

Физически корректный рендеринг прозрачных оптически активных изотропных кристаллов

Д. Козлов, В. Дебелов

Лаборатория численного анализа и машинной графики

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

Новосибирск, Россия

{kozlov, debelov}@oapmg.ssc.ru

Аннотация

Данная работа посвящена проблеме физически корректного рендеринга оптически активных кристаллов. Оптическая активность – это способность среды (кристалла) поворачивать плоскость поляризации, распространяющегося в ней луча по мере его прохождения в среде.

Одним из наиболее известных представителей класса оптически активных кристаллов является кварц, который проявляет оптическую активность будучи одноосным кристаллом. Однако существуют и изотропные кристаллы, которые являются оптически активными, например, бромат натрия.

К настоящему моменту данное оптическое явление находилось за рамками работ, посвящённых фотореалистическому рендерингу кристаллов. В данной статье предложен метод расчёта поворота плоскости поляризации линейно поляризованного луча света в прозрачных оптически активных изотропных средах. Разработанный метод предназначен для использования в алгоритмах лучевой трассировки, позволяет их авторам добавлять физически корректный учёт явления оптической активности.

Ключевые слова: фотореалистический рендеринг, физически корректный рендеринг, кристаллы, поляризация света, оптическая активность, дисперсия света.

1. ВВЕДЕНИЕ

В изотропных и анизотропных кристаллах наблюдается множество оптических эффектов: дисперсия света, двойное лучепреломление, коническая рефракция и плеохроизм. Все эти явления в настоящее время так или иначе рассмотрены в работах по фотореалистическому рендерингу кристаллов [1], [7], [9] и [12].

Оптическая активность также является одним из эффектов, проявляющихся в кристаллах, однако она не рассмотрена ни в одной из работ по фотореалистическому рендерингу кристаллов.

Среда называется оптически активной, если она обладает способностью поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованного луча света, распространяющегося в ней, по мере его прохождения в среде.

Существуют работы, посвящённые моделированию оптической активности, например, [10], но эта работа относится, скорее, к области оптики, а не компьютерной графики, каких-либо изображений в ней не рассчитано.

2. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Обычно оптическая активность возникает в двойно преломляющих кристаллах, например, кварц, киноварь, а также в жидкостях, например, скипидар или раствор сахара. Но существуют и изотропные оптически активные кристаллы, например, хлорат натрия, бромат натрия и др. [4].

Угол поворота ϕ плоскости поляризации луча света линейно зависит от расстояния, пройденного лучом [3]:

$$\phi = \alpha \cdot d, \quad (1)$$

где d – это расстояние пройденное лучом, а α – *постоянная вращения*, численно равная углу поворота плоскости поляризации луча света слоем вещества единичной толщины. Если при распространении луча в среде плоскость поляризации поворачивается по часовой стрелке (если смотреть навстречу лучу), то такая среда называется правовращающей, в противном случае – левовращающей.

Будем использовать для правовращающей среды положительные значения α , а для левовращающей – отрицательные.

Постоянная вращения существенно зависит от длины волны. В спектральных диапазонах, где среда прозрачна, постоянная вращения обратно пропорциональна квадрату длины волны (закон Био) [3]:

$$\alpha \sim 1 / \lambda^2.$$

Такая зависимость называется *вращательной дисперсией*, она описывается *спектром оптического вращения*. Если постоянная вращения увеличивается с уменьшением длины волны, то такая вращательная дисперсия называется нормальной, она наблюдается в областях спектра, где отсутствует поглощение. В областях поглощения зависимость обратная, такая вращательная дисперсия называется аномальной [5].

В общем случае значение постоянной вращения может быть аппроксимировано формулой Друде [3]:

$$\alpha = \sum_i \frac{A_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2},$$

где константы A_i соответствуют длинам волн λ_i полос поглощения $i = 1, 2, 3, \dots$

3. МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В сценах с оптически активными кристаллами поворот плоскости поляризации можно наблюдать при размещении кристалла между двумя поляризаторами.

Для моделирования поляризатора в данной работе используется прозрачный одноосный монокристалл кальцита с плоскими параллельными гранями, расположенный в вакууме (среда, заполняющая сцену).

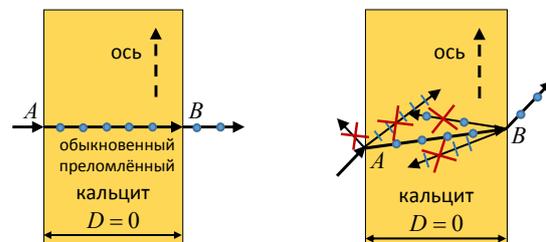


Рис. 1. Схема моделирования поляризатора

На рис. 1 приведена схема моделирования поляризатора. На схеме слева монокристалл падает неполяризованный луч. В результате взаимодействия с границей сред вакуум – кристалл в вакууме образуется отражённый частично поляризованный луч, а в кристалле из-за двойного лучепрелом-

ления – два отражённых: обыкновенный и необыкновенный. Последние два – линейно поляризованы. Как показано на рис. 1, оптическая ось кристалла (обозначена на рисунке как «ось») и падающий луч лежат в плоскости рисунка, а значит, обыкновенный луч будет поляризован перпендикулярно плоскости рисунка. Для обозначения плоскости поляризации линейно поляризованных лучей на рис. 1 использованы общепринятые обозначения кружками (точками) и штрихами. При расчёте образовавшиеся отражённый и необыкновенный преломлённый лучи отбрасываются (обозначены на схеме справа крестиками) и не участвуют в дальнейших вычислениях. Обыкновенный луч взаимодействует со второй границей сред кристалл – вакуум. При этом образуются два отражённых луча (обыкновенный и необыкновенный) и один преломлённый луч. Преломлённый луч будет параллелен исходному лучу, падающему на кристалл, и поляризован в плоскости перпендикулярной оптической оси и плоскости рисунка. Преломлённый луч выходит из поляризатора.

При моделировании поляризатора в рамках нашего эксперимента толщина кристалла D полагается равной 0, то есть точки A и B совпадут (рис. 1), а луч не смещается при взаимодействии с поляризатором, но при этом становится линейно поляризованным.

Такая схема позволяет корректно моделировать плоскость поляризации луча при прохождении поляризатора под углом, а также различную интенсивность поляризованного луча при падении луча на поляризатор под различными углами.

Для визуализации оптической активности рассмотрим следующую трёхмерную сцену. Сцена содержит прозрачный оптически активный изотропный монокристалл. Первый поляризатор наложен на плоский квадратный источник света, в результате он излучает линейно поляризованный свет. Второй поляризатор является поляризационным фильтром, который «устанавливается» на камеру-обскуру.

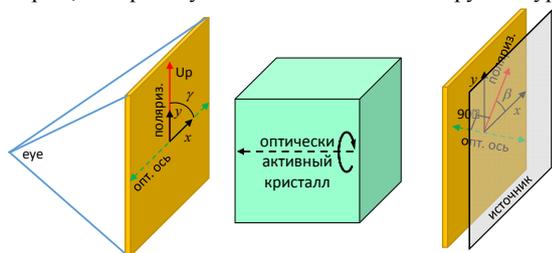


Рис. 2. Положение камеры № 1

Плоскость поляризации каждого фильтра задаётся углом относительно оси x декартовой системы координат, заданной в плоскости поляризатора (рис. 2), который будем называть *углом поляризации*. Для поляризатора, наложенного на камеру, ось y системы координат совпадает с U_p вектором камеры, а ось x перпендикулярна ей. Для поляризатора, наложенного на источник света, оси системы координат параллельны сторонам источника. Угол поляризации поляризатора на источнике света обозначим β , а угол поляризации поляризационного фильтра камеры обозначим γ .

Таким образом, для положения камеры № 1 (см. рис. 2) условие $|\beta - \gamma| = 90^\circ$ соответствует скрещенным поляризаторам, при этом свет, излучённый источником и непрошедший через кристалл, будет полностью погашен поляризационным фильтром на камере. Условие $\beta = \gamma$ соответствует сонаправленным поляризаторам; при этом свет, излучённый источником и непрошедший через кристалл, не будет гаситься поляризационным фильтром камеры. Ин-

тенсивность луча света, прошедшего через кристалл, в обоих случаях будет определяться пройденным лучом расстоянием в кристалле, так как длина пути в кристалле определяет угол поворота плоскости поляризации луча света, согласно формуле (1).

В численных экспериментах, проведённых в данной работе $\beta = \gamma = 90^\circ$, поэтому источник света виден на рассчитанных изображениях. Оптические оси поляризаторов на рис. 2 и 3 обозначены зелёными стрелками, а направления поляризации – красными.

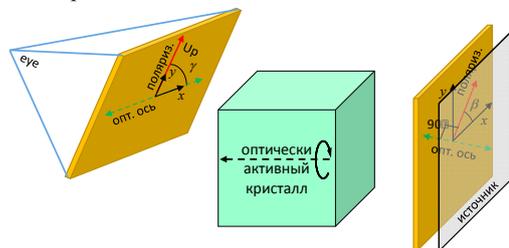


Рис. 3. Положение камеры № 2

Если плоскости поляризационного фильтра, поставленного на камеру, и поляризатора, установленного на источник, не параллельны, что соответствует положению камеры № 2, приведённому на рис. 3, то источник света не будет гаситься полностью даже при условии $|\beta - \gamma| = 90^\circ$. Тем не менее, при небольших отклонениях от ракурса № 1 гашение будет приемлемым для проведения численных экспериментов. В данной работе рассматривается именно такое небольшое отклонение ракурса камеры.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовалась библиотека LIAC [2], предназначенная для физически корректного расчёта взаимодействия луча света с изотропными и анизотропными кристаллами.

Геометрия кристалла – это куб с длиной ребра 1.6 см. Куб стоит на источнике белого света CIE D65, то есть со спектром излучения абсолютно чёрного тела с температурой 6500K. Внешнее освещение имеет спектр, равный 40% от CIE D65. На источник света виртуально (нет зазора, толщина поляризатора равна 0) наложен поляризатор в соответствии со схемой на рис. 2 и 3, поэтому источник света излучает поляризованный свет. На рис. 4 приведены изображения модели сцены с двух ракурсов. Слева для положения камеры № 1, справа для положения камеры № 2.

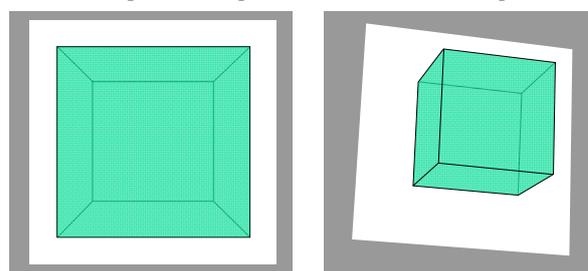


Рис. 4. Схематические изображения модели сцены для визуализации явления оптической активности

Для проведения экспериментов используется спектр оптического вращения кристалла кварца, который хорошо аппроксимируется формулой, предложенной в работе [6]:

$$\alpha = \frac{k\lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)^2},$$

где $k = 7.19$ и $\lambda_0 = 0.0926283$ мкм, а значение α – в градусах на миллиметр.

В качестве спектра преломления используется спектр преломления кварца, который может быть рассчитан по формуле Селлмейера с коэффициентами из работы [8]:

$$n_{o,e}^2(\lambda) = A_{o,e} + \frac{B_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - C_{o,e}} + \frac{D_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - E_{o,e}},$$

где значение длины волны λ в микрометрах, подстрочный индекс o соответствует обыкновенной волне, а индекс e – необыкновенной, значения констант следующие:

$$A_o = 1.28604141, B_o = 1.07044083, C_o = 1.00585997 \cdot 10^{-2},$$

$$D_o = 1.10202242, E_o = 100,$$

$$A_e = 1.28851804, B_e = 1.09509924, C_e = 1.02101864 \cdot 10^{-2},$$

$$D_e = 1.15662475, E_e = 100.$$

Поскольку в данной работе рассматриваются изотропные кристаллы, а кристалл кварца является одноосным, то коэффициенты преломления n для изотропного кристалла рассчитываются как среднее значение между коэффициентами преломления кварца для обыкновенной n_o и необыкновенной n_e волны:

$$n(\lambda) = (n_o(\lambda) + n_e(\lambda)) / 2.$$

Для изотропной прозрачной оптически активной среды введём следующее описание:

$$\text{Medium} = \{SP_{ref}, SP_{rot}\},$$

где SP_{ref} – спектр преломления; SP_{rot} – спектр оптического вращения, спектры заданы на видимом диапазоне длин волн от 380 до 780 нм.

Состояние поляризации луча описывается матрицей когерентности и системой координат луча, в которой она задана. Для пересчёта матрицы когерентности при повороте плоскости поляризации на угол ϕ применяется следующая матрица модификации когерентности из работы [11]:

$$M_{rotate} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}.$$

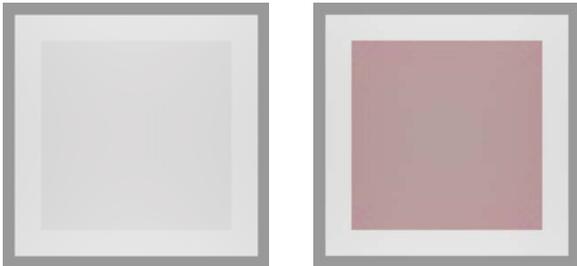


Рис. 5. Рассчитанные изображения изотропного оптически неактивного (слева) и оптически активного монокристалла

На рис. 5 приведены результаты первого численного эксперимента – рассчитанные изображения двух прозрачных кристаллов с ракурса камеры № 1. Слева приведено изображение оптически неактивного кристалла, а справа – оптически активного кристалла. Оба кристалла имеют одинаковые спектры преломления. Хорошо заметно, что оптически активный кристалл при наблюдении в поляризованном свете приобрёл красную окраску, а оптически неактивный остался бесцветным.

На рис. 6 показаны результаты второго эксперимента: изменение окраски кристалла, возникающей из-за оптической активности, в зависимости от размеров кристалла. Слева на рис. 6 приведено изображение описанного выше оптического активного кристалла с ракурса камеры № 2. Справа изображен кристалл с теми же оптическими характери-

ками, но вдвое меньших размеров. Центры обоих кристаллов расположены в одной точке. На изображениях хорошо заметно различие окрасок этих кристаллов.

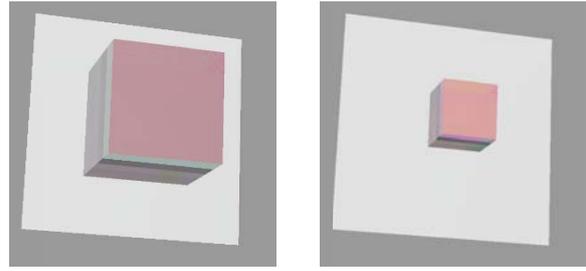


Рис. 6. Различие окрасок, вызванное оптической активностью, для различных размеров кристалла

Третий численный эксперимент моделирует ситуацию, когда кристалл либо очень крупный, либо его постоянная вращения очень большая. В данном случае значительно увеличен спектр оптического вращения, он равен спектру оптического вращения кристалла кварца, умноженному на 75. При таком спектре оптического вращения плоскость поляризации линейно поляризованного монохроматического луча с длиной волны 580 нм при прохождении им в кристалле расстояния, равного длине ребра кристалла, поворачивается на угол, примерно равный 300×90 градусов.

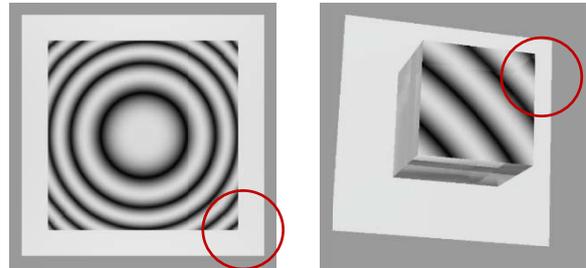


Рис. 7. Рассчитанные изображения изотропного оптически активного монокристалла в монохроматическом свете с длиной волны 580 нм

Рассчитанные изображения такого кристалла с ракурсов камер № 1 и 2 в монохроматическом свете с длиной волны 580 нм приведены на рис. 7. На изображениях хорошо заметны чередующиеся светлые и тёмные полосы, которые образуются вследствие различной длины пробега луча света в кристалле для направлений, соответствующим различным пикселям изображения.

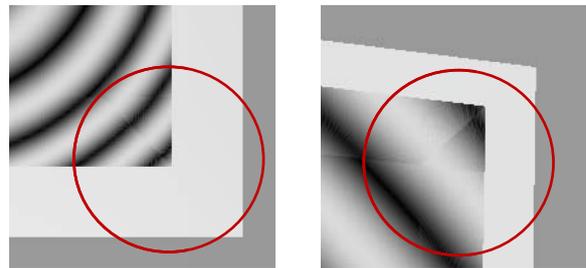


Рис. 8. Фрагменты рассчитанных изображений изотропного оптически активного монокристалла

Небольшие сдвиги частей полос (на рис. 7 и 8 отмечены красным кругом, на рис. 8 они показан крупнее) относительно друг друга в углах изображений кристаллов объясняются разным изменением поляризации лучей света при отражении от разных боковых граней (см. схемы сцены на рис. 4).

На рис. 9 приведены полноцветные изображения прозрачного изотропного кристалла, рассчитанные на видимом диапазоне спектра от 380 до 780 нм с шагом 20 нм.

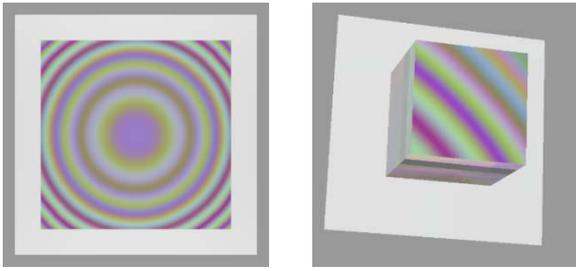


Рис. 9. Полноцветные изображения изотропного оптически активного монокристалла

На изображениях хорошо заметны переливы цветов, возникающие в основном из-за дисперсии вращения, так как на источнике света отсутствуют какие-либо контрастные переходы цветов, необходимые для наблюдения обычной (линейной) дисперсии света (см. рис. 5, слева).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнено моделирование оптической активности в прозрачных изотропных кристаллах. Рассчитаны изображения, которые продемонстрировали существенное влияние оптической активности на фотореалистические изображения кристаллов, в сценах, содержащих источники поляризованного света и в случае присутствия на камере поляризационного фильтра.

Отметим, что поляризованный свет в сцене может возникать и по естественным причинам, например, анизотропные кристаллы являются естественными поляризаторами, а поляризационным фильтром может служить какой-либо кристалл, расположенный между камерой и сценой.

На рассчитанных изображениях были выявлены особенности (см. рис. 8), полезные для проверки корректности расчёта изменения поляризации луча света при отражении и преломлении на границах кристаллов.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа поддержана РФФИ по грантам № 12-07-00386 и № 12-07-00391.

7. ССЫЛКИ

- [1] Дебелов В.А., Козлов Д.С. Физически корректный алгоритм рендеринга анизотропных поглощающих кристаллов // Труды 23-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон-2013, 16-20 сентября 2013, ИАиПУ ДВО РАН, ДВФУ. – Владивосток, Россия. – С. 191 – 194.
- [2] Козлов Д.С. Библиотека LIAC: расчёт взаимодействия луча света с кристаллами, ФАП СО РАН, рег. PR14011, 2014. – <http://fap.sbras.ru/node/4089>.
- [3] Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пос. для вузов. – 6-е изд. – М: ФИЗМАТЛИТ, – 2003.
- [4] Работа 8. Вращение плоскости поляризации. <http://physfak.org/radio/optics/8.pdf>
- [5] Чугаев Л.А. Избранные труды. Т. 2. Об аномальной вращательной дисперсии (предварительное сообщение) (1909). – М: Издательство АН СССР, 1955.
- [6] Chandrasekhar S. The optical rotatory dispersion of quartz. // Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A, – Vol. 45, – No. 3, – 1957. – P. 147 – 160.
- [7] Debelov V.A., Kozlov D.S. A Local Model of Light Interaction with Transparent Crystalline Media. // IEEE Transactions on visualization and computer graphics. – Vol. 19, No. 8. – 2013. – P. 1274 – 1287.

- [8] Ghosh G., Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. // Optics Communications. – Vol. 163, – No. 1–3, – May 1999. – P. 95 – 102.
- [9] Guy S., Soler C. Fast and Physically-Based Rendering of Gemstones. // Comp. Graphics (SIGGRAPH '03 Proceedings), ACM Press.
- [10] McClain S. C., Chipman R.A. Polarization ray tracing in anisotropic optically active media II, theory and physics // Applied Optics, vol. 10, no. 11. – P. 2383 – 2393 (Nov. 1993).
- [11] Tannenbaum, D.C., Tannenbaum T., Wozny M.J. Polarization and birefringency considerations in rendering // Comp. Graphics. – 1994. – P. 221 – 222.
- [12] Weidlich A., Wilkie A. Realistic Rendering of Birefringency in Uniaxial Crystals // ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 1, 2008. – P. 6:1 – 6:12.

Об авторах

Козлов Дмитрий – инженер лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

E-mail: kozlov@oapmg.sscc.ru.

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

E-mail: debelov@oapmg.sscc.ru.

This paper is devoted to the problem of photorealistic rendering of optically active crystals. Optical activity (rotation) is turning of plane of linearly polarized light while it travels through an optically active medium.

Quartz is one of well-known optically active crystals. It demonstrates optically activity being an optically uniaxial crystal. However, there are optically active isotropic crystals, e.g. sodium bromate.

Up to this paper, the phenomenon was out of scope of papers devoted to photorealistic rendering of crystals. In this paper, we present a method for physically correct calculation of turning of linearly polarized light polarization plane in transparent optically active isotropic crystals. The method is primarily intended to be used in ray tracing algorithms allows to their authors computing optical rotation phenomenon in physically correct way.

Keywords: *Photorealistic rendering, physically based rendering, crystals, light polarization, optical rotation, optical dispersion.*