

Модели и алгоритмы для фотореалистической визуализации сцен с кристаллами

В.А. Дебелов, М.А. Саттаров

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия

debelov@oapmg.sgcc.ru, sattarov@datacast.ru

Аннотация

Существующие на данный момент локальные модели освещенности трехмерных поверхностей, используемые в программных продуктах, не учитывают многие специфические оптические свойства, присущие кристаллам, хотя в литературе существуют работы, в которых рассматриваются частные случаи взаимодействия света с кристаллами.

Данная работа посвящена дальнейшему развитию в данном направлении. В результате авторами предложена общая физически обоснованная модель распространения света через кристаллы. Модель учитывает такие оптические эффекты как: двойное лучепреломление, дихроизм, оптическая дисперсия и поляризация. В более ранних работах были описаны лишь одноосные кристаллы, и, кроме того, не уделялось внимания распространению обратных лучей в кристаллах, хотя это является основой многих методов визуализации. Известный принцип обратимости Гельмгольца в общем случае не выполняется в сценах с кристаллами. В данной работе мы рассмотрим и эту проблему. Кроме того, в работе предложено расширение описания 3D сцен необходимое и достаточное для физически корректного рендеринга сцен с кристаллами.

Ключевые слова: Кристалл, фотореалистическая визуализация, поляризация, двулучепреломление, дисперсия, дихроизм.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появляется все больше работ, направленных на разработку алгоритмов, которые позволили бы расширить класс объектов, пригодных для визуализации. Кристаллы, с одной стороны, являются объектами, достаточно трудными для визуализации, а с другой стороны фотореалистическая визуализация кристаллов имеет ряд применений, в частности, в ювелирном дизайне и в научной визуализации в минералогии.

Существует целый ряд работ, посвященных проблеме визуализации сцен с кристаллами [1] и некоторых эффектов кристаллооптики в частности [2, 3, 4]. Однако авторы этих работ либо сосредотачивались на одном из аспектов проблемы, таких как поляризация и двойное лучепреломление [2] или дисперсия [3, 4], либо основывались на упрощенной постановке проблемы [1], позволяющей построить алгоритм, работающий в реальном времени на графическом акселераторе. Полная модель взаимодействия *одноосного* кристалла с лучом света, учитывающая поляризацию и двойное лучепреломление, построена в работе [5, 6], хотя при этом данная работа посвящена проблемам оптики, а не компьютерной графики, и не содержит алгоритмов визуализации.

В данной работе мы сосредоточимся на формулировке общей модели взаимодействия света с кристаллами и одним из алго-

ритмов визуализации, позволяющем использовать эту модель. Отметим, что хотя модель взаимодействия света с кристаллами и является классической в кристаллооптике и достаточно хорошо разработана, ее применение в компьютерной графике наталкивается на ряд проблем, требующих решения. Первая проблема – это построение алгоритмов для нахождения направлений преломленных и отраженных лучей, особенно в случае двуосных кристаллов, а вторая – это встраивание данной модели в существующие алгоритмы визуализации.

Следует заметить, что известные программы визуализации трехмерных сцен не обеспечивают физически корректного рендеринга кристаллов, т.к. даже язык описания сцен не учитывает специфики взаимодействия кристаллических тел со светом.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭФФЕКТОВ КРИСТАЛЛООПТИКИ

Данный раздел посвящен эффектам кристаллооптики, которые не поддаются визуализации обычными алгоритмами компьютерной графики. Это двойное лучепреломление, оптическая (хроматическая) дисперсия, поляризация света и дихроизм (плеохроизм – многоцветие).

2.1 Оптическая дисперсия

Оптической дисперсией называют явление, при котором оптические свойства среды, в частности коэффициенты преломления для изотропных сред и оптические индикатрисы двулучепреломляющих кристаллов, зависят от длины волны.



Рис. 1. Игра света в бриллианте как результат оптической дисперсии (фотография)

За счет этого лучи с разными длинами волн преломляются по-разному на границах таких сред. Ярким примером, демон-

стрирующим явление оптической дисперсии, является игра света в бриллианте (рис. 1).

Первым явление оптической дисперсии обнаружил и объяснил еще Ньютон в своих известных экспериментах с призмой из стекла.

Таким образом, для того, чтобы корректно моделировать и визуализировать явление оптической дисперсии, необходимо, во-первых, чтобы оптические параметры кристалла были заданы как функции длины волны, а во-вторых, чтобы алгоритм визуализации был основан на спектральном представлении цвета. Например, цвет может быть задан как набор значений интенсивности в зависимости от длины волны. Заметим, что большинство современных программных продуктов для визуализации основаны на цветовой модели RGB и не удовлетворяют этому требованию.

2.2 Двойное лучепреломление

Двойным лучепреломлением называют явление, при котором луч света, проходя границу раздела сред, разделяется на два луча (рис. 2).

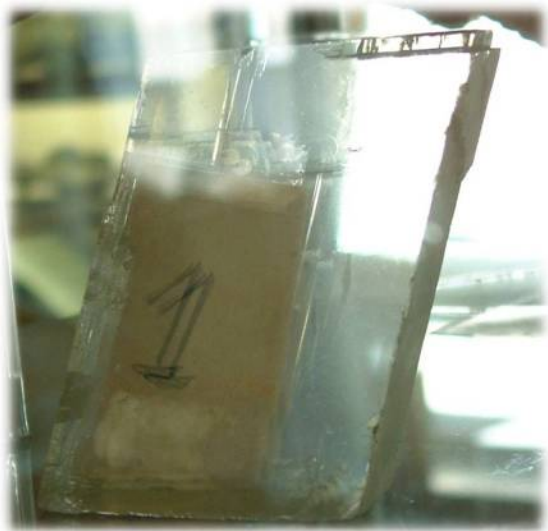


Рис. 2. Двойное лучепреломление в кристалле исландского шпата (кальцита). Изображение цифры “1” снято сквозь кристалл в Центральном сибирском геологическом музее

Двойное лучепреломление в кристаллах обусловлено *анизотропией* их оптических свойств. Скорости света в кристаллах различны в разных направлениях, и, кроме того, двулучепреломляющие кристаллы являются прозрачными лишь для волн с определенной поляризацией. Эти причины обуславливают то, что поверхность световой волны в двулучепреломляющих кристаллах является двойной, т.е. в каждом направлении может распространяться два луча с разными скоростями. *Поверхностью световой волны* в данной точке кристалла называется поверхность, образованная через определенное время положениями фотонов, выпущенных из этой точки во всех возможных направлениях и со всеми возможными направлениями колебаний.

Поверхность световой волны в кристалле может быть построена с использованием *оптической индикатрисы* [7]. Мы не будем вдаваться в физический смысл данного понятия, упомянув лишь, что оптическая индикатриса – это эллипсоид, длины и направления полуосей которого позволяют описать взаимодействие кристалла со светом. Параметры оптической индикатрисы являются справочными данными и для

кристаллов многих минералов могут быть получены из минералогических справочников, см., например, [8].

Существует классификация кристаллов в зависимости от их оптической индикатрисы. Кристаллы, у которых оптическая индикатриса является сферой, называются *изотропными*. В таких кристаллах двойное лучепреломление не наблюдается, и их визуализация не отличается от визуализации объектов из обычного стекла (за исключением специфической геометрии и, вообще говоря, более выраженной оптической дисперсии). Примерами изотропных кристаллов являются кристаллы алмаза. Кристаллы, у которых эллипсоид оптической индикатрисы является эллипсоидом вращения, называются *одноосными*. Одноосные кристаллы являются двулучепреломляющими. Одним из примеров одноосных кристаллов являются кристаллы кальцита (рис. 2). В одноосных кристаллах один из преломленных лучей (*обыкновенный*) подчиняется обычному закону преломления (закону Снеллиуса). Второй же является *необыкновенным*, и он преломляется по иным законам, специфичным для кристаллов. В частности, даже в случае нормального падения на поверхность кристалла, необыкновенный луч будет преломлен, что противоречит закону Снеллиуса. Кристаллы, у которых оптическая индикатриса является эллипсоидом общего вида (все три полуоси различны), называются *двуосными*. Оба преломленных луча в двуосном кристалле – необыкновенные.

Отметим, что в одноосных кристаллах двойная поверхность волны является достаточно простой и всегда состоит эллипсоида и сферы. Задача визуализации двойного лучепреломления в одноосных кристаллах достаточно хорошо исследована и существует ряд работ, посвященных расчету хода лучей в одноосных кристаллах [5, 6] и алгоритмам визуализации двойного лучепреломления в одноосных кристаллах [2]. Двойная поверхность волны в двуосных кристаллах не является поверхностью второго порядка (рис. 3), и для расчета хода лучей приходится использовать приближенные алгоритмы, например, см. [9].

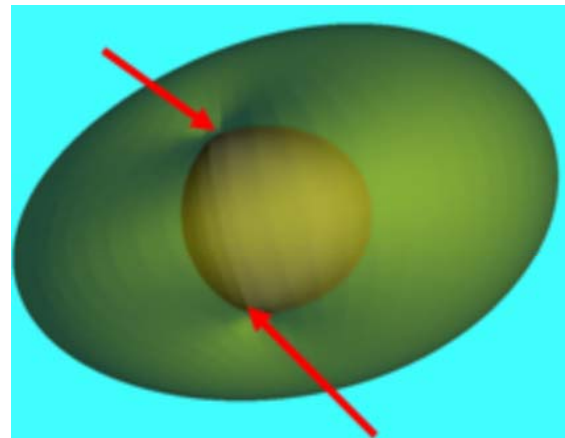


Рис. 3. Двойная поверхность волны в двуосном кристалле. Стрелками показаны точки касания внутренней и внешней поверхности

Важно отметить, что эллипсоид оптической индикатрисы задается в специальной кристаллографической системе координат, привязанной к кристаллической решетке кристалла [7].

Итак, для задания оптических свойств кристалла необходимо в языке описания сцен иметь возможность указывать следующие параметры:

- Тип кристалла (изотропный, одноосный, двуосный).
- Кристаллографическая система координат, привязанная к кристаллической решетке, а значит и к геометрии кристалла.
- Полуоси оптической индикатрисы, заданные как функции длины волны.

2.3 Плеохроизм и дихроизм

Плеохроизмом (многоцветием) называется явление, при котором луч света, проходя через кристалл в разных направлениях, может окрашиваться в разные цвета (разные оттенки). Явление плеохроизма было открыто Кордье в 1809 г. на минерале, который в последствии получил название кордиерита [7]. Известным примером плеохроизма является *дихроизм* (двухцветие) турмалина (рис. 4).



Рис. 4. Плеохроизм в турмалине. Видны два оттенка красного

Плеохроизм обусловлен особенностями поглощения света в кристаллах. В анизотропных кристаллах, в частности, в кристаллах турмалина, коэффициент поглощения зависит от направления поляризации [7].

Если отложить значения коэффициента поглощения во всех возможных направлениях \vec{d} , то получится *поверхность коэффициентов поглощения*. В специально выбранной главной системе координат коэффициент поглощения определяется следующим выражением:

$$k(\vec{d}) = k_1 c_1^2 + k_2 c_2^2 + k_3 c_3^2$$

Здесь c_i – это направляющие косинусы направления в главной системе координат, а k_i – главные коэффициенты поглощения. Главные коэффициенты поглощения являются справочными данными, и для кристаллов известных минералов могут быть найдены в минералогической литературе [10].

Заметим, что в изотропных кристаллах все три главных коэффициента поглощения совпадают, в одноосных кристаллах совпадают два из них, а в двуосных – все три главных коэффициента отражения различны. Из выше сказанного очевидно, что в изотропных кристаллах коэффициент поглощения не зависит от направления.

Главные коэффициенты поглощения и главная система координат зависят от длины волны, так же, как и другие оптические параметры кристалла, обуславливая видимую окраску кристалла.

Плеохроизм наблюдается лишь в анизотропных (двулучепреломляющих) кристаллах. В изотропных кристаллах плеохроизма быть не может, поскольку в таких кристаллах коэффициент поглощения не зависит от поляризации луча.

Таким образом, для описания поглощения света в кристалле, необходимо задать следующие параметры:

- Главная система координат, привязанная к кристаллической решетке. Эта система координат может отличаться от кристаллографической системы координат из п. 2.2.
- Главные коэффициенты поглощения, заданные в виде функций длины волны.

2.4 Поляризация в кристаллооптике

Очень часто явление поляризации света не учитывается в компьютерной графике, хотя оно является достаточно важным даже для рендеринга обычных сцен с зеркальными поверхностями [11]. Для сцен с кристаллами учет поляризации становится критическим, т.к. любой анизотропный кристалл является поляризатором, т.е. каждый луч, вышедший из него является полностью поляризованным. Как известно, скрещенные поляризаторы гасят луч полностью. Кроме того, коэффициенты зеркального отражения от поверхности кристалла (коэффициенты Френеля) зависят от поляризации падающего света. Поэтому при наличии нескольких двулучепреломляющих кристаллов в сцене учет поляризации в алгоритме расчета фотореалистического изображения становится особо важным для получения физически корректного изображения.

В качестве представления состояния поляризации луча часто используются матрицы когерентности [11]:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \langle \tilde{E}_x \tilde{E}_x^* \rangle & \langle \tilde{E}_x \tilde{E}_y^* \rangle \\ \langle \tilde{E}_y \tilde{E}_x^* \rangle & \langle \tilde{E}_y \tilde{E}_y^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix}$$

$\langle \square \rangle$ обозначает операцию взятия комплексного сопряженного, а $\langle \square \rangle$ – математическое ожидание. Величины внедиагональных элементов матрицы когерентности показывают степень зависимости между компонентами электрического поля E_x и E_y , т.е. чем больше величины внедиагональных элементов, тем больше степень поляризации луча. Сумма диагональных элементов равна полной интенсивности данного луча [11]. Матрица когерентности пересчитывается после каждого взаимодействия с поверхностями и кристаллами. Формулы преобразования матриц когерентности можно найти, например, в [2].

Для корректного учета поляризационных эффектов в сценах с кристаллами, каждый луч света должен нести информацию о своей поляризации, т.е. матрицу когерентности. Матрица когерентности задается в некоторой локальной системе координат, связанной с лучом, и информация об этой системе координат также должна быть связана с каждым лучом.

С учетом выше сказанного нами предлагается следующий алгоритм трассировки луча с учетом поляризации:

- Луч выпускается из источника света с некоторой начальной матрицей когерентности. Если источник неполяризованный, то начальная матрица когерент-

ности – диагональная матрица с величинами $I/2$ на диагонали, где I – это интенсивность.

- При взаимодействии с поверхностями сцены, в т.ч. с кристаллами, матрица когерентности преобразуется по известным законам.
- Интенсивность луча после взаимодействий вычисляется как сумма диагональных элементов матрицы когерентности.

Именно возможность вычисления интенсивности луча после взаимодействий с поверхностями сцены с учетом поляризации и является целью введения понятия матрицы когерентности.

Заметим, что кроме матриц когерентности возможны и другие способы представления состояния поляризации луча света, например, векторы Стокса [11].

3. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРИСТАЛЛА СО СВЕТОМ

Разработанная нами модель взаимодействия кристалла со светом включает следующие аспекты:

- Модель луча, учитывающая длину волны и поляризацию.
- Модель кристалла.

Модель луча света:

- *Длина волны.* Этот параметр учитывается при расчете направлений преломленных и отраженных лучей, а также при поглощении луча внутри кристалла.
- *Матрица когерентности.* Концепция матриц когерентности впервые была применена в компьютерной графике в работе [11], и она позволяет учитывать различные типы поляризации света (круговую, плоскую, эллиптическую), а также частичную поляризацию.
- *Признак обратного луча.* В отличие от случая обычных изотропных полупрозрачных объектов, в двулучепреломляющих кристаллах нельзя использовать одни и те же алгоритмы для прямых и обратных лучей.

Модель кристалла:

- *Геометрия кристалла.* Кристаллу может быть придана любая форма, однако типичные кристаллы – это полиэдры, поэтому мы ограничимся граничным заданием кристалла в виде набора полигонов.
- *Оптические свойства.* Оптические свойства кристалла могут быть описаны следующими параметрами:
 - *Оптическая индикатриса;*
 - *Поверхность коэффициентов поглощения.*

Следует отметить, что все параметры, описывающие оптические свойства кристалла являются функциями длины волны и должны задаваться в языке описания сцены соответствующим образом.

На основании этой модели разработаны следующие алгоритмы:

- Нахождения преломленных и отраженных лучей при взаимодействии луча света с кристаллом.
- Нахождение распределения энергии падающего луча по преломленным и отраженным лучам (коэффициенты Френеля).
- Расчет поглощения света внутри кристалла.

Для нахождения направлений преломленных и отраженных лучей мы используем алгоритмы, изложенные в работах [9, 12]. Заметим, что данные алгоритмы основываются на понятии поверхности волны в двулучепреломляющем кристалле и на принципе Гюйгенса [2, 13], в отличие от алгоритмов, основанных на непосредственном использовании уравнений Максвелла, изложенных в работах [5, 6]. Именно это позволило построить метод нахождения преломленных лучей в двусосных кристаллах, а не ограничиваться одноосным случаем [9].

Для расчета коэффициентов Френеля вслед за [1, 6] мы предлагаем использовать условие непрерывности касательных компонентов электрического и магнитного поля на границе раздела сред.

4. АЛГОРИТМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЦЕН С КРИСТАЛЛАМИ

Предлагаемый алгоритм визуализации сцен с кристаллами основан на использовании технологии карт освещенности [14]. Алгоритм визуализации разбивается на два этапа: распределение энергии источников света и собственно получение изображения.

При распределении энергии из каждого источника выпускаются лучи со случайными направлениями, начальными точками (если источник не точечный) и случайными длинами волн. Распределения начальных точек, направлений и длин волн выбираются в соответствии с характеристиками источника. Например, для точечного источника в некоторой точке P все лучи будут начинаться в точке P , а их направления распределены равномерно по единичной сфере. Длина волны конкретного луча выбирается в соответствии со спектральной характеристикой источника. В наших экспериментах мы использовали стандартный излучатель D65 (излучение абсолютно черного тела с температурой 6500K), спектральная характеристика которого описана в [15].

На каждой диффузной поверхности сцены строится специальная карта освещенности, которая накапливает интенсивность всех лучей, попавших на поверхность. Для каждой длины волны волны имеется своя карта освещенности. При попадании луча в одну из ячеек карты освещенности его энергия распределяется между четырьмя вершинами ячейки билинейным образом.

На этапе получения изображения используется алгоритм обратной рекурсивной лучевой трассировки. При попадании луча на поверхность с картой освещенности энергия из карты освещенности добавляется к энергии луча. Для получения RGB изображения из набора спектральных характеристик каждого пикселя мы сначала конвертируем спектральные значения в значения из цветового пространства CIE XYZ, которое затем трансформируется в RGB [15].

5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХОДА ЛУЧЕЙ В СЦЕНАХ С КРИСТАЛЛАМИ

Как упоминалось выше, для нахождения направлений преломленных лучей в двулучепреломляющих кристаллах, используется принцип Гюйгенса [7, 12]. Поверхность волны внутри кристалла представляет собой эллипсоид и сферу (в случае одноосного кристалла) или сложную поверхность (в случае двуосного кристалла), которая может оказаться ориентирована произвольным образом относительно поверхности кристалла. Из принципа Гюйгенса следует, что при входе луча в кристалл преломленный луч *может и не лежать в плоскости падения*, образованной направлениями падающего луча и нормали к поверхности в точке падения. Воздух же является изотропной средой, в которой поверхность волны – сфера. Поэтому, руководствуясь тем же принципом Гюйгенса можно сделать вывод, что преломленный луч в этом случае *всегда лежит в плоскости падения*. Таким образом, *законы преломления прямых и обратных лучей в анизотропных кристаллах различны*. Проиллюстрируем этот факт простым примером (рис. 5).

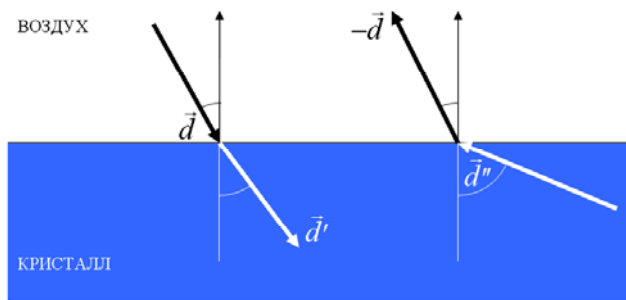


Рис. 5. Преломление прямых и обратных лучей в анизотропных кристаллах

Рассмотрим прямой и обратный лучи, падающие на поверхность кристалла в одном и том же направлении \vec{d} . Прямой луч \vec{d} , преломившись на границе раздела сред, даст луч \vec{d}' (для простоты мы рассматриваем лишь один из преломленных лучей). Обратный луч $-\vec{d}$ получается в результате преломления на выходе из кристалла луча \vec{d}'' . Оказывается, что направления \vec{d}' и \vec{d}'' – разные, и, вообще говоря, $\vec{d}' \neq -\vec{d}''$.

Таким образом, принцип обратимости Гельмгольца, утверждающий, что траектории прямых и обратных лучей совпадают, вообще говоря, не выполняется в сценах, содержащих анизотропные кристаллы. Данный факт является весьма важным при построении алгоритмов визуализации сцен, содержащих анизотропные кристаллы.

6. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В данном разделе мы рассмотрим ряд экспериментов, демонстрирующих применение алгоритма карт освещенности для рендеринга сцен, содержащих кристаллы. Первый эксперимент демонстрирует оптическую дисперсию в призме из стекла. Сцена состоит из треугольной призмы и плоского экрана. На призму направлен узкий параллельный пучок света, который раскладывается призмой в спектр, который диф-

фузно отражается от экрана. На рис. 6а показано схематическое изображение сцены (вид сверху), а на рис. 6б – изображение, рассчитанное при помощи нашего алгоритма.

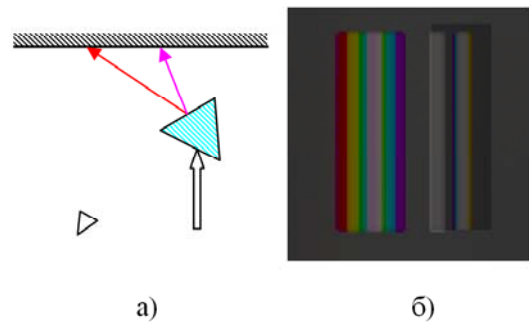


Рис. 6. Эксперимент с призмой из стекла

Второй эксперимент также посвящен демонстрации эффекта оптической дисперсии, но сцена в нем более сложная. Это бриллиант, заключенный в бокс с диффузными белыми стенками. Точечный источник света помещен перед бриллиантом. На рис. 7а показана проволочная модель бриллианта, на рис. 7б – бриллиант, рассчитанный без учета дисперсии, а на рис. 7в – с учетом дисперсии. Конечно, полного совпадения с изображением реального бриллианта, показанного на рис. 1 добиться не удастся, поскольку игра света в бриллиантах весьма чувствительна к установке света в сцене. Отметим, что цель данной работы – представить *локальную* модель взаимодействия света с кристаллом. Геометрия бриллиантов, использованные в данной работе, позаимствована с веб-сайта <http://www.3dlapidary.com/>.

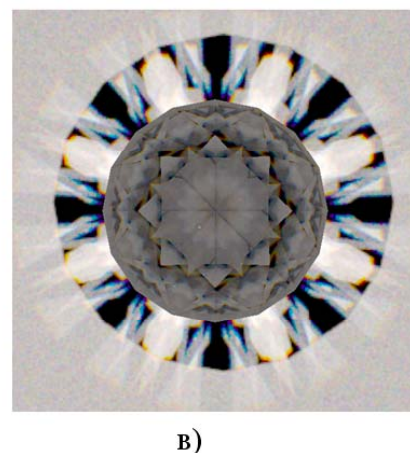
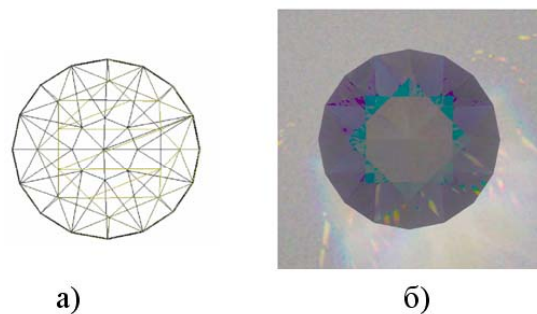


Рис. 6. Изображения игры света в бриллианте

В третьем эксперименте мы моделируем эффект двойного лучепреломления. Кристалл кальцита (прямоугольный па-

раллелепипед) помещен над текстурированной поверхностью, точечный источник света находится перед кристаллом. На рис. 8 приводятся изображения вращающегося кристалла. Кристаллическая решетка и оптическая индикатриса меняют свое положение вместе с кристаллом, и за счет этого вращается второе изображение цифр. Это самый наглядный пример, на котором можно проверять *нереалистичность* изображения сцен с кристаллами, которое рассчитывается известными программами.

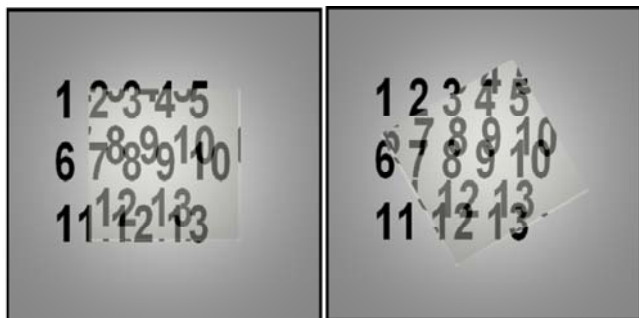


Рис. 8. Двухлучепреломление в кальците. Эффект вращения второго изображения

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерес к реалистической визуализации возник у авторов при разработке веб-справочника КРИСТАЛЛ [16]. Тогда, к большому удивлению авторов, было обнаружено, что требуемые алгоритмы рендеринга для сцен с кристаллами попросту отсутствуют. Поставленная проблема была опубликована в работе [17]. В данной работе представлены следующие результаты:

- Построена модель взаимодействия луча света с кристаллом, учитывающая эффекты дисперсии, двойного лучепреломления, плеохроизма и поляризации.
- Предложен алгоритм, использующий эту модель, и позволяющий получать физически корректные изображения сцен с кристаллами.
- Предложены расширения для языков описания сцен, учитывающие необходимые и достаточные данные об оптических свойствах кристаллов.

8. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Guy S., Soler C. *Graphics Gems Revisited: Fast and Physically Based Rendering of Gemstones*. // *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of the SIGGRAPH conference)*. – 2004.
- [2] Tannenbaum, D. C., Tannenbaum, P., AND Wozny, M. J. *Polarization and birefringency considerations in rendering*. // *Comp. Graphics (SIGGRAPH '94 Proceedings)*, ACM Press, 221-222 (Extended version available on CD-ROM).
- [3] Sun, Y., Fracchia, F. D., and Drew, M. S. *Rendering diamonds*. // *In Proceedings of the 11th Western Computer Graphics Symposium (WCGS)*, 9-15, 2000.
- [4] Sun, Y., Fracchia, F. D., and Drew, M. S. 2000. *Rendering light dispersion with a composite spectral model*. // *International Conference on Color in Graphics and Image Processing - CGIP'2000*.

[5] McClain S.C., Hillman L.W., Chipman R.A. *Polarization ray tracing in anisotropic optically active media I, algorithms*. // *Applied Optics vol. 10, no. 11, pp. 2371-2382 (Nov. 1993)*.

[6] 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)*.

[7] Шубников А.В. *Оптическая кристаллография*. Изд-во АН СССР, Москва 1950.

[8] <http://ggd.nsu.ru/Crystal> – Интерактивная система обучения КРИСТАЛЛ.

[9] Саттаров М.А. *Моделирование двойного лучепреломления в двuosных кристаллах* // *Программа и тезисы докладов V Всероссийской конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям*. – Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2004. – С. 29. См. также <http://www.ict.nsc.ru/ws/YM2004/8596/Sattarov.htm>

[10] Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. *Природа окраски самоцветов*. – М. “Недра”1984.

[11] Wolff, L., Kurlander, D. J. *Ray tracing with polarization parameters*. // *IEEE Computer Graphics and Applications 10, 6 (november/december), 44-55, 1990*

[12] Саттаров М.А. *Моделирование двойного лучепреломления в одноосных кристаллах* // *Тр. Конференции Молодых Ученых ИВМиМГ СО РАН*. – Новосибирск. – 2004. – С. 176–182.

[13] Born M., Wolf E. *Principles of Optics, Sixth Ed.* – Cambridge Univ. Press. – 1997.

[14] Arvo, J. *Backwards ray tracing*. // *ACM SIGGRAPH 1986 Course Notes, 12 (Developments in Ray Tracing)*.

[15] *Colorimetry, CIE Publication #15.2, 2nd ed.* (1986).

[16] Debelov V.A., Devyatova A.Yu., Sattarov M.A., Smirnov S.Z., Zhmulevskaya D.R. *Technological Aspects of Development of the Web-trainer on Crystallography* // *Труды 13-й международной конференции по компьютерной графике и зрению ГРАФИКОН-2003*, М., МГУ, 2003, с. 192-195.

[17] Дебелов В.А., Саттаров М.А. *Проблемы реалистической визуализации кристаллов* // *Тр. 13-й международной конференции по компьютерной графике и зрению Графикон-2003*, Москва, 5-10 сент. 2003. – М.: МГУ, 2003. – С. 221–227.

Об авторах

Виктор Алексеевич Дебелов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Адрес: Новосибирск, 630090, пр-т Лаврентьева, 6, ИВМиМГ. Телефон: +7(3833)306557

E-mail: debelov@oapmg.ssc.ru

Максим Александрович Саттаров – аспирант Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Адрес: Новосибирск, 630090, пр-т Лаврентьева, 6, ИВМиМГ.

E-mail: sattarov@dataeast.ru.

Models and algorithms for photorealistic visualization of scenes including crystals

Abstract

Existing models of local illumination of 3D surfaces used in rendering software do not account for specific optical properties which are intrinsic to quite broad classes of crystals. There are several works considering particular cases of light interactions with crystals.

The given paper is a further development in this direction and presents a common physically-based model of light propagation through crystals taking into account such optical properties as birefringency, dichroism, dispersion, and polarization. Earlier works described optical effects of uniaxial crystals only and did not pay attention to backward rays that is a basis of most rendering techniques. For example, the reciprocity principle is not valid for 3D scenes with birefringent crystals. In the paper authors uncover these problems. Necessary and sufficient extensions of 3D scene object description are suggested in order that rendering programs produce physically-correct images of scenes with crystals.

Keywords: *Crystals, Photorealistic visualization, birefringency, dichroism, polarization, optical dispersion.*

About the author(s)

Victor A. Debelov holds position of leading researcher at Computer Graphics Lab. Of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics. His contact email is debelov@oapmg.sscc.ru.

Maxim A. Sattarov is a Ph.D. student at Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics. His contact email is sattarov@dataeast.ru.