

МОДЕЛЬ ЛИНЗЫ ДЛЯ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ С УЧЕТОМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В. А. Дебелов^{1,2}, К. Г. Кушнер²

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

² *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск*

УДК 004.925.3

Линза — один из основных объектов в оптике. Также она достаточно хорошо проработана в фотореалистической компьютерной графике. Существуют немало систем оптического дизайна, например, *ASAP*[®], где также конструируются линзы. Тем не менее, при решении конкретной прикладной задачи, как правило, обнаруживается, что информация разбросана по источникам или, вообще, не полна, и нужным параметрам линзы не уделялось внимания. Рассматривается конкретное применение модели линзы, а именно: работа линзы в составе поляризационного микроскопа (или полярископа), когда надо учитывать поляризацию света при расчете интерференционных картин. Мы отвергли модель тонкой линзы и модель толстой линзы, т.к. они: во-первых, являются приближениями; во-вторых, частично подавляют реальные физические явления типа сферической или хроматической аберраций, что хорошо для фотографии, но совершенно не подходит для нашей задачи. Остановились на подходе реалистической компьютерной графики, представив линзу в виде 3D подscene, ограниченной двумя «прозрачными» сферическими поверхностями и непрозрачной боковой поверхностью (цилиндр, сфера), и изучили ее влияние на поляризованный свет. Для расчета интерференционной картины применена трассировка лучей. Разработанная модель линзы преобразует входной луч света с известной поляризацией (неполяризованный, частично линейно поляризованный, линейно поляризованный) в выходной луч с точными интенсивностью и состоянием поляризации света. Линейная поляризация внутри устройства поддерживается наличием двух поляризаторов. Отметим, что в модели линзы учтены такие часто игнорируемые параметры, как поглощение и рассеяние оптического стекла. Кроме того, рассматривается влияние возможных искажений выходного луча, которые могут возникать из-за внутренних переотражений луча внутри линзы.

Ключевые слова: линза, линейная поляризация света, оптическая дисперсия, фотореалистический спектральный рендеринг, трассировка лучей, поляризационный микроскоп.

Введение

Линза — это один из самых распространенных оптических объектов, она применяется в повседневной жизни и в научных исследованиях. Очевидно, что реалистическая компьютерная графика не обошла вниманием такие объекты трехмерных сцен, особенно, в связи с разработкой систем виртуальной и добавленной реальности. В этой работе мы не будем рассматривать все многообразие линз, которые могут иметь достаточно причудливые геометрические формы — очки, например. Хотя, стоит отметить, что излагаемый здесь материал применим и в этом случае. Тем не менее мы рассмотрим изучаемые в оптике классические линзы [1], которые являются основными конструктивными элементами многих оптических устройств, например, таких как микроскопы, объективы и т.п. Отметим, что существует достаточно много систем оптического дизайна, например, наиболее мощные и продвинутые *ASAP* [2], *OSLO* [3] и другие, функциональность которых позволяет конструировать в том числе геометрию линз и определять различные их оптические характеристики, такие как аберрации, астигматизм и т.п. В основном эти САПР ориентируются на разработку более сложных оптических устройств, таких как объективы (несколько линз) и позволяют определять индивидуальные характеристики и поведение какого-либо отдельного луча света, например, в *ASAP* пользователь может задать и отследить до пяти лучей. Наша задача возникла в связи с компьютерным моделированием

поляризационного (или петрографического) микроскопа [4, 5], т.е. необходимо выполнить рендеринг (расчет изображения) специфической 3D сцены и получить изображение, аналогичное наблюдаемому в такой микроскоп. Таким образом, наша задача перенести через линзу (компьютерную модель линзы) весь световой поток одновременно. В нашем случае не надо заботиться о средствах, направленных на улучшение каких-либо характеристик линзы, чему посвящена значительная часть функциональности упомянутых САПР. Наша задача — разработка компьютерной модели линзы, удовлетворяющей расчету физически корректной картины. Таким образом, какое-либо заимствование из таких САПР практически невозможно, учитывая их know-how, правда, разработка опирается на те же самые физические принципы, на которых построены эти САПР. Расчет изображений — это задача другой дисциплины — компьютерной графики, где вопросам улучшения характеристик устройств не уделяется внимания вообще, поскольку рендеринг сцены заключается в расчете изображения представленных объектов со специфицированными оптическими характеристиками и параметрами камеры. Другими словами, если устройство не подавляет нежелательные эффекты, которые сказываются на изображении, они должны на нем проявиться.

Материал работы построен в виде исторического экскурса в эволюцию систем реалистического рендеринга 3D сцен, где показывается, что существующие коммерческие и открытые программы не удовлетворяют задаче синтеза изображений, получаемых в поляризационном микроскопе.

1 RGB-модель и спектральная модель представления света и цвета

RGB-модель происходит из трехстимульной теории психофизиологии восприятия цвета человеком как смеси основных цветов: R — красный, G — зеленый, B — синий. Не вдаваясь в подробности, для нас главное в этой модели, то, что даже наши бытовые устройства отображения — телевизоры и мониторы компьютеров — работают на ее основе. Надо отметить, что до настоящего времени — это наиболее используемая модель в играх, дизайне, системах виртуальной реальности и т.д.

Известно, что свет представляет совокупность волн электромагнитного излучения и имеет спектральную природу, любые цвета — это спектры из видимого диапазона от 380 до 780 нм. Создадим простейшую сцену, включающую расцвеченную плоскость, линзу, точечный источник света. На рис. 1 слева приводится изображение, рассчитанное на основе RGB-модели самым применяемым алгоритмом Виттеда [6, 7]. Вполне реалистичное изображение, хотя для всех трех компонент цвета мы вынуждены назначить единое значение коэффициента преломления стекла. Представим, что мы знаем спектральные характеристики источника света и стекла линзы (взяты данные для стекла N-SF11 [8]), тогда можно применить спектральный рендеринг [7], используя тот же алгоритм Виттеда, и получить среднее изображение на рис. 1. Отличия видны на глаз. Здесь коэффициенты преломления (или индексы рефракции) различаются для разных длин волн. Если спектр представлен n_{Sr} отсчетами, потребуется построить в n_{Sr} раз больше деревьев трассировки, что значительно увеличит время расчета, в нашем случае $n_{\text{Sr}}=81$. На рис. 1 справа приведена разность предыдущих изображений, из которой видно, что более физически корректная спектральная модель представления света и цвета ухватывает больше эффектов взаимодействия света с прозрачными поверхностями — особенно это видно при переходе от одного цвета к другому. Справедлив вывод, что более корректная модель требует большего времени расчета. Тем не менее, более простая модель дает достаточно корректное изображение, например, черное пятно на изображениях показывает эффект полного внутреннего отражения.

Рассмотрим более точный учет поведения света при взаимодействии с границами прозрачных сред. Свет может быть естественный (неполяризованный), частично поляризованный и поляризованный, см. [9]. Известные программы рендеринга работают только с неполяризованным светом. При этом сделана попытка точнее оценить физически корректное взаимодействие неполяризованного света с прозрачными поверхностями — приближение Шлика [10] для расчета интенсивностей порожденных (отраженный и преломленный) лучей по отношению к падающему на границу двух прозрачных сред. Модернизируем сцену: нет точечного источника, зато плоскость является источником диффузного неполяризованного освещения в сцене. Физически корректно рассчитывать изменение интенсивности с помощью формул Френеля [11], когда на границе сред делается разложение неполяризованного света на две линейно поляризованные компоненты. Аппроксимация Шлика позволяет в два раза (по нашим экспериментам) ускорить этот расчет.

На рис. 2 показаны изображения, полученные с применением аппроксимации Шлика и формул Френеля. По негативу разности этих изображений видно, что используемое приближение дает определенную погрешность.

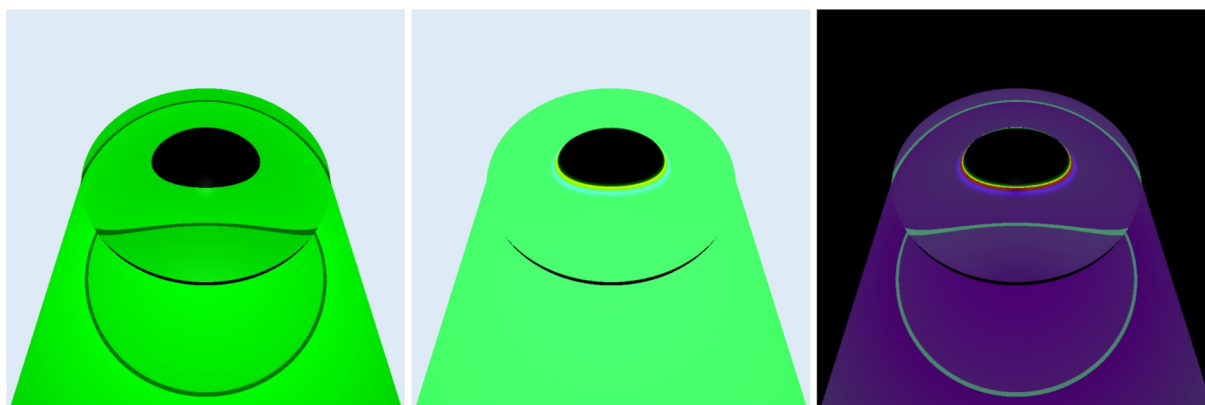


Рис. 1: Изображения слева направо: расчет по RGB-модели, расчет по спектральной модели, разность

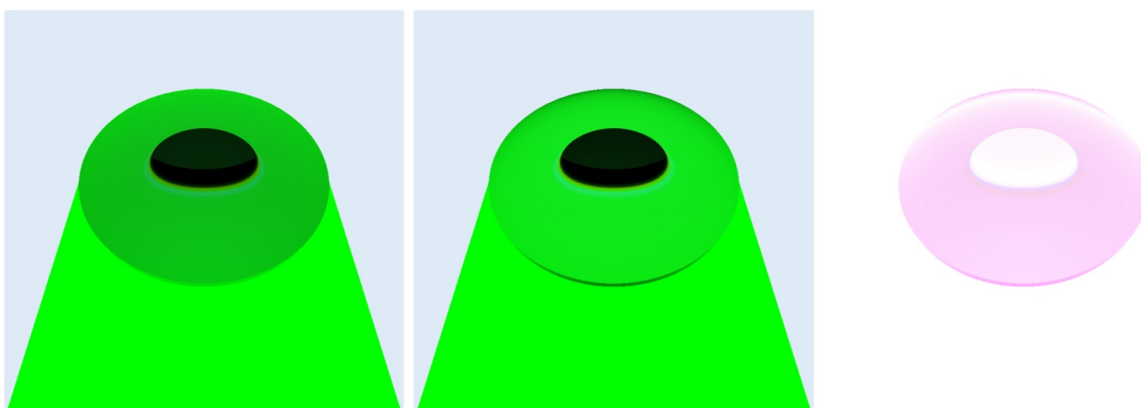


Рис. 2: Изображения слева направо: расчет по Шлику, расчет по Френелю, негатив разности

2 Модель представления луча света с учетом поляризации

Один взгляд на эволюцию представления луча, т.е. информационной нагрузки (или в дальнейшем — просто нагрузки) на математический луч, дается в работе [12]. В настоящее время применяемый на практике подход заключается в том, что нагрузка содержит одно (при спектральном рендеринге) или три (при RGB-рендеринге) значения интенсивности. Считается, что луч переносит неполяризованный свет между точками взаимодействия луча с поверхностями сцены. В предыдущем разделе мы показали, что даже локальный расчет (Шлик или Френель) на основе поляризации дает общее уточнение картинке. Все эти рассуждения о скорости расчета подходят в ситуации, когда необходимо выбирать визуальное восприятие рассчитанных картинок для «обычных» сцен. Другая ситуация при получении интерференционных картин, наблюдаемых в поляризационный микроскоп, когда невозможно применить какие-либо ускоряющие расчет аппроксимации или феноменологические модели отражения света подобные введенной Фонгом [7]. Требуется доводить до камеры лучи с точной спецификацией состояния поляризации переносимого света. Это не такое критическое требование для повседневной жизни, но приобретает первостепенное значение при изображении оптически анизотропных объектов или сред, например, кристаллов. В компьютерной графике этому направлению посвящено не так много исследовательских работ, ссылки на основные перечислены в [13, 14]. Состояние дел в компьютерной графике с интерференцией света см. в [15].

Линза входит во многие оптические устройства, поляризационный микроскоп можно представлять как конвейер обработки потока света, состоящий из линз, или аналог трубы с линзами перегородками [5]. На уровне компьютерной модели линзы невозможно решить задачу основного приложения, поэтому ее основная задача: корректно передавать вовне пришедшие на нее лучи, т.е. должны учитываться интенсивность, фаза и состояние поляризации. Рассмотрев возможные применения линзы, мы учли возможность получения интерференционных картин в основной программе — компьютерной модели поляризационного микроскопа. Вопросы дифракции на данном этапе не рассматривались.

3 Линзы *in silico*

В настоящее время компьютеризированы многие области научных исследований, в том числе и такие, в которых применяются микроскопы. Например, работа по световой микроскопии для физически обоснованной визуализации моделей мозга [16] или работа по восстановлению образца на основе цифровых изображений, полученных через микроскоп [17]. В таких разработках можно выделить компьютерные модели используемых линз. Это может быть некоторый преобразователь информации о проходящем свете, разработанный теоретически, или даже обособленный модуль, моделирующий линзу устройства. Показательный пример представления линз (и целых объективов) в компьютерной графике приведен в работе [18]. Здесь линзы — это просто часть сцены, никак особо не обозначенная и описанная набором поверхностей со специфицированными оптическими свойствами. Для получения изображения используется трассировка лучей, когда строится дерево (или путь), узлы которого соответствуют точкам поверхностей сцены, где происходит отражение и преломление света, т.е. возможное ветвление порождает не более двух потомков. Еще одна свежая работа [19] также игнорирует поляризацию света, предлагает достаточно эффективное моделирование поведения реальных линз и оптических систем для расчета изображений трассировкой лучей методом Монте-Карло.

Нам не удалось найти в доступных источниках компьютерных моделей поляризационных микроскопов и даже компьютерных моделей линз, обрабатывающих поляризованный свет. Показательно замечание из работы [16], что в текущем состоянии разработки игнорируются волновые эффекты, в основном дифракция, интерференция и поляризация. Почему можно в большинстве случаев игнорировать поляризацию? Во вводной главе к книге [20] Ханрахан отмечал, что игнорирование поляризации позволяет рассчитывать вполне реалистичные картины. Также отметим, что учет поляризации очень дорогой и, как правило, в отсутствии знания о когерентности света, приносимого различными лучами, не имеет смысла. Имеются компьютерные симуляции бытовых фотоаппаратов (та же работа [18]), но нет физически корректных моделей поляризационных фильтров в связи с тем, что они представляют оптически анизотропные объекты сцены.

Как уже упоминалось: поляризационный микроскоп — это конвейер обработки линейно поляризованного света, обрабатывающие элементы которого линзы, а окончательное изображение — это интерференционная картина. Интерференционная картина может возникнуть даже при неполяризованном освещении и с оптически изотропными объектами сцены, например, см. [15].

В данной работе представлена модель линзы *in silico* (Lis), которая, напротив, работает только с линейно поляризованным светом. Ограничение легко снимается, учитывая свойство аддитивности, что неполяризованный или частично поляризованный луч света можно представлять в виде суммы поляризованных лучей с соответствующими интенсивностями.

На текущий момент модель разработана для удовлетворения следующих основных требований:

- Lis может включаться в рендеры (программы расчета изображений), работающие на основе трассировки лучей. При этом модуль может работать как при прямой трассировке, так и при обратной рекурсивной трассировке лучей типа алгоритма Виттеда [6].
- Расчет ведется в спектральном формате, когда все показатели рассчитываются для каждой волны спектра отдельно в оптическом диапазоне электромагнитных волн 380—780 нм.
- Каждый входящий поляризованный луч характеризуется начальными значениями состояния поляризации, фазой и интенсивностью. А также идентификатором источника, генерирующего луч, чтобы при необходимости можно было определить когерентность лучей.
- В процессе обработки Lis может генерировать несколько выходных лучей. Это связано с тем, что луч попавший внутрь линзы в дальнейшем претерпевает множество переотражений, и при каждом из них может появиться выходящий (преломленный) луч.
- Lis позволяет задать предельное число внутренних переотражений, позволяя управлять скоростью расчета и точностью.
- Каждый выходящий луч несет идентификатор источника породившего луча, а также пересчитанные значения состояния поляризации, фазы и интенсивности. Учитываются индексы рефракции и показатели поглощения для конкретного стекла линзы. В целях отладки допускается задавать спектры преломления и поглощения, заданные пользователем. Будем считать, что стекло линзы достаточно хорошего качества, т.е. идеальное в некотором смысле стекло без каких-либо включений и рассеивающих элементов, оптически однородное, бессвиловое, без пузырей и включений, без двойного лучепреломления (т.е. без напряжений) [21], но вполне реальное для поляризационного микроскопа.

- Каждый выходящий луч характеризуется полной линейной поляризацией. Если по данному направлению получились несколько поляризованных лучей, то они не объединяются, а так и выдаются «пучком». Для описания линейной поляризации достаточно всего одного вектора дополнительно к направлению луча, что не накладывает на приложение требований по представлению поляризованного света. Таким образом, приложение, использующее Lis, само решает, как трактовать информацию каждого такого пучка.

Заключение

Для придания большей универсальности применения разработанного модуля Lis спектр его применения расширен — можно задать дополнительные режимы работы: а) в рамках RGB-модели представления света; б) в спектральной модели без учета поляризации. Поскольку разработана наиболее сложная физически корректная модель для расчета отражения и преломления световых лучей с учетом поляризации света, реализацию оказалось нетрудно настроить и на более простые предыдущие модели представления света и цвета — наиболее используемую трехстимульную RGB и спектральную модели.

С одной стороны, модуль разработан так, что приложение, реализующее поляризационный микроскоп, будет последовательностью линз — конвейером, в начале которого источник поляризованного света, а в конце плоскость изображения. Образец минерала помещается внутри конвейера среди линз.

С другой стороны, конструкция модуля такова, что он достаточно просто может быть встроен в рендер, который позволяет расширять набор примитивов — типов объектов сцены. Например, в алгоритме Виттеда при построении дерева трассировки луч, попадая на прозрачную поверхность, образует узел с двумя потомками: ветвь отраженного луча и ветвь преломленного луча. В случае попадания луча на линзу образуется узел дерева с большим числом потомков, чем два.

В настоящее время реализован последовательный вариант с детерминированным поведением. Дальнейшее развитие разработки: а) параллельная реализация; б) более полный учет требований рендеров, рассчитывающих изображения по методу Монте — Карло.

Список литературы

- [1] Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: для ВУЗов, 6-е изд. М.: Физматлит, 2003.
- [2] The ASAP Primer. Breault Research Organization, Inc. Адрес доступа: http://www.breault.com/sites/default/files/knowledge_base/broman0955_primer.pdf (дата обращения 04.05.2017).
- [3] Oslo. Optics Software for Layout and Optimization. User guide [Electronic resource]. — USA: Lambda Research Corporation, 2009. — Адрес доступа: <http://www.phys.uconn.edu/~eyler/phys4150/R/OSLO%20User%20Guide.pdf> (дата обращения 04.05.2017).
- [4] Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы / Под ред. Н. И. Полякова. Л.: Машиностроение, 1969.
- [5] Bloss F. D. Introduction to the Methods of Optical Crystallography. NY: Holt, Rinehart and Winston, 1961.
- [6] Whitted, T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Commun. ACM. 1980. Vol. 23, No. 6. P. 343–349.
- [7] Роджерс, Д. Алгоритмические основы машинной графики. М.: МИР, 1989.
- [8] Refractive index database. Optical constants of SF11, page N-SF11 (SCHOTT). A
- [9] Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 6th ed. Cambridge Univ. Press, 1980.
- [10] Schlick C. An Inexpensive BRDF Model for Physically-Based Rendering // Computer Graphics Forum. 1994. Vol. 13, No. 3. P. 233–246.
- [11] Матвеев А. Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.

- [12] Васильева Л. Ф., Дебелов В. А. Эволюция модели луча света для рендеринга // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4И для задач мониторинга и безопасности (SCVRT1516): Тр. Междунар. конф. Протвино: АНО ИФТИ, 2016. С. 178–184.
- [13] Weidlich A., Wilkie A. A. Realistic Rendering of Birefringency in Uniaxial Crystals // ACM Transactions on Graphics: Proc. of the SIGGRAPH Conference). 2008. Vol. 27 (1). P. 6:1–6:12.
- [14] Debelov V. A., Kozlov D. S. A Local Model of Light Interaction with Transparent Crystalline Media. // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, Vol. 19, No. 8, P. 1274–1287.
- [15] Дебелов В. А. Интерференция света, изотропные прозрачные объекты, трассировка лучей // ГРАФИ-КОН'2015: Тр. Юбилейной 25-й Междунар. конф. Протвино: АНО ИФТИ, 2015. С. 168–173.
- [16] Abdellah M., a.o. Physically-based in silico light sheet microscopy for visualizing fluorescent brain models // BMC Bioinformatics, 2015, Vol. 16, (Suppl. 11): S8.
- [17] Kagalwala F., Kanade T. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2003, Vol. 33, iss. 5. P. 728–737.
- [18] Жданов Д. Д., Потемин И. С., Гарбуль А. А., Соколов В., Валиев И. Методы стохастической трассировки лучей в задачах построения изображений, формируемых реальными оптическими системами // Тр. 26-ой Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению ГРАФИКОН'2016. Протвино: АНО ИФТИ, 2016. С. 29–33.
- [19] Hanika J., Dachsbacher C. Efficient Monte Carlo rendering with realistic lenses. Computer Graphics Forum. 2014, 33 (2): 323–332.
- [20] Cohen, M. F., Wallace, J. R. Radiosity and Realistic Image Synthesis. — Academic Press, New York. 1993.
- [21] Латыев С. М., Егоров Г. В., Митрофанов С. С., Каракулев Ю. А., Тимошук И. Н. Конструирование типовых оптических деталей и сборочных единиц оптических приборов. Адрес доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?tutindex=46&index=5&layer=1 (дата обращения 04.05.2017).

*Виктор Алексеевич Дебелов — д.т.н., вед. науч. сотр. Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: debelov@oartg.sgcc.ru;*

*Константин Григорьевич Кушнер — студент Новосибирского государственного университета;
e-mail: kushner@oartg.sgcc.ru.*

Дата поступления — 31 мая 2017 г.