

Проблемы реалистической визуализации кристаллов

Виктор Дебелов, Максим Саттаров
Институт вычислительной математики и математической
геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
debelov@oapmg.sccc.ru, sattarov@dataeast.ru

Аннотация

Предлагаемая работа посвящена реалистической визуализации кристаллов и может быть отнесена к категории Case Study. Изложение построено по следующему плану:

- Актуальность.
- Геометрия идеальных кристаллов (группы симметрии, индексы Миллера).
- Оптические свойства кристаллов (анизотропность, двойное лучепреломление, взаимодействие со спектром, дисперсия индикатрис).
- Цвет и спектр.
- Схема лучевой трассировки, адаптированная для кристаллов.
- **Keywords:** Crystal, Birefringence, Dispersion, Dichroism, Photorealistic rendering, Recursive ray tracing.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время число исследований и разработок по реалистической (точнее, physically-based – физически корректной) визуализации (рендеринга) пространственных сцен возрастает по нескольким причинам: а) быстрый рост производительности и памяти персональных ЭВМ; б) требования систем виртуальной реальности; в) достижения в области машинного зрения и т.д. Такие алгоритмы, как обратная рекурсивная лучевая трассировка [1], излучательность [2], Монте-Карло трассировка [3], основаны на определенных допущениях и упрощениях в используемых в них математических моделях взаимодействия света с объектами сцены. Исследования и разработки идут в различных направлениях: а) уточнения математических моделей, например, уточняется модель отражения света от кожного покрова живого человека; б) модификации реализаций алгоритмов рендеринга и т.п.

Работа по визуализации кристаллов проводится в рамках проекта по созданию интерактивной системы обучения КРИСТАЛЛ (WEB-справочник по минералогии [4, 5]). При визуализации кристаллов на основе алгоритма лучевой трассировки авторы заметили, что изображение ряда кристаллов, например, исландского шпата, сильно отличается от его фотографии, показанной на рис. 1. В данной работе рассматриваются проблемы, с которыми приходится сталкиваться в случае реалистической визуализации сцен,

2. АКТУАЛЬНОСТЬ

Мы давно свыклились с тем, что геометрическое моделирование осуществляется при помощи ЭВМ, конструирование самолетов и кораблей, перепланировка

квартир, планировка дачных участков, даже подбор прически. Все это осуществляется на основе визуальной обратной связи для оценки дизайна формы и, возможно, прочностных и прочих расчетов, где это необходимо. В то же время у дизайнеров различного профиля возрастает потребность в визуальной оценке светового решения синтезированной геометрической модели. Например, работы по корректной визуализации одежды и оценке покраски автомобиля [6, 7]. А вот здесь мы сталкиваемся с первой проблемой – все широко известные продукты из разряда реалистических рендеров (например, FinalRender, POV-Ray, RenderMan и рендеры, реализующие алгоритмы излучательности или трассировку Монте-Карло), базируются на достаточно упрощенной модели взаимодействия света с объектами. Как правило, эта модель содержит допущения, описанные Ханраханом во вводной главе к книге [2], где он говорит: "Поляризация падающего излучения является важным параметром, влияющим на отражение света от поверхности, но в дальнейшем изложение будет упрощено за счет игнорирования поляризации. ... Для достижения наших целей вполне достаточно остановиться на геометрической оптике". Что касается нашего исследования по визуализации кристаллов и, конечно, сцен с кристаллами, то надо отметить, что здесь учет поляризации светового излучения играет важную роль для реализации физически корректного рендеринга.

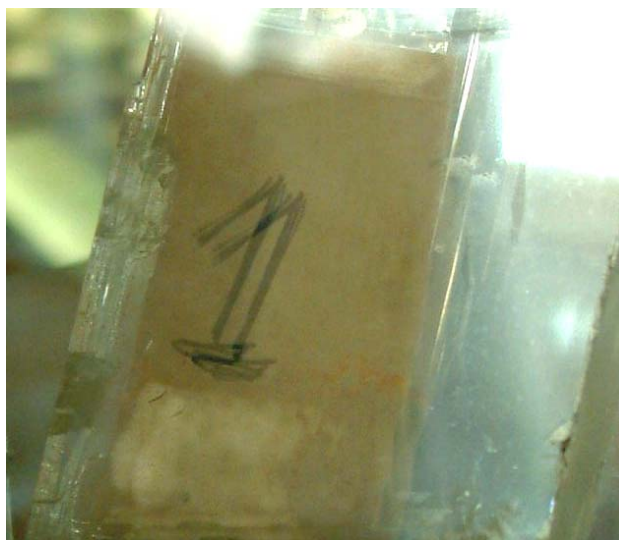


Рис. 1: Цифра "1", сфотографированная через исландский шпат (музей ОИГГиМ СО РАН)

Еще одна проблема – это принятая достаточно широко в компьютерной графике трехкомпонентная модель света – RGB. А кристаллы, как правило, раскладывают падающий свет по спектру. Поэтому дизайнер ювелирных изделий, использующий 3DS max®, не сможет показать заказчику, как

будет играть светом/цветом создаваемый на компьютере бриллиант. Имеются работы, в которых производится количественная оценка игры света в бриллианте (см., например, [8]), однако в них не делается предложений по фотореалистической визуализации кристаллов.

Конечно, о том, что можно производить трассировку лучей Уиттеда [1] по отдельным полосам спектра говорится в любом учебнике по компьютерной графике (например, [9, 10]), значит настала пора широко внедрять это в практику. В алгоритмах излучательности и трассировщиках, построенных на основе метода Монте-Карло, применяются алгоритмы, основанные на методах теории переноса нейтронов, т.е. и эти алгоритмы требуют уточнения, поскольку, как правило, почти механически подменяется *нейтрон* на *фотон*.

3. ГЕОМЕТРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В данной части доклада обсуждается геометрия идеальных кристаллов, т.е. та форма, которую принимает кристалл данного минерала при выращивании его в симметричной среде без ограничений. Эта форма является характерной для данного минерала.

Можно считать, что идеальным кристаллом является любой выпуклый полиэдр, его грани удовлетворяют определенным условиям симметрии, которые будут рассмотрены ниже.

Важнейшей характеристикой минерала является его группа симметрии [11], которая задает вид симметрии граней кристаллов данного минерала. Группа симметрии представляет собой группу преобразований симметрии, каждое из которых переводит нормаль к одной из граней кристалла в нормаль к другой грани.

Например, кристалл серы, представленный на рис. 2, имеет группу симметрии *mmm* (это термин – три плоскости симметрии).

Всего существует 32 различные группы симметрии кристаллов.

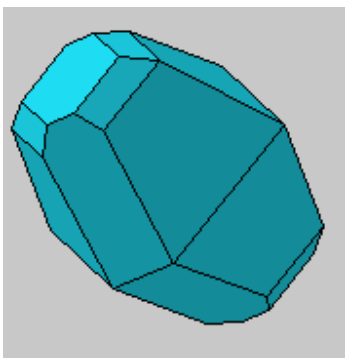


Рис. 2: Кристалл серы

Группа симметрии разбивает все грани кристалла на классы эквивалентности, внутри которых нормаль к каждой грани можно получить из нормали к одной из граней, применяя различные преобразования симметрии из группы симметрии. Эти классы эквивалентности называют *простыми* формами кристалла.

Обычно в кристаллографической практике грань кристалла определяется ее индексом Миллера [11]. Индексом Миллера называется четверка чисел $\{h, k, l, n\}$, где $\{h, k, l\}$ –

нормаль к грани, а n – евклидово расстояние от грани до центра кристалла. Часто индекс Миллера задается в специальной косоугольной кристаллографической системе координат [5]. Кристаллографическая система координат определяется формой элементарной ячейки кристалла – ячейкой кристаллической решетки, состоящей из нескольких атомов, см. рис. 3. Именно форма и состав (атомы конкретных химических элементов) элементарной ячейки определяют оптические и геометрические свойства идеального кристалла.

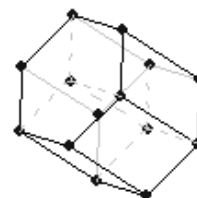


Рис. 3: Пример элементарной ячейки

Ясно, что для того, чтобы задать простую форму кристалла, достаточно знать группу симметрии кристалла, и один из индексов Миллера этой простой формы (один из элементов класса эквивалентности). Индексы Миллера остальных граней простой формы получаются “размножением” одного индекса Миллера, т.е. действием на него по очереди всех преобразований из группы симметрии кристалла.

Традиционным для кристаллографии является следующее представление геометрии идеального кристалла:

[группа симметрии]

[индекс Миллера простой формы №1]

...

[индекс Миллера простой формы №N]

Таким образом, алгоритм получения традиционного представления полиэдра в виде набора полигональных граней выглядит следующим образом:

1. “Размножаем” индексы Миллера, действуя на каждый из них каждым из преобразований группы симметрии кристалла, и получаем таким образом набор нормалей граней, для каждой из которых известно также расстояние до центра кристалла.
2. С помощью алгоритма пересечения полупространств [5, 12] получаем полигональное представление кристалла как объекта сцены.

4. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Прежде всего, заметим, что, несмотря на множество особенностей, отличающих кристаллы от других (полу-)прозрачных сред, *свет в кристаллах распространяется прямолинейно и с постоянной для данной длины волны и поляризации скоростью*.

Одним из главных оптических свойств кристаллических тел и, в частности, идеальных кристаллов, является то, что взаимодействие световой волны с кристаллом зависит от направления света. Кристаллы, по способу взаимодействия со светом, делятся на: изотропные и анизотропные. Первые

пропускают свет по обычным законам преломления, а вот оптическим свойствам вторых посвящен данный раздел. Примером анизотропного кристалла может служить кристалл кальцита (исландского шпата) – см. рис. 1.

Оптической анизотропией кристаллов обусловлено такое интересное явление, как двойное лучепреломление (*birefringence*) [13]. Если не вдаваться глубоко в физику, то суть этого явления в следующем. Луч, входящий в кристаллическую среду, в общем случае разделяется на два луча, преломляющихся под разными углами. Один из них в кристаллооптике называется *обычным*, другой – *необычным*. Необычность заключается, в том, что даже если луч света входит в кристалл под прямым углом (в обычной изотропной среде преломления в этом случае не может быть), этот необычный луч, тем не менее, отклоняется от нормали к границе раздела.

Оба выходящих луча – обычный и необычный – полностью *поляризованы*. Если провести плоскость через эти два луча, то оказывается, что обычный луч поляризован в этой плоскости, а необычный – в плоскости, перпендикулярной ей.

Сразу заметим, что двулучепреломление характерно не только для кристаллов, но также и для других сред, например, некоторых жидкостей и стекол, находящихся под действием магнитного поля или других физических воздействий – так называемый эффект Керра [14].

Для изотропных сред преломление луча происходит по известному закону Снеллиуса (или синусов, см. рис. 4) –

$$n_{12} = \frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)}$$

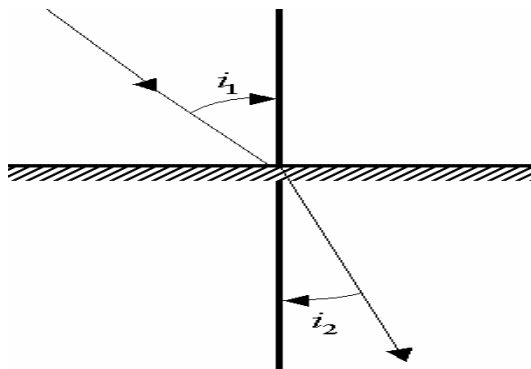


Рис. 4: Закон преломления синусов

Очевидно, что для определения направления необычного луча этот закон неприменим, даже если принять предположение, что для обычного и необычного луча имеются два различных показателя преломления, поскольку закон синусов не допускает преломления луча, падающего на границу раздела сред по нормали. Однако, именно это происходит при двойном лучепреломлении в кристалле кальцита [15], см. рис. 5. Здесь стрелка с штрихами обозначает луч, поляризованный в плоскости чертежа, а стрелка с точками – луч, поляризованный в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа.

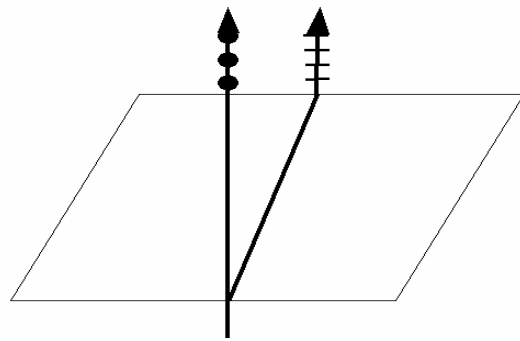


Рис. 5: Два преломленных луча

В случае, если луч света, падающий на поверхность кристалла поляризован, то распределение энергии между выходящим обычным и выходящим необычным лучами зависит от поляризации падающего света. Для того, чтобы понять, почему так происходит, нужно прежде всего сказать, что законы преломления относятся не к лучу, а к фронту волны.

Известно [15], что фронты волн в обычном и необычном лучах в каждый момент времени параллельны. Соответственно, параллельны и нормали к фронтам волн. Таким образом, законы преломления света, примененные к нормальям световых фронтов, выполняются совершенно буквально – никакого изменения направления фронтов волн действительно нет. Изменилось направление луча, т.е. направление, в котором волна распространяет энергию.

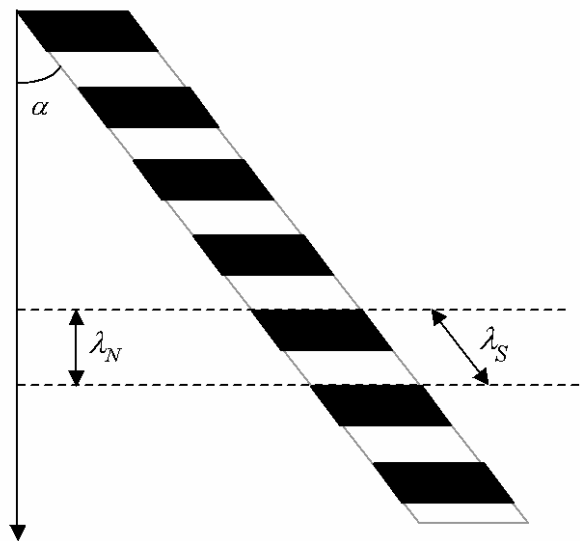


Рис. 6.

Обратимся к рис. 6. Здесь λ_N – это длина волны, измеренная по нормали к фронту волны, а λ_S – длина волны в направлении распространения волны. Скорости света в направлении луча и направлении нормали к фронту волны называются *лучевой* и *нормальной* скоростями соответственно. Будем обозначать лучевую скорость через V_S , а нормальную скорость – через V_N . Поскольку законы преломления относятся к нормальям, а не к лучам, поэтому

под показателем преломления следует понимать величину

$$n = n_N = \frac{c}{v_N} = \frac{\lambda_0}{\lambda_N}, \text{ а не величину } n_S = \frac{c}{v_S} = \frac{\lambda_0}{\lambda_S}.$$

Причина этого различия в том, что скорость света в кристалле различна в различных направлениях.

Для того, чтобы вычислить, какова скорость света в заданном направлении, применяется понятие *оптической индикатрисы* кристалла [15]. Оптическая индикатриса кристалла представляет собой поверхность показателей преломления в различных направлениях, то есть по каждому направлению откладывается отрезок численно равный коэффициенту преломления в данном направлении. Известно, что для любого кристалла оптическая индикатриса представляет собой эллипсоид. Параметры оптической индикатрисы можно выяснить по справочным данным, они известны для кристаллов большинства минералов.

Поверхности лучевых скоростей строятся следующим образом. В каждом направлении откладывается два отрезка, численно равные полуосям эллипсоида в сечении оптической индикатрисы плоскостью, перпендикулярной данному направлению. В случае, когда оптическая индикатриса является сферой, оба эти отрезка совпадают. Такие кристаллы являются изотропными, и преломление лучей в них происходит точно также, как в любой (полу-)прозрачной среде. Примером изотропного кристалла может служить, например, кристалл алмаза.

Если оптическая индикатриса является эллипсоидом вращения, то одна из полуосей эллипса в сечении эллипсоида всегда одна и та же (равна радиусу кругового сечения эллипсоида вращения). Вторая полуось пробегает для различных направлений эллипсоид вращения (отличающийся от оптической индикатрисы). Таким образом, в этом случае поверхность лучевых скоростей является двойной и состоит из эллипсоида и вписанной в него сферы. Сфера соответствует обычным лучам, а эллипсоид – необычным. Такие кристаллы называют *одноосными*. К одноосными кристаллам относится, например, кальцит (рис. 1).

Более сложная поверхность получается в случае, когда оптическая индикатриса является эллипсоидом общего вида. В этом случае **поверхность лучевых скоростей** также является двойной, однако, поверхности, составляющие ее, **не являются** поверхностями второго порядка. В рамках данной работы мы будем рассматривать лишь одноосные и изотропные кристаллы.

Для нахождения путей обычного и необычного лучей применим классическое построение Гюйгенса, модифицированное для двулучепреломления.

Пусть дана поверхность лучевых скоростей. Рассмотрим тонкий луч, падающий на поверхность кристалла (рис. 7). Пунктирной линией обозначен фронт волны. Пусть в момент времени t свет из точки B попадет в точку C на поверхности кристалла. За это время свет из точки A распространится в кристалле до границ, определяемых двойной поверхностью волны. Проведем из точки C две касательные плоскости CS' и CS'' к поверхности волны. Плоскости CS' и CS'' будут представлять собой фронты обычного и необычного лучей соответственно, а прямые AS' и AS'' – направления обычного и необычного лучей.

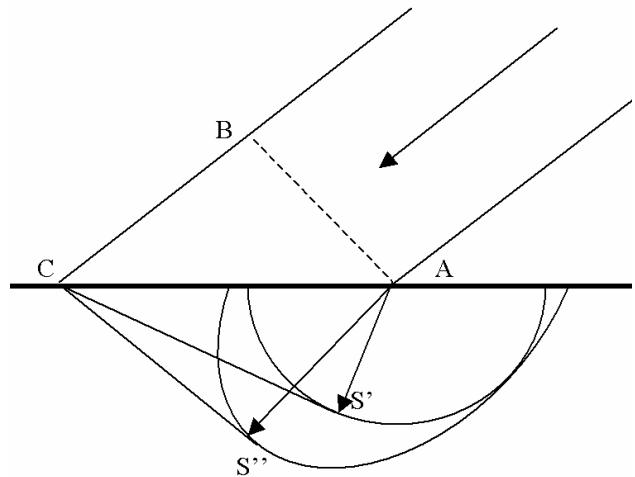


Рис. 7: Построение Гюйгенса

Аналогичное построение может быть проведено и для случая нормального (вертикального) падения луча на кристалл с двойной поверхностью волн (рис. 8).

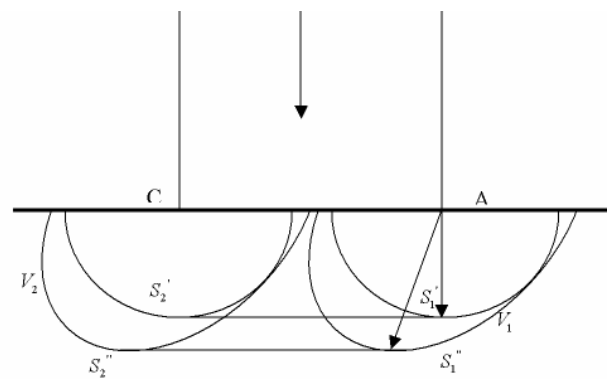


Рис. 8: Случай падения света по нормали

В этом случае через малое время t свет из точек падения луча A и C распространится до пределов, определяемых поверхностями волн V_1 и V_2 . Ясно, что фронты волн будут определяться двумя общими касательными к поверхностям волн V_1 и V_2 – плоскостями $S_1'S_1''$ и $S_2'S_2''$. Мы видим, что, как и говорилось выше, обычный луч не преломляется при нормальном падении, но необычный луч преломляется за счет того, что направление распространения луча AS_1' не перпендикулярно фронту необычного луча $S_2'S_2''$.

Как видно из материала данного раздела, мы встретились с *третьей* проблемой классического алгоритма лучевой трассировки – он неверно обрабатывает сцены с кристаллами в случае двулучепреломления.

Четвертая проблема, которой мы здесь коснулись – это поляризованный выходящий луч.

5. ДИСПЕРСИЯ И ДИХРОИЗМ

Кроме двулучепреломления, которое может быть промоделировано с помощью стандартных алгоритмов визуализации, например, с помощью лучевой трассировки, при визуализации кристаллов мы сталкиваемся и с другими интересными явлениями, например, *дисперсия света* и *дихроизм (двуцветность)* [13, 15]. Как будет показано ниже, эти явления не могут быть с должной точностью визуализированы с помощью стандартных алгоритмов. Дисперсией света в кристалле называют явление, при котором лучи различных длин волн преломляются по-разному (параметры оптической индикатрисы зависят от длины волны). При *нормальной дисперсии* полуоси оптической индикатрисы являются монотонными функциями длины волны. При *аномальной дисперсии* у этой функции возможны участки роста и убывания. На рис. 9 показано изображение бриллианта (фото), освещаемого "обычным" светом, игра света является результатом упомянутой дисперсии. Огранка этого кристалла специально подобрана с целью усиления игры света. Исчерпывающую информацию по бриллиантам – вплоть до реалистической визуализации – можно получить по адресу интернет [17].



Рис. 9: Игра света в бриллианте как результат дисперсии

Дихроизмом называется явление, при котором лучи света, идущие в разных направлениях, по-разному поглощаются средой – кристаллом. Дихроизм наблюдается, например, в кристалле турмалина, который меняет окраску в зависимости от угла падения света на него.

6. ПРИМЕНИМОСТЬ ЦВЕТОВОЙ МОДЕЛИ RGB

Традиционно в компьютерной графике широко и практически повсеместно используется RGB-представление цвета [2, 9, 10]. Для того, чтобы получить цветное изображение, обычно рассчитывают три изображения для каналов R, G и B, которые затем комбинируются на экране в цветную картинку. Для задачи физически корректной визуализации кристаллов такая модель не подходит. Дело в

том, что многие интересные с точки зрения их визуализации эффекты, например, эффект дихроизма [13], теряются. Более того, даже визуализация опыта Ньютона с разложением белого света на спектральные полосы невозможна при использовании RGB модели для визуализации, поскольку этот опыт основан на том, что лучи с разными длинами волн имеют разные показатели преломления, чего нельзя получить в рамках модели RGB.

Ряд экспериментов показывает, что спектральная характеристика света (зависимость энергии от длины волны в световой волне) вовсе не однозначно связана с цветом, который воспринимается человеком. Имеется в виду то, что по цвету, который воспринимает человек невозможно определить спектральную характеристику световой волны [2, 10, 16]. Различным спектральным характеристикам может соответствовать один цвет, воспринимаемый человеком. Это явление заметил еще Ньютон. В своих экспериментах с призмой, раскладывающей белый свет в спектр, он загоразивал одну или несколько полос, а затем результат собирал другой призмой. "Собранный" световой пучок оказывался белым как минимум в двух случаях: когда собирались все семь цветов спектра, и когда смешивались всего два цвета – оранжевый и голубой. Ясно, что результирующие световые волны в этих случаях имели различные спектральные характеристики, однако воспринимались глазом совершенно одинаково [16].

Нужно отметить, что спектральной характеристике световой волны сопоставляется цвет. Далее под *цветом* мы будем понимать представление RGB, которое будет отображаться на экране, а под *спектральной характеристикой* – зависимость энергии от длины волны в световой волне.

Для рендеринга конечного отображения нам понадобится переводить спектральное представление в RGB. Мы будем считать, что для всех объектов в сцене, включая геометрические объекты и источники света, известны их спектральные характеристики. Далее, рассчитав изображение для различных интервалов по длине волны света, мы должны, следуя, например, [10], перевести полученную спектральную характеристику изображения сначала в систему CIE, а затем уже в окончательное RGB-представление.

7. СХЕМА ЛУЧЕВОЙ ТРАССИРОВКИ, АДАПТИРОВАННАЯ ДЛЯ КРИСТАЛЛОВ

Как уже говорилось выше, для кристаллических тел имеются несколько характерных оптических явлений, которые не поддаются визуализации с помощью традиционных методов, например, дисперсия и поляризация света. Так что же, отказать от геометрической оптики?! Нет, предыдущие рассуждения и факты позволяют модифицировать метод лучевой трассировки для визуализации кристаллов.

Прежде всего, рассмотрим упрощенную задачу визуализации кристалла, которая может решаться стандартными алгоритмами лучевой трассировки. Мы будем считать, что в сцене всего один идеальный кристалл. Кроме того, мы не будем рассматривать дисперсию и поляризованный свет. Мы будем считать, что оптические параметры кристалла не зависят от длины волны и поляризации падающего света. В этом случае единственная необходимая модификация алгоритма обратной лучевой трассировки заключается в том, что кроме преломленного и отраженного луча при

визуализации кристалла добавляется еще и необычный луч, направление которого рассчитывается с помощью построения Гюйгенса. Точнее, решается обратная задача – откуда из кристалла придет в данный пиксель *необычный луч*?

На рис. 10-14 представлена серия изображений кристалла исландского шпата, размещенного над текстурой.

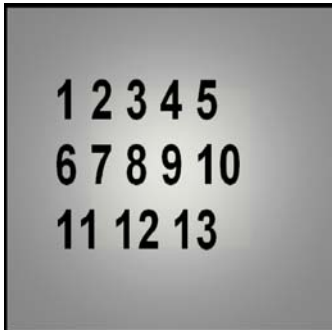


Рис. 10: Изображение кристалла без учета двулучепреломления (обычный закон преломления света в среде)

На рисунке видно, что преломления не происходит, поскольку свет падает на поверхность кристалла нормально



Рис. 11

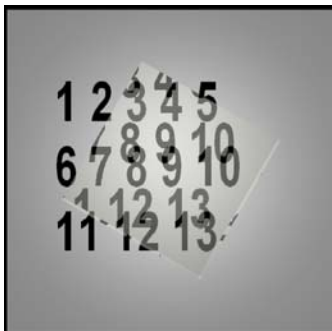


Рис. 12

Рисунки 11-14 получены в результате расчета изображения при различных положениях кристалла кальцита относительно текстуры. Можно заметить, что изображение, даваемое обычным лучом не сдвигается, но изображение, даваемое необычным лучом, вращается. Это происходит за счет того, что эллипсоид оптической индикатрисы поворачивается вместе с кристаллом – он связан с кристаллической решеткой. Таким образом одна из проблем визуализации кристаллов также может быть решена в рамках модели геометрической оптики – просто необходимо в общем случае строить более сложное дерево: для каждого узла дерева

генерируется один отраженный луч и два потенциальных преломленных. Более серьезная проблема возникает в сцене, насыщенной кристаллами, поскольку выходящий свет может быть поляризован. И решение этой задачи требует дальнейшего уточнения алгоритма трассировки. Например, помнить поляризацию луча на случай его падения на другой кристалл.

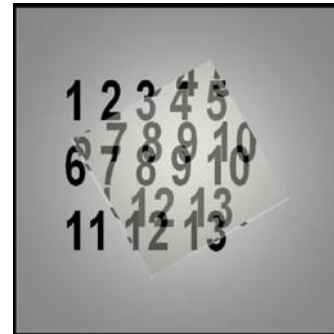


Рис. 13

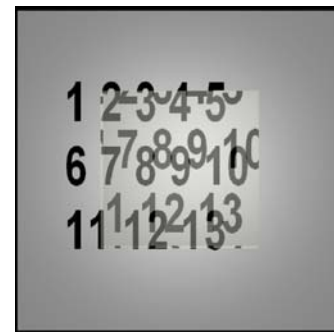


Рис. 14

Все остальные проблемы, касающиеся оптической дисперсии и дихроизма, решаются при помощи классической лучевой трассировки. Для этого, правда, придется отказаться от привычной модели RGB. Вместо этой модели надо использовать спектральное представление цвета, то есть зависимость энергии света от длины волны. Эта зависимость представляется в виде набора значений на некоторой сетке по длинам волн. Таким образом, мы будем рассчитывать уравнение рендеринга не три изображения (R, G и B), а столько, сколько узлов в сетке по длинам волн.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена основным проблемам физической корректной визуализации сцен, содержащих кристаллы. Авторы рассмотрели только случай отдельного *идеального* кристалла и построили модель его взаимодействия со светом. Очевидно, что наличие многих кристаллических объектов в сцене усложняет задачу на порядки. Например, после взаимодействия света с кристаллом свет поляризуется, а в зависимости от поляризации он может и не показывать эффект двулучепреломления.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность С.З. Смирнову за постоянный интерес к работе и поддержку со стороны минералогии.

9. REFERENCES

- [1] Whitted, T. *An Improved Illumination Model for Shaded Display*. *Commun. ACM*. 23, 6 (1980) 343-349.
- [2] Cohen, M.F., Wallace, J.R. *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. – Academic Press, New York (1993).
- [3] Fellner D. W. *Extensible image synthesis. In Object-Oriented and Mixed Programming Paradigms*, Wisskirchen P., (Ed.), *Focus on Computer Graphics*. Springer, 1996, pp. 7–21.
- [4] <http://ggd.nsu.ru/Crystal> – Интерактивная система обучения КРИСТАЛЛ.
- [5] Жмулевская Д.Р., Саттаров М.А., Девятова А.Ю. *Технологические аспекты разработки Web-справочника по кристаллографии* – http://www.ict.nsc.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+9+1178
- [6] Volevich V.L., a.o. *An approach to cloth synthesis and visualization – Proceedings Graphicon'97*, pp. 45-49.
- [7] Ershov S.V., Khodulev A.B., and Kolchin K.V. *Simulation of sparkles in metallic paints – Proceedings Graphicon'99*, pp. 45-49.
- [8] Васильев А.В. *Оптимизация формы ограниченного камня как путь к совершенствованию его красоты – Вестник геммологии № 2 (5) 2002*.
- [9] Роджерс Д. *Алгоритмические основы машинной графики. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989*.
- [10] Foley J. D., van Dam A., Feiner S. K., Hughes J. F., Phillips R. L. *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1994.
- [11] Болдырева Е.В. *Описание кристаллических структур, методическая разработка для занятий по курсу "Химия твердого тела", НГУ, 1993*
- [12] Препарата Ф., Шеймос М. *Вычислительная геометрия: Введение. : Пер с англ. / М.; Мир, 1989*
- [13] <http://dic.academic.ru/misc/enc1p.nsf/ByID/NT00003D02> - двойное лучепреломление
- [14] <http://dic.academic.ru/misc/enc1p.nsf/ByID/NT0000575E> - эффект Керра.
- [15] Шубников А.В. *Оптическая кристаллография. Изд-во АН СССР, Москва 1950 Ленинград*.
- [16] Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. *Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во МГУ, 1989*.
- [17] <http://www.gemology.ru/octonus/russian/index.htm> - об бриллиантах.

Авторы

Дебелов Виктор Алексеевич – ведущий научный сотрудник лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, к.ф.-м.н., с.н.с., доцент Новосибирского государственного университета.

Саттаров Максим Александрович – аспирант ИВМиМГ СО РАН.

Problems of Ray Tracing while Rendering of Crystals

Abstract

In the given report we deliver our Case Study on rendering of crystals and ideas how to improve the conventional light-backwards recursive ray-tracing algorithm.

Let us consider a simple scene, which contains an ideal crystal – a textured plane and a crystal between a plane and a camera. Then we shall try to render it by means of well-known graphical software, e.g., FinalRender, POV-Ray, RenderMan, renderers based on radiosity or Monte Carlo Ray Tracing, in order to obtain a photorealistic image. In figure 1 we present the visual result of rendering.

The figure 2 presents a photo of a real crystal (Island spar). There are two digits "1" instead of one as it was expected. It means that the recursive ray-tracing algorithm has visible limits as a photorealistic renderer, and that we should revise our models of light interactions with scene objects. This phenomenon of crystal optics is called *birefringence*. Authors show the way to modify the recursive ray tracing. The figure 3 is a result of our modification.

The effect of birefringence brings one more problem: we must take into account polarization of light, because when light has been passed through a crystal, it can result in one or two polarized light rays. This depends on polarization of incoming light.

The next phenomenon of crystal optics is so-called *optical dispersion*, which denotes the ability of a crystal to split white color into spectrum because crystals have different refraction coefficients for different wavelengths. Let us imagine that a designer prepares brilliant by request of a customer via for example 3DSMax®. A jeweler expects that a customer would see something like a picture shown in figure 4.

But conventional rendering program produces the gray tiresome image – pure geometry without the play of lights. This question and a way to modify the ray tracing algorithm are discussed in the report also.

Also authors concern the RGB representation of light and surfaces' properties. It seems that the time is coming to calculate light distribution in the scene basing on wavelengths.

Another interesting feature in crystal optics is the phenomenon of *dichroism*. The point is that some crystals, i.e., tourmaline, have different rate of light absorption in different directions. As the results we see different colorings of light when looking at the crystal from different points or directions.

Thus the given report shows several phenomena of natural scenes containing crystals that should be taken into account while modifications or developments of rendering algorithms.

Authors

Laboratory of numerical analysis and computer graphics of Institute of Computational Mathematics and Math. Geophysics of SB RAS (Novosibirsk, Russia):

Victor A. Debelov, PhD, leading researcher, Associate prof. of Novosibirsk State University.

Maxim A. Sattarov, PhD student.