальным, поскольку в большинстве случа-

ев плотность распределения нормалей имеет максимум при $\theta_0 = 0$. Но этот параметр зарезервирован для улучшенной оптимизации.

Учитывая то, что общее табличное представление функции плотности распределения нормалей не является хорошим решением для оптимизации, было выбрано альтернативное «гибридное» решение. Базовая функция плотности распределения нормалей может быть задана Гаусс-образной или Коши-образной, в то время как некоторые области функции могут быть заменены на локально табличную функцию. Краткое описание алгоритма можно представить следующим образом:

1. Предположим, что процедура оптимизации с аналитической функцией плотности распределения нормалей не может соответствовать ДФР в области, близкой к нулевому углу θ . Это означает, что плотность распределения нормалей в области нулевого углового отклонения должна быть представлена табличной функцией.

2. Затем оптимизатор добавляет несколько точек в табличное представление плотности распределения нормалей в этой области и продолжает оптимизацию смешанной функции. Если

Рис. 8. Результаты восстановления ДФР, основанные на Коши-образной функции

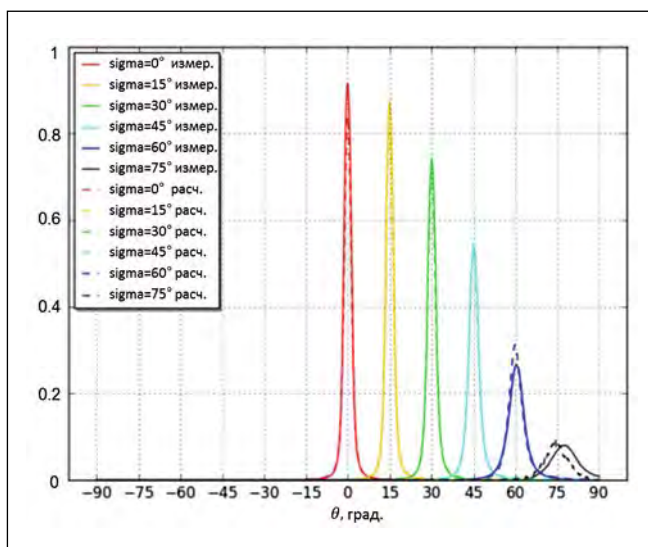
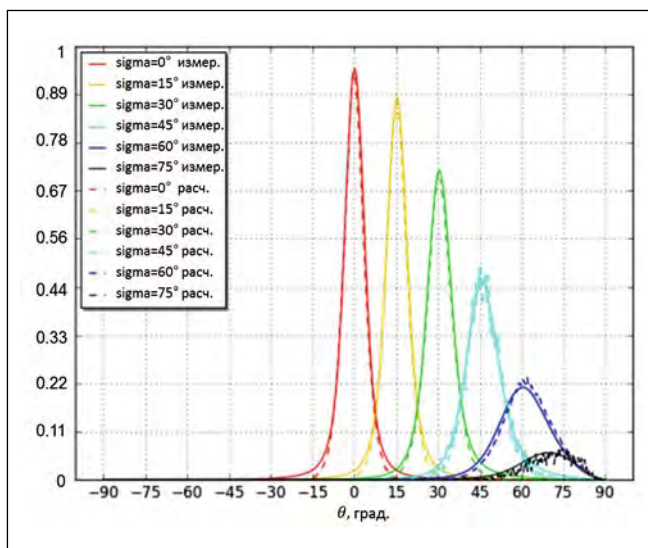


Рис. 9. Результаты восстановления ДФР, основанные на Гаусс-образной функции



число добавленных точек не высоко, процедура оптимизации может найти решение.

4. Сравнение методов восстановления ДФР, основанного на распределении высот и основанного на угловом распределении нормалей

Для тестирования нового метода были выбраны несколько проблематичных образцов, представленных в работе [15]. Эти образцы требовали сложной процедуры настройки, основанной на фильтрации и масштабирования измеренных микрорельефов, для некоторых был использован искусственно созданный рельеф. Ранее достигнутые результаты представлены на рис. 7.

Результаты восстановления ДФР, основанные на Коши-образной функции, представлены на рис. 8.

Результаты восстановления ДФР, основанные на Гаусс-образной функции, представлены на рис. 9.

Результаты оптимизации плотности распределения нормалей хорошо согласуются с желаемым результатом (по крайней мере, для исследуемых образцов). В большинстве случаев Коши-образная функция даёт приемлемые результаты, по крайней мере, не хуже, чем в случае с измеренным микрорельефом [16]. Функция распределения Гаусса в некоторых случаях также полезна. Всё это позволяет сделать вывод о том, что точные измерения микрорельефа в общем не требуются для восстановления ДФР шероховатой поверхности.

Использование плагина *OPTOS MicroRelief* [13] позволяет исключить *BPDF Generator Lumicept* [14] из процедуры оптимизации. Он ускоряет процесс оптимизации, поскольку не требуется генерация ДФР на каждом

шаге оптимизации, что требует значительных затрат времени на расчёты.

Попытка применения табличной функции плотности углового распределения нормалей в качестве оптимизационного параметра не удалась. Оптимизация многопараметрической функции является очень трудоёмкой задачей, и все преимущества, вызванные свободной формой задания плотности распределения нормалей, сводятся на нет замедлением и общей расходом процедуры оптимизации.

Можно наблюдать хорошее согласование между результатами измерений и моделирования для направлений падения, близких к нормали ($\theta = 0$), и приемлемое согласование результатов для других направлений падения. В данной работе были показаны результаты только для ДФП. Однако оптимизационная процедура может быть применена также и для отражения. Обычно оптимизация результатов ДФП улучшает и результаты ДФО.

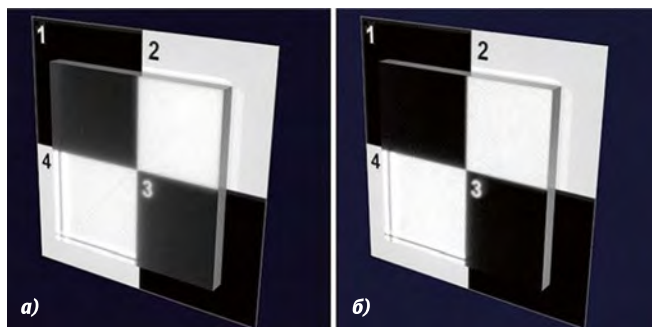
Кроме того, мы промоделировали построение фотореалистичного изображения пластины с шероховатой поверхностью. Вид пластины с ДФР шероховатой поверхности до оптимизации (т.е. когда изначально использовался измеренный профиль) представлен на рис. 10а. Вид пластины с оптимизированной ДФР представлен на рис. 10б.

Изображения, представленные на рис. 10, были синтезированы с использованием физически корректного рендеринга, в основе которого лежит метод трассировки лучей, реализованный в программном комплексе *Lumicept* [14]. Сцена состоит из пластины, на внешнюю поверхность которой назначена ДФР. Пластина помещается над шахматной подложкой и освещается набором источников света, создающих сложное диффузное освещение.

5. Выводы и результаты

В заключении можно отметить, что метод оптимизации плотности углового распределения нормалей для восстановления ДФР показывает хорошее согласование с желаемым результатом (как минимум, в рамках исследуемых образцов). В большинстве случаев использование Коши-образной функции как базовой функции оптимизации ДФР является более предпочтитель-

Рис. 10. Вид пластины с ДФР шероховатой поверхности до (а) и после (б) оптимизации



ным и в ряде случаев показывает гораздо лучшие результаты восстановления ДФР, чем метод восстановления ДФР по измеренному микрорельефу. Кроме того, альтернативной функцией оптимизации ДФР может служить и Гаусс-образная функция, которая в некоторых случаях может обеспечить более высокую скорость сходимости оптимизируемой ДФР к целевому значению. Это позволяет сделать вывод о возможности исключения измерений микропрофиля вообще для точного восстановления ДФР.

6. Благодарности

Данное исследование проведено при частичной поддержке грантов РФФИ № 16–01–00552 и № 17–01–00363, финансовой поддержке ведущих университетов РФ (субсидия 074-U01), а также компанией Integra Inc.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seylan, N., Ergun S., Öztürk A. BRDF Reconstruction Using Compressive Sensing// 21st International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 2013. – pp. 88–94.
2. Nielsen, J.B., Jensen, H.W., Ramamoorthi, R. On Optimal, Minimal BRDF Sampling for Reflectance Acquisition// ACM TOG 34(6).– 2015. – pp.1–11.
3. Doris Antensteiner, D., Štolc, S. Full BRDF Reconstruction Using CNNs from Partial Photometric Stereo-Light Field Data// Workshop on Light Fields for Computer Vision at ECCV-2017– 2017. – pp. 13–21.
4. Lu, F., Chen, X., Sato, I., Sato, Y. SymPS: BRDF Symmetry Guided Photometric Stereo for Shape and Light Source Estimation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Issue: 99. – pp.1–14.
5. Manmohan Chandraker, M., Bai, J., Ramamoorthi, R. On Differential Photometric Reconstruction for Unknown, Isotropic BRDFs// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.– 2013. – vol. 35. – no. 12. – pp.2941–2954.

6. Chuua, S.Y., Wanga, X., Guoa, N., Tan, C.S. Performance of Range Gated Reconstruction: A Theoretical Analysis// Proc. of SPIE. – Vol. 10250. – pp.1–5.

7. Filip, J., Havlí, M., Vávra, R. Adaptive highlights stencils for modeling of multi-axial BRDF anisotropy// The Visual Computer.– 2017. – Volume 33. – Issue 1. – pp.5–15.

8. Chen, C., Dong, Y., Peers, P., Zhang, J., Tong, X. Reflectance Scanning: Estimating Shading Frame and BRDF with Generalized Linear Light Sources// OOPSLA '94.– 1994. – Volume 5. – Issue 4, Oct. 1994 – pp. 67–71.

9. MERL BRDF database <http://people.csail.mit.edu/wojciech/BRDFDatabase/>

10. Matusik, W., Pfister, H., Brand, M., McMillan, L. A Data-Driven Reflectance model// ACM Transactions on Graphics 22, 3(2003), 759–769.

11. Letunov, A.A., Barladian, B., Galaktionov, V.A., Ershov, S.V., Voloboy, A., Zueva, E.// Proc. 22nd Int. DAAAM Symp., pp. 1459 (2011).

12. Muracami Color Research Laboratory, <http://www.mrcr.co.jp/english/index.html>

13. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Жданов Д.Д. Технология оптических элементов в компьютерном моделировании оптико-электронных приборов // «Информационные технологии в проектировании и производстве», № 3, 2006, с. 46–56.

14. Lumiccept – Hybrid Light Simulation Software, <http://www.integra.jp/en>

15. Zhdanov, D., Sokolov, V., Potemin, I., Voloboy, A., Galaktionov, V., Kirilov, N.// Opt. Rev.– 2014.– 21(5),– 642 (2014).

16. Sokolov, V.G., Zhdanov D.D., Potemin, I.S., Garbul, A.A., Voloboy, A.G., Galaktionov, V.A., Kirilov N., Reconstruction of scattering properties of rough air-dielectric boundary // Optical Review.– 2016.– 23(5). – pp. 834–841.



интересов: проектирование освещения

Богданов Николай Николаевич, инженер. Старший инженер ОАО «Интер РАО Светодиодные Системы». Аспирант кафедры «Технология визуализации» Университета ИТМО. Область научных



М.В. Келдыша РАН

Денисов Евгений Юрьевич, окончил в 1995 г. Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова. Научный сотрудник Института прикладной математики им.



ИТМО. Область научных интересов: компьютерная графика, виртуальное прототипирование

Жданов Андрей Дмитриевич, инженер. Младший научный сотрудник ООО «Научно-технический вычислительный центр ИПМ». Аспирант кафедры «Технология визуализации» Университета



университета ИТМО. Область научных интересов: прикладная оптика, компьютерная графика, светотехника

Жданов Дмитрий Дмитриевич, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1984 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. Заведующий кафедрой «Технология визуализации» Уни-



верситета ИТМО. Область научных интересов: прикладная оптика, компьютерная графика, светотехника

Потёмин Игорь Станиславович, кандидат техн. наук. Окончил в 1984 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. Старший научный сотрудник ООО «Научно-технический вычис-



ИПМ». Область научных интересов: компьютерная графика, прикладная оптика, светотехника

Соколов Вадим Геннадьевич, окончил в 1994 г. Ленинградский институт точной механики и оптики. Научный сотрудник ООО «Научно-технический вычис-