

# Верификация алгоритмов фотореалистического рендеринга кристаллов

В.А. Дебелов<sup>†</sup>, Д.С. Козлов<sup>\*</sup>

<sup>†</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

<sup>\*</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

{debelov | kozlov}@oapmg.sccc.ru

## Аннотация

В данной работе предлагается подход для верификации алгоритмов фотореалистического рендеринга изотропных и анизотропных кристаллов, аналогичный подходу, с успехом применяемому в вычислительной математике, например, Matrix Market<sup>1</sup>. В области глобальной освещенности таким примером является классический Cornell Box [1]. Подход предполагает наличие некоторого расширяемого множества тестов, основанных на известных законах распространения лучей на границах сред, спецификациях тестовых сцен, фотографиях этих сцен (если это возможно) и изображений тестовых сцен, рассчитанных различными алгоритмами рендеринга.

Отметим, что наличие результатов работы различных алгоритмов (как в Cornell Box<sup>2</sup>) позволяет прикладному программисту выбрать тест наиболее подходящий для его целей.

**Ключевые слова:** Фотореалистический рендеринг, кристаллы, верификация, двойное лучепреломление, поляризация, дисперсия, коническая рефракция, интерференция, тестирование алгоритмов рендеринга.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в трудах конференций по компьютерной графике стали чаще появляться статьи, посвященные фотореалистической визуализации кристаллов, например, [2–6]. Однако, только в одной из них [3] сделана попытка верифицировать физическую корректность рассчитанных изображений. Авторы приводят рассчитанное изображение одноосного прозрачного кристалла в сравнении с соответствующей фотографией кристалла. Приводятся чёрно-белые изображения и выбрана очень специфичная сцена, поскольку представленный в работе алгоритм не позволяет рассчитать изображение кристалла в общем случае. В общем же случае задача верификации алгоритмов фотореалистического рендеринга кристаллов не решена.

Для проверки алгоритмов фотореалистического рендеринга сцен, содержащих только непрозрачные диффузные поверхности, в работе [1] была предложена сцена, известная как Cornell Box, которая с тех пор стала де-факто стандартом для тестирования таких алгоритмов. Позднее были предложены вариации сцены, включающие полупрозрачные объекты, см. [7] и Global Illumination Test Scenes<sup>3</sup>.

Верификация методом сравнения с фотографией часто оказывается очень сложной задачей: необходимо подобрать геометрию и структуру кристалла, ракурс и параметры камеры, геометрию и спектры источников света. Например, тестирование алгоритмов излучательности показало, что при попиксельном сравнении рассчитанных изображений сцены Cornell

Box с фотографией очень сильно проявляются неровности реальных поверхностей, игнорируемые при расчёте изображений сцены, несовпадение геометрий источников и т.д., что приводит к тому, что изображения совпадают не полностью. Это очень сильно затрудняет проведение такого сравнения.

В кристаллах может проявляться ряд оптических эффектов, связанных с поляризацией света, двойное лучепреломление и коническая рефракция, для проверки расчёта корректности которых должны создаваться специфические сцены, например, для верификации расчёта двойного лучепреломления необходимо иметь набор контрастных текстур, а для явления конической рефракции необходимо создавать специфический источник света и очень специфичное расположение кристалла.

Удобно иметь некоторую систему более простых тестов, позволяющих хотя бы частично верифицировать корректность алгоритма, не прибегая к сравнению с фотографией. Это позволит на ранних стадиях разработки и отладки алгоритма проверить правильность решения частных задач. Пример теста: неполяризованный луч падает на границу между вакуумом и изотропным кристаллом под углом Брюстера, рассчитать отраженный и преломленный лучи и их состояние поляризации.

Авторы предлагают инициировать данную работу, начиная с рассмотренной ниже системы тестов и специальных сцен, которые позволяют проверить корректность алгоритмов расчета фотореалистических изображений полупрозрачных изотропных, одноосных и двуосных кристаллов.

## 2. СВЕДЕНИЯ ИЗ КРИСТАЛЛООПТИКИ

Полупрозрачные кристаллы по оптическим свойствам можно разделить на: изотропные, одноосные и двуосные кристаллы [8–10]. Последние два типа кристаллов являются анизотропными средами, в них проявляются эффекты не свойственные изотропным средам. Рассмотрим каждый из эффектов в объёме необходимом для дальнейшего изложения. Более подробное описание можно найти в любой книге по кристаллооптике, например, в [9, 10].

### 2.1 Основные понятия

**1. Световой луч.** Световым лучом называется набор электромагнитных волн, распространяющихся в одном направлении. Каждая из волн может иметь различную плоскость колебаний электрического и магнитного поля и разный сдвиг фаз. Если все волны имеют одну и ту же частоту, то такой луч называется монохроматическим, в противном случае луч называется полихроматическим, и имеет смысл говорить о спектре луча.

**2. Поляризация света.** Луч называется частично поляризованным, если существует преимущественная плоскость колебаний векторов электрического поля. Если такая плоскость единственная, то луч *линейно поляризован* в этой плоскости –

<sup>1</sup> <http://math.nist.gov/MatrixMarket>

<sup>2</sup> <http://www.graphics.cornell.edu/online/box>

<sup>3</sup> <http://www.cs.utah.edu/~bes/papers/scenes>

плоскости поляризации. Различают также круговую и эллиптическую поляризации. Если луч не поляризован, говорят, что он обладает естественной поляризацией.

**3. Оптическая ось.** В анизотропных кристаллах направление распространения фронта волны (направление распространения фазы) в общем случае не совпадает с направлением распространения луча (направлением распространения энергии). При любом заданном направлении распространения фазы в кристалле могут распространяться две волны с различными скоростями, плоскостями поляризации и направлениями распространения лучей. Исключение составляет два направления оптических осей I рода или *бинормалей*, которым соответствует по одному направлению луча. Аналогично, каждому направлению распространения луча соответствует два направления распространения фазы, за исключением двух направлений оптических осей II рода или *бирадиалей* [10]. В одноосных кристаллах оптическая ось является одновременно бинормалью и бирадиалью. В зависимости от наличия и числа оптических осей кристаллы делятся на изотропные (нет оптических осей), одноосные (одна ось) и двуосные (две *бирадиали*, две *бинормали*).

## 2.2 Оптические эффекты в кристаллах

**1. Дисперсия света.** При преломлении на границе сред с разными коэффициентами преломления полихроматический луч расщепляется на набор своих монохроматических составляющих. Дисперсия в изотропных кристаллах широко известна как явление разложения света на спектр.

**2. Двойное лучепреломление.** При преломлении монохроматического луча на границе анизотропных кристаллов образуется два преломлённых луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях. Такое явление называется двойным лучепреломлением. При падении луча на границу между двумя анизотропными кристаллами образуется до двух отражённых и двух преломлённых лучей. В одноосных кристаллах один из лучей называется обыкновенным, а второй – необыкновенным, в двуосных – быстрый и медленный лучи. На рис. 1 приведена фотография кальцита – одноосного кристалла с ярко выраженным двойным лучепреломлением.



Рис. 1. Двойное лучепреломление в кристалле кальцита<sup>4</sup>

**3. Анизотропное поглощение или плеохроизм.** Коэффициент поглощения в анизотропных кристаллах зависит от направления распространения луча и его состояния поляризации, что приводит к наблюдению нескольких выраженных окрасок по различным направлениям наблюдения кристалла. В одноосных кристаллах можно обнаружить две выраженные окраски (дихроизм), а двуосных – три окраски (плеохроизм).

**4. Интерференция света.** Сложение интенсивностей двух или нескольких волн, сопровождающееся чередованием в пространстве максимумов и минимумов интенсивности. Результат интерференции (интерференционная картина) зависит от разности фаз накладывающихся волн.

Примером интерференционных картин являются коноскопические фигуры (рис. 2), получаемые в тонких кристаллических пластинках с помощью петрографического микроскопа.

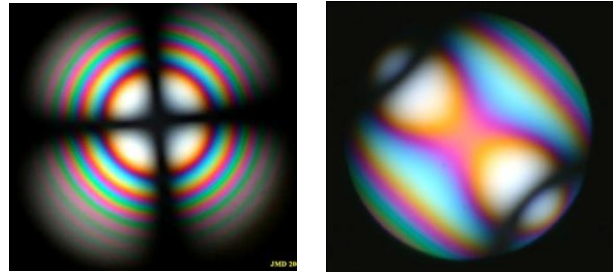


Рис. 2. Примеры коноскопических фигур для одноосного кристалла кальцита (слева) и двуосного кристалла мусковита<sup>5</sup>

**5. Коническая рефракция.** Явление конической рефракции наблюдается только в двуосных кристаллах. При определённых условиях луч света, преломлённый на границе кристалла, порождает полный конус лучей. Различают внешнюю и внутреннюю коническую рефракцию (рис. 3).

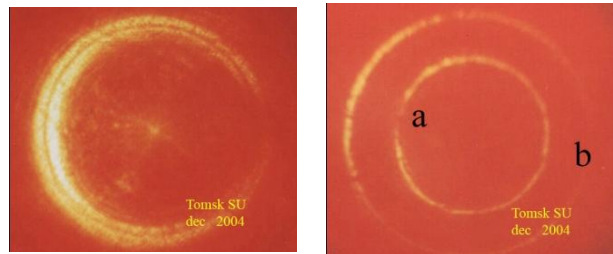


Рис. 3. Фотографии внутренней (слева) и внешней конической рефракции<sup>6</sup>

## 3. ЧИСЛЕННЫЕ ТЕСТЫ

Для расчёта фотореалистических изображений кристалла, как правило, используется трассировка лучей, которая подразумевает наличие локальной модели, т.е. алгоритма расчета взаимодействия луча с границей сред (например, вакуум-кристалл, кристалл-кристалл). Данная глава предназначена для тестирования корректности этой части алгоритма рендеринга.

Здесь мы рассматриваем алгоритм как процедуру, принимающую на вход направление падающего луча, его интенсивность и состояние поляризации, нормаль к плоскости раздела сред и оптические характеристики каждой среды, результатом вычислений которой является набор направлений лучей, их интенсивностей и состояний поляризаций.

Отметим, что хотя и существует несколько математических представлений состояния поляризации луча, например, вектора Стокса и матрицы Мюллера, матрицы когерентности и модификаторы матриц когерентности и т.д., см. [9], предлагаемый набор тестов не зависит от такого представления.

Численные тесты выбраны таким образом, чтобы проверка корректности их расчёта была достаточно простой и не приводила к появлению дополнительных ошибок.

### 3.1 Закон Снеллиуса

При падении луча на границу между двумя **изотропными** средами угол падения равен углу отражения, а преломление описывается законом Снеллиуса: падающий, отражённый и

<sup>4</sup> [http://ru.wikipedia.org/wiki/Двойное\\_лучепреломление](http://ru.wikipedia.org/wiki/Двойное_лучепреломление)

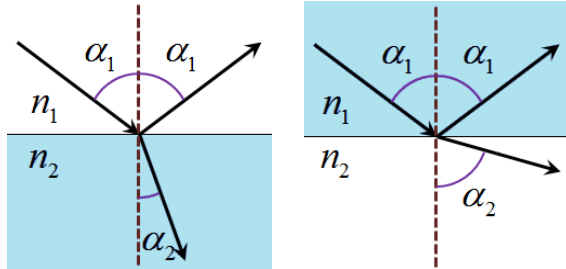
<sup>5</sup> <http://jm-derochette.be/conoscopy.htm>

<sup>6</sup> <http://www.demophys.tsu.ru/Original/Hamilton/Hamilton.html>

преломлённый лучи, а также нормаль к поверхности лежат в одной плоскости – *плоскости падения*, а угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2$  – коэффициенты преломления сред, из которой свет падает на границу раздела и на которую падает свет, а  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы падения и преломления, соответственно (рис. 4).



**Рис. 4.** Преломление и отражение луча света на границе двух изотропных сред: при падении из менее плотной среды в более плотную (слева) и наоборот. Пунктирной линией показана нормаль к границе раздела в точке падения

Отметим, при падении луча из более *плотной* среды (среды с большим коэффициентом преломления) в менее плотную, при больших углах падения преломленный луч может отсутствовать. Это происходит, если

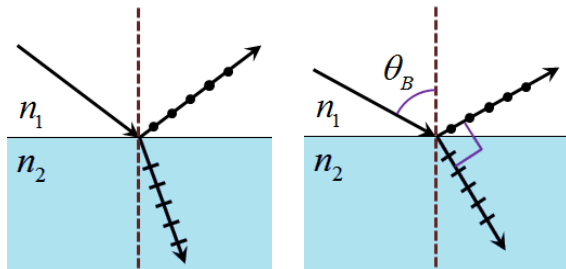
$$\alpha_1 > \arcsin(n_1/n_2), \quad (2)$$

тогда  $\alpha_2$  оказывается комплексным и луч не существует. Это явление называется *полным внутренним отражением*. При этом отражённый луч имеет интенсивность равную интенсивности падающего луча и поляризован эллиптически [10].

Таким образом, в процессе верификации необходимо проверить, что все три луча и нормаль лежат в одной плоскости, угол падения равен углу отражения и выполняется условие (1). При выполнении условия (2) необходимо проверить отсутствие преломлённого луча, равенство интенсивностей падающего и отражённого лучей, а также то, что отражённый луч поляризован эллиптически.

### 3.2 Угол Брюстера

При падении луча на границу раздела двух диэлектрических сред происходит частичная поляризация преломлённого и отражённого лучей, за исключением случая перпендикулярного падения луча.



**Рис. 5.** Частичная поляризация при падении луча на границу сред (слева). Полная поляризация отражённого луча при падении луча под углом Брюстера

Рассмотрим случай падения луча на границу двух **изотропных** сред. Колебания вектора электрического поля в преломлённом луче лежат в плоскости падения (луч поляризован в плоскости падения), а в отражённом – перпендикулярны ей

[11]. На рис. 5 обозначены колебания вектора электрического поля в плоскости рисунка, а точками в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка.

При падении естественно поляризованного луча под углом Брюстера

$$\theta_B = \arctan(n_1/n_2), \quad (3)$$

отражённый луч полностью поляризован, а отражённый и преломлённый лучи образуют прямой угол (рис. 5, справа).

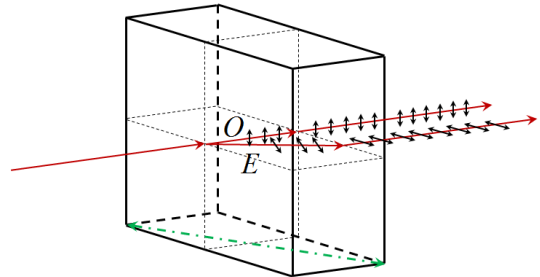
При преломлении и отражении луча *степень поляризации* луча (относительное количество поляризованного света) может только увеличиться, т.е. при падении луча поляризованного в плоскости падения, отражённый луч будет отсутствовать. Если же падающий луч поляризован перпендикулярно плоскости падения, то будет отсутствовать отражённый луч [11]. В обоих случаях интенсивность второго луча равна интенсивности падающего.

Таким образом, верно следующее:

- 1) При падении неполяризованного луча и выполнении условия (3) отражённый луч полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения, а угол между отражённым и преломлённым лучом прямой.
- 2) При падении луча поляризованного в плоскости падения отражённый луч отсутствует, а интенсивность преломлённого луча равна интенсивности падающего.
- 3) При падении луча поляризованного перпендикулярно плоскости падения преломлённый луч отсутствует, а интенсивность отражённого луча равна интенсивности падающего.

### 3.3 Двойное лучепреломление

Для верификации корректности расчета двойного лучепреломления рассмотрим наиболее простой и часто приводимый в учебниках по оптике случай: нормальное падение неполяризованного луча на **одноосный** кристалл из вакуума.



**Рис. 6.** Направление и поляризация отражённых и преломленных лучей при двойном лучепреломлении на границе одноосного кристалла

Для одноосного кристалла определяется два главных коэффициента преломления: для обыкновенного луча  $n_o$  и необыкновенного луча  $n_e$ . Реальный коэффициент преломления необыкновенного луча лежит в интервале между  $n_o$  и  $n_e$  и зависит от угла падения и направления оптической оси.

При преломлении в кристалле образуются два взаимно перпендикулярно линейно поляризованных луча (рис. 6). Луч, поляризованный перпендикулярно *главной плоскости падения* (плоскости, образованной нормалью к границе и направлением оптической оси), называется обыкновенным (обозначен  $O$  на рисунке). Второй луч  $E$ , поляризованный в *главной плоскости падения*, называется необыкновенным. Короткими стрелками обозначены колебания вектора электрического поля. Направление оптической оси обозначено штрих пунктирной стрелкой снизу.

Падающий, обыкновенный и необыкновенный лучи, нормаль к границе раздела и оптическая ось лежат в *главной плоскости падения* [10]. Отражённый и падающий луч противоположны по направлениям.

После выхода из кристалла лучи становятся параллельными падающему лучу, обыкновенный луч поляризован перпендикулярно главной плоскости падения, а необыкновенный – в самой плоскости. Это верно для любого угла падения.

Для любого угла падения для обыкновенного луча выполняется закон Снеллиуса, при этом в качестве коэффициента  $n_2$  необходимо использовать главный коэффициент преломления для обыкновенного луча  $n_o$ .

Таким образом, справедливы следующие утверждения:

- 1) При нормальном падении. Падающий, обыкновенный и необыкновенный лучи, лежат в *главной плоскости падения*. Отражённый и падающий луч противоположны по направлениям. Обыкновенный луч поляризован перпендикулярно главной плоскости падения, а необыкновенный – в плоскости.
- 2) Для любого угла падения. Соотношение углов падения и преломления для обыкновенного луча удовлетворяет уравнению (1). После преломления на второй границе обыкновенный и необыкновенный лучи параллельны падающему, при этом необыкновенный луч поляризован в главной плоскости падения, а обыкновенный – перпендикулярно ей.

## 4. ВИЗУАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

Хотя сравнение с фотографией является в общем случае очень сложной задачей, в некоторых сценах оно оказывается осуществимым. В данной главе мы рассмотрим несколько примеров таких сцен. Этот метод тестирования подходит для всех алгоритмов фотореалистического рендеринга кристаллов. Алгоритм рассматривается как процедура, принимающая на вход геометрию и оптические характеристики объектов и источников сцен, а также параметры и ракурс камеры. Результатом работы является рассчитанное RGB-изображение.

### 4.1 Рендеринг конической рефракции

Для наблюдения внутренней конической рефракции из двуслоного кристалла вырезают кристаллическую пластинку **C** толщиной **d**, перпендикулярной одной из его бинормалей. Вторая бинормаль  $\chi$  при этом отклонена в сторону. Сверху на пластинку накладывается фильтр **F** толщиной **h** с малым отверстием радиуса **R** (рис. 7, слева). Снизу под пластинкой на расстоянии **D** от нижней плоскости кристалла параллельно ей располагается прямоугольный экран **S**.

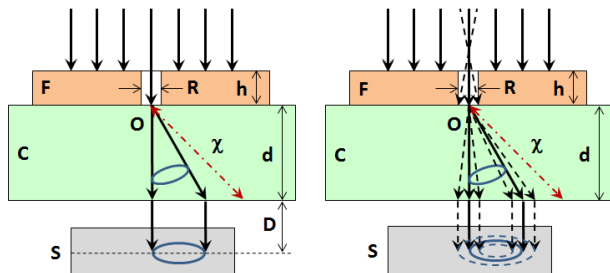


Рис. 7. Идеальная (слева) и реальная схема распространения лучей в случае внутренней конической рефракции

При освещении этой конструкции сверху неполяризованным светом, падающим под прямым углом, через отверстие **O** проходит тонкий пучок света. Пучок, преломляясь на первой границе, образует полый конус преломлённых лучей. После второго преломления конус превращается в полый цилиндр.

На практике через отверстие **O** в экране проходит не только луч перпендикулярный пластинке, но и лучи близкие к нему по направлению (рис. 7, справа). Эти лучи испытывают двойное лучепреломление, а не коническую рефракцию. Расходимость падающего на пластинку пучка определяется отношением **R** к **h**. В результате вместо одного светлого кольца образуется двойное кольцо, с тёмным кольцом внутри (рис. 3). Светлые кольца образуются из-за двойного лучепреломления, а тёмное – конической рефракцией.

Отметим, что если повернуть направление второй оптической оси на некоторый угол (т.е. повернуть пластинку **C**), то двойное кольцо, образованное на экране **S**, также повернётся на этот же угол.

Таким образом, предлагаются следующие тесты:

- 1) Рассчитать изображение реальной сцены, формирующиеся на экране **S**, проверить, что образуется двойное кольцо конической рефракции.
- 2) При повороте второй оптической оси на некоторый угол, двойное кольцо на экране **S** поворачивается на этот же угол.

### 4.2 Рендеринг петрографического шлифа

Петрографический шлиф представляет собой пластинку минерала или горной породы толщиной порядка 30 мкм, наклеенной на стеклянную подложку при помощи канадского бальзама (смола с коэффициентом преломления близким к коэффициенту преломления стекла) (рис. 8, слева). Изучение таких шлифов происходит с помощью петрографического микроскопа.

Если шлиф содержит анизотропные минералы, то при рассмотрении через скрещенные поляризаторы его различные части окрашиваются в зависимости от присутствующего в той или иной части шлифа того или иного минерала. Окраска образуется из-за интерференционных эффектов, возникающих при таком изучении.

Существует два способа изучения шлифа: ортоскопия и коноскопия. В первом случае на шлиф падает параллельный пучок лучей, а во втором сходящийся пучок лучей с фокусом внутри кристаллической пластинки. Подробнее см. [12, 13].

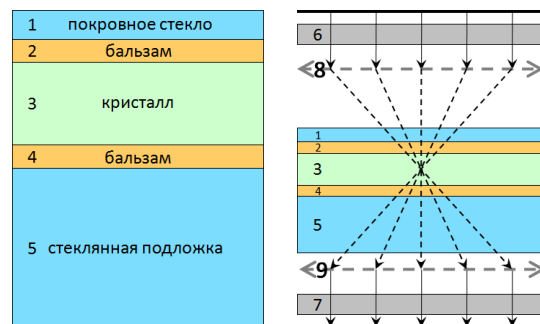


Рис. 8. Структура петрографического шлифа (слева) и схема распространения лучей при изучении шлифа методом коноскопии

На рис. 8 справа приведена **общая** схема распространения лучей в шлифе в случае коноскопии. Неполяризованные лучи испускаются источником света (верхняя жирная линия на рисунке), затем они поляризуются, проходя через поляризатор **6**. Далее лучи фокусируются, проходя через линзу **8**. В шлифе лучи проходят последовательно: покровное стекло **1**, слой канадского бальзама **2**, кристаллическую пластинку **3**, второй слой канадского бальзама **4** и стеклянную подложку **5**. При прохождении верхней границы кристаллической пластинки из-за двойного лучепреломления образуется два луча,

распространяющихся в разных направлениях и с различной скоростью. После преломления на второй границе лучи приобретают исходное направление, но имеют разность фаз, зависящую от толщины пластинки и оптических характеристик минерала в этой части шлифа.

Проходя через линзу 9 лучи вновь становятся параллельными. Затем, проходя через второй поляризатор (анализатор) 7, все лучи обретают одинаковую поляризацию и интерферируют, образуя на экране (нижняя жирная линия) коноскопические изображения (рис. 2).

Отметим, что слои 1, 2, 4 и 5, являясь изотропными, не вносят дополнительной разности фаз и оказывают малое влияние на получаемые коноскопические изображения, таким образом, при расчёте изображения их можно не учитывать.

Предлагаются следующие тесты:

1) Рассчитанные коноскопические изображения, образованные на экране, должны быть визуально похожи на фотографии, получаемые с помощью петрографического микроскопа. Коллекцию таких фотографий и краткое описание параметров их получения можно найти, например, здесь<sup>7</sup>.

2) При повороте оптических осей на некоторый угол коноскопическая картина поворачивается на этот же угол.

### 4.3 Рендеринг трёхмерной сцены

В данной главе мы рассмотрим две связанные сцены: виртуальную сцену, использующуюся для расчета изображения, и соответствующую ей реальную сцену, фотография которой используется для сравнения с рассчитанным изображением, а также метод их сопоставления. Отметим, что предложенный метод сопоставления виртуальной и реальной сцены позволяет это сделать, используя только легкодоступные материалы и оборудование, и не требует наличия спектрометра для измерения спектров источников и спектров отражения материалов в реальной сцене, а также крайне труднодоступных данных о спектральной чувствительности матрицы фотоаппарата и прозрачности используемого объектива.

Проверка корректности рендеринга этой сцены проводится на заключительном этапе тестирования. Критерием правильности расчёта данной сцены, является то, что рассчитанное изображение визуально очень похоже на фотографию.

#### 4.3.1 Виртуальная сцена

Виртуальная сцена – это бокс с односторонними стенками: прозрачными снаружи, но непрозрачными внутри. Стенки являются источниками, излучающими свет внутрь бокса (рис. 9). Излучение каждой точки стенки бокса неполяризованное и равномерно по всем направлениям. Спектр излучения определяется наложенной на стенку бокса текстурой.

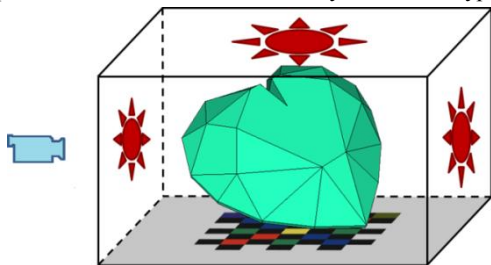


Рис. 9. Схема виртуальной сцены

Использование спектральных текстур не является удобным в процессе сравнения с фотографией, поэтому можно использовать RGB-текстуры (см. ниже).

Для сравнения все источники-стенки за исключением нижнего выключаются, т.е. на них накладывается чёрная неизлучающая текстура. На нижнюю стенку бокса накладывается текстура, показанная на рис. 10 слева. Текстура состоит из разноцветных квадратиков, предназначенных для корректного тестирования абсорбции и дисперсии и серой каймы.

Внутри сцены располагается кристалл (рис. 9). Оптические характеристики, которого соответствуют монокристаллу кальцита. Главные коэффициенты преломления кальцита для каждой частоты волны обычно вычисляются по формуле Селлмейера, коэффициенты для которой могут быть, например, здесь<sup>8</sup>. На правом изображении на рис. 10 пунктирной стрелкой показано направление оптической оси (она соединяет два тупых телесных угла кристалла). Если тестируемый кристалл не обладает естественной огранкой кальцита, то направление оптической оси должно быть предварительно определено каким-либо способом. Геометрия виртуального кристалла совпадает с геометрией реального кристалла.

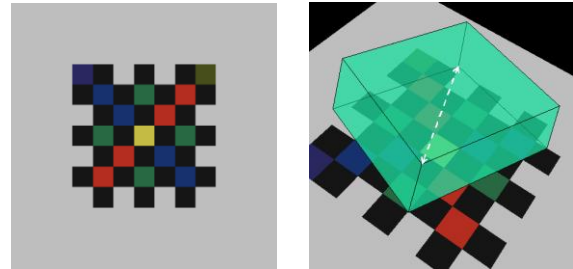


Рис. 10. RGB-текстура, наложенная на нижнюю стенку бокса (слева). Вид сцены из камеры до рендеринга

Нижняя грань кристалла расположена параллельно нижней стенке бокса, на минимальном расстоянии, при котором не возникает ошибок вычисления пересечения луча с нижней гранью кристалла и нижней стенки бокса. Эта величина определяется точностью геометрических вычислений, используемых в алгоритме. Положения реального и виртуального кристаллов совпадают.

#### 4.3.2 Реальная сцена

На рис. 11 приведена схема реальной сцены. Сцена включает в себя три грани бокса, источник света и кристалл кальцита. На нижней грани бокса расположена текстура, напечатанная на листе белой бумаги, белые зоны на схеме на гранях бокса являются чёрными. Они изготовлены из чёрной бумаги и предварительно покрашены чёрной гуашью. Дополнительное чернение позволило существенно понизить альбедо бумаги, которое при скользящем падении света (на вертикальные грани бокса) оказывается достаточно высоким. Размеры выражены в миллиметрах. Ширина каймы текстуры равна ширине трёх цветных клеток.

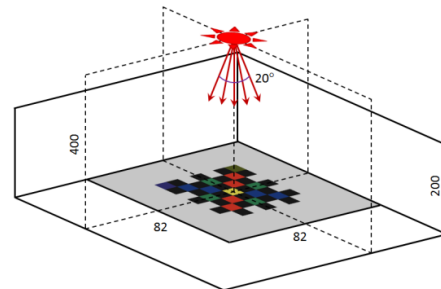


Рис. 11. Схема реальной сцены

<sup>7</sup> <http://jm-derochette.be/conoscopy.htm>

<sup>8</sup> <http://www.redoptronics.com/Calcite-crystal.html>

Источник света выполнен в виде конусообразной лампы с углом расхождения порядка 20 градусов. Он расположен над центром текстуры на высоте около 40 см и светит вертикально вниз (рис. 11).

Кристалл кальцита лежит на нижней грани бокса и выровнен горизонтально относительно клетчатой текстуры в соответствии с положением кристалла в виртуальной сцене.



Рис. 12. Фотография реальной сцены

Камера расположена рядом со сценой и зафиксирована на штативе. Камера направлена на сцену со стороны отсутствующих граней бокса. На рис. 12 приведена фотография сцены и расположения камеры относительно неё.

#### 4.3.3 Сопоставление спектров источников

Источником света в виртуальной сцене является стенка бокса, с наложенной на него RGB-текстурой. В реальной сцене эту роль выполняет направленный источник света расположенный над сценой (рис. 11). Свет от источника проходит через кристалл и падает на бумагу, с распечатанной на ней клетчатой текстурой. Если бумага достаточно матовая, то можно считать, что при падении на неё свет полностью деполаризуется и отражается равномерно во всех направлениях, т.е. выступает **вторичным** источником.

В процессе рендеринга виртуальной сцены RGB-текстура преобразуется в спектральную с помощью обратного преобразования CIE. Такое преобразование не является однозначным, т.е. одинаковым RGB-цветам может соответствовать несколько различных спектров, которые называются метамерами. Спектр излучения реальной текстуры (как вторичного источника) определяется спектром излучения источника, спектром отражения красителя и спектром отражения бумаги.

Другими факторами, влияющими на RGB-цвета сфотографированной реальной текстуры, являются искажение цветов при печати текстуры, а также различные характеристики спектральной чувствительности матрицы фотоаппарата и прозрачности используемого объектива.

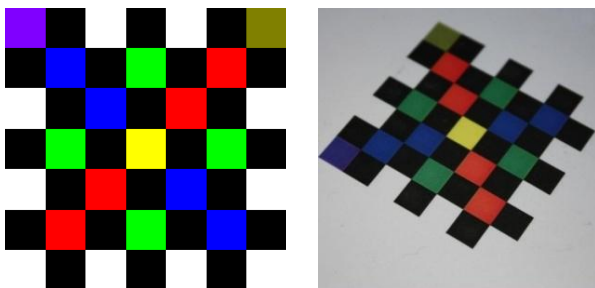


Рис. 13. Текстура, использованная для печати, и сфотографированное изображение отпечатанной текстуры

Все перечисленные факторы приводят к тому, что спектры изучения виртуальной и реальной текстуры не совпадают, и RGB-цвета виртуальной и сфотографированной текстуры различаются (рис. 13).

Для того чтобы частично устранить различия между спектрами излучения виртуальной и реальной текстуры необходимо сфотографировать реальную текстуру в сцене без кристалла, а затем по полученным RGB-цветам на фотографии изменить цвета виртуальной текстуры. Фотографирование необходимо производить с того же ракурса и при тех же настройках съёмки, при которых делается фотография сцены для сравнения. Для устранения шумов на фотографии и усреднения цвета внутри каждой клетки необходимо немного расфокусировать изображение перед съёмкой. В результате такой коррекции RGB-цвета непокрытой кристаллом части текстуры на рассчитанном изображении и фотографии будут практически идентичны (рис. 17, ниже).

Отметим, что фотографирование должно производиться при отсутствии других внешних источников освещения, т.к. реальная сцена содержит только три стенки бокса из шести.

#### 4.3.4 Параметры съёмки и расчёта изображения

При расчёте изображения виртуальной сцены в качестве камеры используется камера-обскура (рис. 14, слева). Характеристики камеры-обскуры определяются шириной  $sw$ , высотой  $sh$  и длиной  $zn$ , а также диаметром входного отверстия  $R$ . Разрешение изображения определяется размером матрицы  $M \times N$ , расположенной на задней стенке бокса. Отношение  $M$  к  $N$  равно отношению  $sw$  к  $sh$ . Диаметр  $R$  равен нулю для алгоритмов, основанных на обратной лучевой трассировке, и ненулевой для алгоритмов, основанных на прямой лучевой трассировке. Фокусное расстояние такой камеры равно  $zn$ , а диафрагменное число  $D$  равно  $zn / R$ .

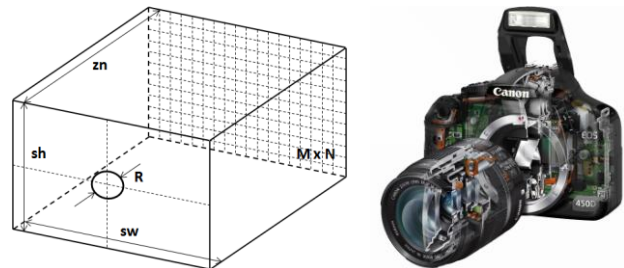


Рис. 14. Схема виртуальной сцены (слева) и устройство реальной камеры

В качестве реальной камеры наиболее удобно использовать зеркальную цифровую фотокамеру, т.к. она позволяет выставить все настройки съёмки вручную. Справа на рис. 14 видно, что устройство реальной фотокамеры намного сложнее, в частности, она содержит сложную систему линз, предназначенную, однако, для того убрать различные aberrации. При съёмке необходимо выставить диафрагменное число равное  $D$  и фокусное расстояние  $zn$ .

Камера фиксируется на штативе. Чувствительность камеры выставляется минимальной для исключения возникновения шумов на изображении. Если  $R$  виртуальной камеры равно нулю, то на реальной камере необходимо максимально уменьшить размер диафрагмы, т.е. выставить максимально возможно диафрагменное число.

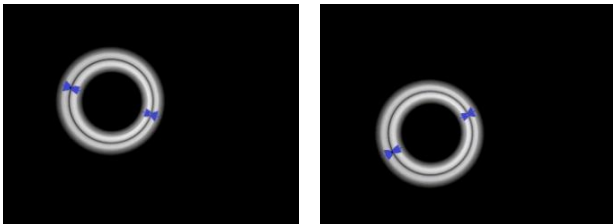
Так как спектр, используемого источника света может быть нестандартным, необходимо откалибровать баланс белого по расфокусированной фотографии белого листа бумаги без отпечатанной на нём текстуры, в свете этого источника света.

Для совмещения ракурсов виртуальной и реальной камер удобнее подбирать ракурс реальной камеры, т.к. фотографирование происходит существенно быстрее расчёта изображения. Контроль правильности совмещения ракурсов съёмки осуществляется визуально. Для удобства контроля можно, если это позволяет камера, отображать на экране монитора изображение с камеры в режиме реального времени. Ракурсы совмещаются достаточно легко, если ориентироваться на положение не лежащих на бумаге вершин кристалла относительно чёрных граней бокса в плоскости фотографии.

## 5. АПРОБАЦИЯ ПОДХОДА

Предложенный метод верификации алгоритмов фотореалистического рендеринга кристаллов был опробован на авторском алгоритме. На первом этапе алгоритм был отлажен на системе элементарных тестов. Процесс такой «специализированной» отладки позволил выявить и устранить множество ошибок, а также ускорил отладку алгоритма в процессе разработки по сравнению с «обычной» отладкой.

Вторым этапом проверки корректности работы алгоритма стал рендеринг тестовых сцен и визуальное сравнение результатов рендеринга с тестовыми фотографиями. Результаты сравнения приведены ниже.

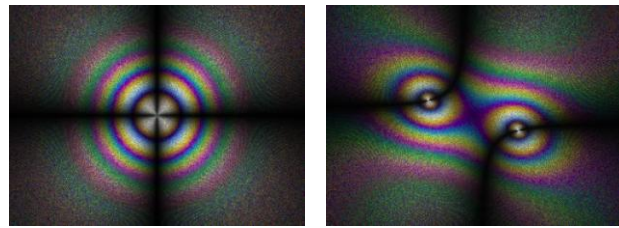


**Рис. 15.** Рассчитанные изображения внутренней конической рефракции при различных положениях второй бинормали

На рис. 15 приведены рассчитанные изображения внутренней конической рефракции. На изображениях отчётливо видны светлые кольца, образованные двойным преломлением, и тёмные кольца, образованные конической рефракцией. Неперпендикулярная к поверхности бинормаль двусного кристалла в одной сцене повернута относительно перпендикулярной бинормали в другой сцене на 30 градусов. В результате двойные кольца на изображениях, также повернуты на 30 градусов относительно друг друга и центров изображений.

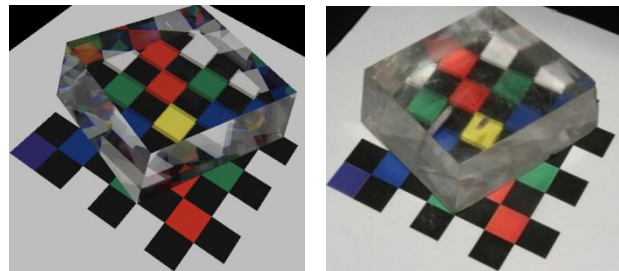
На рисунках на кольцах отмечены диаметрально противоположные места, где изображение рассчитано некорректно, а именно, те места, где сумма интенсивностей двух порождённых лучей больше интенсивности падающего. Мы проанализировали возникшую ошибку и пришли к выводу, что её причиной является почти вертикальное падение луча на поверхность кристаллической пластинки (рис. 7, справа). В результате направления лучей вычисляются верно, а при вычислении их интенсивностей и состояний поляризации возникают ошибки точности вычислений.

Таким образом, авторам и потребителям алгоритмов фотореалистического рендеринга двусных кристаллов следует проверять и корректность расчёта этого случая. Это также говорит о том, что зачастую классические формулы не работают корректно в некоторых особых случаях, а значит, авторы алгоритмов должны находить такие случаи и по возможности устранять или хотя бы документировать их.



**Рис. 16.** Рассчитанные коноскопические изображения одноосного кристалла (слева) и двусного кристалла

На рис. 16 приведены рассчитанные коноскопические изображения для одноосного кристалла (кальцит) и двусного кристалла (гипотетический кристалл с главными коэффициентами преломления: 1.3, 1.4, 1.5). Толщина шлифа – 60 мкм. Изображения очень похожи на фотографии на рис. 2.



**Рис. 17.** Сравнение рассчитанного изображения кристалла кальцита (слева) с фотографией (справа)

На рис. 17 приведено рассчитанное изображение вышеописанной виртуальной трёхмерной сцены и фотография реальной сцены. Для рассчитанного изображения: оригинальное разрешение 480 на 435, глубина трассировки – 15, число сэмплов в спектре – 21, время расчёта 14.5 часов на 8 ядрах Intel Xeon X7350 2.93 ГГц. Для расчёта использовался алгоритм, основанный на **обратной** лучевой трассировке, т.е.  $R$  равно 0. Для фотографии: фотоаппарат – Canon 450D, объектив – EF-S18-55 мм F:3.5-5.6 IS, чувствительность – ISO100, выдержка – 1/25 секунды, диафрагменное число – 32 (максимально возможное для этого объектива при выбранном фокусном расстоянии), режим ручной фокусировки, ручной баланс белого. Отчётливо видно совпадение удвоенной текстуры видимое, через верхнюю грань: совпадает направление и степень двойного изображения, а также совпадает изображение текстуры непокрытой кристаллом.

К сожалению, части изображения, соответствующие боковым граням кристалла, не совпадают. Возможными, причинами этого являются:

- 1) Реальный кристалл является не монокристаллом, а сростком из трёх кристаллов, хотя их направления оптических осей достаточно близки. При этом на гранях срастания происходят дополнительные преломления, не учитываемые при расчёте изображения виртуальной сцены.
- 2) Хотя при фотографировании выбран минимальный размер диафрагмы, он всё же отличается от нуля, а следовательно, фотография имеет конечную глубину резкости. При многократном отражении света внутри кристалла эта глубина достигается и мозаичное цветное изображение, видимое через боковые стенки на рассчитанном изображении, сливается в равномерный серый цвет на фотографии.
- 3) Небольшое отличие ракурсов камер.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен метод верификации алгоритмов фотореалистического рендеринга кристаллов. Метод основан на проверке ряда численных и визуальных тестов. Система тестов была апробирована на алгоритме, разработанном авторами. Проверка тестов помогла выявить ряд существенных ошибок и частично исправить их.

Данная система тестов не претендует на окончательную завершенность. Этой работой мы хотели бы инициировать коллективное наполнение сайта, в котором участвовали бы разработчики аналогичных алгоритмов и программ, а также другие исследователи, которые могли бы представить дополнительные тесты. Очевидно, что очень важны тесты, результаты которых можно вывести теоретически, но исключительную ценность имеют спецификации сцен, особенно при наличии фотографий. Несомненно, что детальное описание отдельного теста вполне по силам одному коллективу, как в Cornell Box, однако, хотелось бы иметь более мощный набор, как это сделано для задач вычислительной математики. Начальный вид сайта можно посмотреть по адресу<sup>9</sup>.

На сайте для всех визуальных тестов даны конфигурационные файлы (и описание их формата), содержащие все оптические и геометрические характеристики приведенных сцен, все параметры необходимые для их расчёта и рассчитанные изображения сцен, а также соответствующие им фотографии, если они приводятся в тексте. Таким образом, авторы алгоритмов смогут полностью воспроизвести сцены, приводимые в статье, и сравнить изображения, размещённые на сайте, с изображениями, рассчитанными с помощью их алгоритмов, и фотографиями.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 09-07-00237а.

## 8. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Greenberg D. et al. *Modelling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces* // *Computer Graphics*, 1984 - Volume 18, Number, p. 213-222.
- [2] Guy S., Soler C. *Fast and Physically-Based Rendering of Gemstones*. // *Comp. Graphics (SIGGRAPH '03 Proceedings)*, ACM Press.
- [3] Weidlich A., Wilkie A. *Realistic Rendering of Birefringency in Uniaxial Crystals* // *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 1, – 2008, pp. 6:1-6:12.
- [4] Tannenbaum D.C., Tannenbaum P., Wozny M.J. *Polarization and birefringency considerations in rendering*. // *Comp. Graphics (SIGGRAPH '94 Proceedings)*, ACM Press, 221-222.
- [5] McClain S. C., Chipman R.A. *Polarization ray tracing in anisotropic optically active media II, theory and physics* // *Applied Optics*, vol. 10, no. 11, pp. 2383-2393 (Nov. 1993).
- [6] Wang Y. et al. *Complex ray tracing in biaxial anisotropic absorbing media*. // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* vol. 10(7), p. 075009 (7pp).
- [7] Farnsworth M., Erbacher R. F. *Global Illumination: Efficient Renderer Design and Architecture* // *Proceedings of the International Conference on Geometric Modeling, Visualization & Graphics 2005*, pp. 1691-1695.
- [8] Дебелов В.А., Саттаров М.А. *Модели и алгоритмы для фотореалистической визуализации сцен с кристаллами*. // *Тр. 15-й международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон-2005*, – Новосибирск, 2005. С. 348-354.
- [9] Борн М., Вольф Э. *Основы Оптики*. Москва, “Наука”, 1973.
- [10] Фёдоров Ф.И., Филиппов В.В. *Отражение и преломление света прозрачными кристаллами*. Минск, “Наука и техника”, 1976.
- [11] Шубников М.В. *Оптическая кристаллография*. М.: Изд. АН СССР –1950. – 274 с.
- [12] Дебелов В.А., Рубцова А.Ю., Смирнов С.З. *Компьютерная модель петрографического микроскопа* // *Труды XVI международн. конфер. по компьютерной графике и ее приложениям ГрафиКон-2006 – 2006*. – С. 293–297.
- [13] Козлов Д.С. *Алгоритм рендеринга по методу Монте-Карло петрографических шлифов одноосных кристаллов* // *Труды XIX Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон-2009*, – М., 2009, – С. 368-371.

## Об авторах

Виктор Алексеевич Дебелов – ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, профессор кафедры компьютерных систем факультета информационных технологий НГУ.

E-mail: [debelov@oapmg.sccc.ru](mailto:debelov@oapmg.sccc.ru).

Дмитрий Сергеевич Козлов – аспирант Новосибирского государственного университета.

E-mail: [kozlov@oapmg.sccc.ru](mailto:kozlov@oapmg.sccc.ru).

## Verification of algorithms of photorealistic rendering of crystals

In this paper, an approach of verification of algorithms of photorealistic rendering of isotropic and anisotropic crystals is suggested, which is similar to approach successfully used in computational mathematics, e.g. site Matrix Market. A classical example for global illumination area is Cornell Box project [1]. The paper exposes an extensible set of tests based on well-known laws of light rays propagation at interfaces between media, specifications of test scenes, photos of the scenes (if it is possible), and images of the scenes calculated by various rendering algorithms.

Note that availability of results of work of various algorithms (such as in the case of Cornell Box) allows an application programmer to select one which is the most suitable for his purposes.

**Keywords:** *Photorealistic rendering, crystals, verification, birefringence, polarization, optical dispersion, conical refraction, interference, rendering algorithm testing.*

## About the authors

Victor A. Debelov holds a position of leading researcher at Computer Graphics Lab. of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, prof. of Novosibirsk State University. His contact email is [debelov@oapmg.sccc.ru](mailto:debelov@oapmg.sccc.ru).

Dmitry S. Kozlov is a Ph.D. student of the Novosibirsk State University. His contact email is [kozlov@oapmg.sccc.ru](mailto:kozlov@oapmg.sccc.ru).

<sup>9</sup> [http://oapmg.sccc.ru/crystal\\_tests](http://oapmg.sccc.ru/crystal_tests)