

Визуализация поляризации света в сценах с кристаллами

Д.С. Козлов

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

kozlov@oapmg.sccc.ru

Аннотация

В последнее время всё больше работ по фотореалистическому рендерингу обращают внимание на поляризацию света. Действительно, рендеринг поляризованным лучом позволяет получать изображения, которые могут значительно отличаться от изображений, полученных на основе рендеринга неполяризованным лучом. Рендеринг кристаллов вообще невозможен без учёта поляризации.

Свет бывает поляризованный, неполяризованный и частично поляризованный. При этом он бывает поляризован линейно, циркулярно или эллиптически. В научной визуализации часто представляют различные объекты реального мира и их параметры при помощи изображений. В данной работе мы задались целью графически изобразить степень поляризации лучей в сцене и её характеристики при помощи изображений, отличающихся от традиционной визуализации интенсивности лучей.

По нашему мнению, такое средство может быть востребовано само по себе, а также поможет отлаживать алгоритмы рендеринга поляризованным лучом, используя широко известные факты из оптики и простые сцены со сложными оптическими материалами.

Ключевые слова: Фотореалистический рендеринг, кристаллы, двойное лучепреломление, поляризация света, дисперсия света, визуализация поляризации.

1. ВВЕДЕНИЕ

В классических алгоритмах лучевой трассировки такое свойство лучей как поляризация вообще не рассматривается и не учитывается. Все вычисления обычно опираются на выкладки геометрической оптики, а волновые параметры луча (поляризация, фаза волны) остаются за кадром. Это объясняется тем, что в сценах с диффузными объектами распространяющийся свет не поляризован, а интерференция света вообще наблюдается только крайне в специализированных сценах, поэтому вычислять и учитывать волновые свойства луча дорого, сложно и нет особого смысла.

Волновые свойства света начинают проявлять себя, если в сцену добавить полупрозрачные объекты или металлы. В этих случаях свет изменяет своё состояние поляризации при отражении от них и прохождении через них. Изменение поляризации света, однако, в общем случае падения луча на поверхность таких объектов оказывается не настолько значительным, чтобы его нельзя было проигнорировать. Стоит отметить, что разница между изображениями, рассчитанными с учётом поляризации и без такового, всё же наблюдаема [6].

Если в сцену поместить анизотропный кристалл (оптические свойства которого зависят от направления), то ситуация кардинально меняется. Дело в том, что такие кристаллы являются естественными поляризаторами, поэтому свет, проходящий через них, оказывается линейно поляризованным. Отсутствие осевой симметрии электрического поля луча при такой поляризации приводит к тому, что взаимодействие поляризо-

ванного света с объектами очень сильно зависит от свойств этих объектов. В частности, при попадании на другой поляризатор свет может быть полностью погашен, или может отсутствовать отражённый луч при падении света на полупрозрачный изотропный объект. Таким образом, сцены, содержащие анизотропные объекты вообще не могут быть корректно рассчитаны без учёта поляризации света.

В целом причины появления поляризованного света в сцене следующие¹: 1) излучение поляризованного света источником; 2) анизотропия среды распространения света; 3) преломление и отражение на границе двух сред.

В данной статье мы подробно остановимся на изучении и визуализации степени присутствия поляризованных лучей в сцене и их поляризационных характеристиках в сценах со всеми перечисленными «источниками» поляризации.

Отметим так же, что при преломлении на границе полупрозрачных сред может наблюдаться скачкообразный сдвиг фазы [7], что может влиять на интерференцию в сцене, но в данной статье это не рассматривается.

2. ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Поляризация луча света – это характеристика, описывающая поведение вектора электрического поля в плоскости перпендикулярной направлению распространения луча. Поляризация может быть линейной, круговой или в общем случае эллиптической.

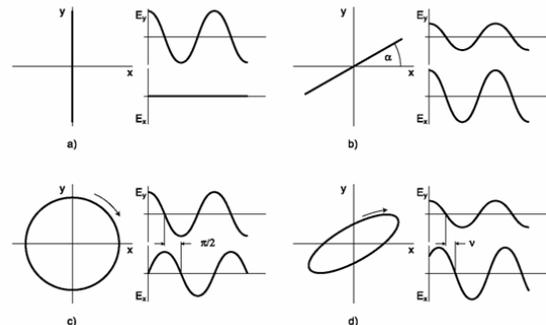


Рис. 1. а) линейная поляризация вдоль оси ординат, б) общий случай линейной поляризации, в) круговая (циркулярная) поляризация, д) эллиптическая поляризация. Изображение взято из работы [2].

На рис. 1 показано траектории описываемые концом вектора электрического поля с началом на траектории распространения поляризованного луча в плоскости перпендикулярной лучу, в зависимости от типа поляризации луча.

Каждая электромагнитная волна в отдельности полностью поляризована. Квазимонохромный луч света, как совокупность волн, распространяющихся по одной прямой и имеющих одну длину волны, может быть полностью поляризован,

¹ http://ru.wikipedia.org/wiki/Поляризация_волн

частично поляризован или не поляризован вообще, в зависимости от степени корреляции колебаний отдельных волн в луче. Если колебания не коррелируют – луч не поляризован, если степень корреляции максимальная – луч полностью поляризован и имеет один из трёх перечисленных типов поляризации.

Для описания и расчёта состояния поляризации существует несколько математических конструкций (подходов): вектора Джонса и матрицы Джонса, вектора Стокса и матрицы Мюллера, матрицы когерентности и их модификаторы, см. подробнее [5]. Конструкция Джонса подходит лишь для описания полностью поляризованного луча, тогда как остальные два позволяют описать и частично поляризованный луч. Для достижения целей данной работы (оценка степени поляризации луча) удобно использовать подход основанный на матрицах когерентности (они содержат достаточный минимум информации для этого).

Рассмотрим этот подход детальнее. Электрическое поле полностью поляризованного луча может быть описано комплексным вектором Джонса:

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x e^{i(\omega t + \delta_x)} \\ E_y e^{i(\omega t + \delta_y)} \end{bmatrix},$$

здесь ω – частота колебаний, δ_x и δ_y – начальные фазы колебаний, E_x и E_y – амплитуды проекций колебаний электрического поля на два перпендикулярных наперёд выбранных вектора перпендикулярных волновому вектору. Реальным значением вектора электрического поля будет $\text{Re } \vec{E}$. Тогда матрицей когерентности называется следующая матрица [4, 5]:

$$J = \langle \vec{E} \times \vec{E}^\dagger \rangle = \begin{bmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матрица и базис (два вектора перпендикулярные лучу), для которого она вычислена или измерена, определяют состояние поляризации луча. Элементы главной диагонали матрицы вещественные и представляют собой интенсивности x - и y -компонент электрического вектора, таким образом, интенсивность луча равна следу матрицы когерентности:

$$I = \text{Tr } J = J_{xx} + J_{yy} = \langle E_x E_x^* \rangle + \langle E_y E_y^* \rangle. \quad (2)$$

Внедиагональные элементы определяют степень корреляции компонент электрического поля. Справедливы следующие утверждения: 1) для естественного (полностью неполяризованного) света внедиагональные элементы матрицы когерентности равны 0, а $J_{xx} = J_{yy}$; 2) для полностью поляризованного света детерминант матрицы когерентности равен 0; 3) матрица когерентности лучей распространяющихся по одной прямой равна сумме их матриц когерентности.

Отметим, что частично поляризованный луч можно рассматривать как сумму двух лучей: полностью поляризованного и полностью неполяризованного. Отношение интенсивности полностью поляризованной части к полной интенсивности луча называется степенью поляризации луча. Она определяется соотношением [5]:

$$P = \frac{I_{\text{поляр}}}{I_{\text{полн}}} = \sqrt{1 - \frac{4 J_{xx} J_{yy} - J_{xy} J_{yx}}{(J_{xx} + J_{yy})^2}}, \quad (3)$$

то есть P равно 1 для полностью поляризованного луча и -0 для естественного света.

Имеет смысл также оценить форму поляризации полностью поляризованной компоненты. Введём понятие степени эллиптичности полностью поляризованной компоненты луча, как соотношение малой полуоси к большой полуоси эллипса, описываемого концом вектора электрического поля. В таком случае циркулярно поляризованный свет будет иметь максимальную степень эллиптичности равную 1, а линейно поляризованный минимальную -0 . Численно степень эллиптичности может быть вычислена как [8]:

$$E = \left| \tan\left(\frac{1}{2} \arcsin(\sin(2 \arctg(\sqrt{J_{yy}} / \sqrt{J_{xx}})) \sin \gamma)\right) \right|, \quad (4)$$

где γ – азимут эллипса, см. далее.

Другим важным параметром формы эллипса (в том числе, и вырожденного в линию для линейной поляризации) является азимут, то есть угол между большой полуосью эллипса и осью абсцисс:

$$\gamma = \arcsin(\text{Im } J_{yx} / \sqrt{J_{xx} J_{yy}}). \quad (5)$$

Величина азимута изменяется в интервале $[-\pi / 2; \pi / 2]$.

Нижнее и верхнее граничное значение достигаются, например, при правой и левой круговой поляризации, соответственно.

Последняя важная характеристика эллипса – это его размер, но он прямо пропорционален интенсивности луча, поэтому оценивать его отдельно не имеет смысла.

3. МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Идея визуализации распределения поляризованного света в сцене состоит в том, чтобы модифицировать классическую камеру, используемую в алгоритмах лучевой трассировки, заставив её «фотографировать» требуемые параметры входящих лучей, вместо их интенсивности, как это делает стандартная камера.

В данном случае модификация состоит в следующем. Каждый входящий в камеру луч, содержит информацию о поляризации луча, т.е. матрицу когерентности и базис в котором она определена. Для того чтобы построить изображение, необходимо по данной информации вычислить значение визуализируемого параметра, а затем преобразовать его в значение интенсивности пикселя изображения, которое будет записано в спектральное изображение, собираемое камерой.

Алгоритм такого преобразования зависит от визуализируемого параметра, но общая идея состоит в том, чтобы получить такие значения интенсивностей представляющие собой доли от какого-либо стандартного спектра. Преимущество такого подхода состоит в том, что получаемое изображение может быть преобразовано в RGB-изображение путём стандартного преобразования CIE [3]. Полученное изображение будем называть *картой* того или иного параметра, например, *карта поляризации* света в сцене.

Для степени поляризации света. Параметр P изменяется от 0 до 1. Для получения интенсивности его необходимо просто умножить на спектр стандартного источника света CIE D65.

$$P(\lambda) = \text{CIED65}(\lambda) * P,$$

То есть, для полностью поляризованного света в результате мы получим спектр CIE D65, т.е. белый, а для полностью не поляризованного получим нулевой спектр, т.е. чёрный цвет.

Для степени эллиптичности. Параметр E изменяется от 0 до 1. Дополнительно будет считать, что эллиптичность неполяризованного света равна 0.

$$E(\lambda) = CIED65(\lambda) * E$$

Отметим, что имеет смысл рассчитывать только монохромные изображения, поскольку если рассчитать спектр для нескольких длин волн, то при пересчёте его в RGB-цвет стандартным преобразованием CIE полученная цветовая информация окажется бессмысленной, так как преобразование CIE рассчитано только на цветовую информацию в компонентах спектра.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов использовалась виртуальная сцена, состоящая из одного монокристалла и расположенным под ним квадратным источником света. Спектр источника, определяется RGB изображением, преобразованным в спектральный вид по методу, предложенному в [3], в качестве белого спектра использовался CIE D65. Для расчётов использовалось представление луча и модель взаимодействия света с кристаллами из работы [1].

Проведены, три серии экспериментов, которые демонстрируют распределение поляризованного света в сценах с различными причинами его возникновения: 1) отражение и преломление на гранях изотропного прозрачного объекта; 2) отражение и преломление света на естественных поляризаторах – анизотропных кристаллах; 3) освещение сцены источником поляризованного света.

4.1 Изотропный объект

Монокристалл, представляет собой кусок прозрачного стекла, ограниченного одной из стандартных огранок драгоценных камней, будет называть его стеклянным кристаллом (хотя стекло и не имеет кристаллической решётки). Одна и та же сцена рассчитана в четырёх различных режимах. На рис. 2 приведено полноцветное изображение, рассчитанное на 21 длине волны, распределённых равномерно на видимом диапазоне волн от 380 от 780 нм, на рис. 3 – монохромное изображение (580 нм).



Рис. 2. Полноцветное изображение



Рис. 3. Монохромное изображение (580 нм)

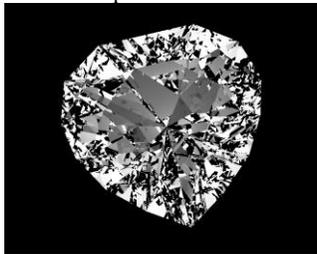


Рис. 4. Карта поляризации (580 нм)

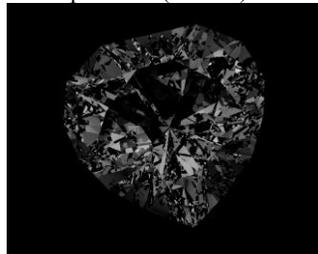


Рис. 5. Карта эллиптичности (580 нм)

Рис. 4 и 5 содержат карту поляризации и эллиптичности, соответственно. Глубина трассировки для всех приведённых изображений равна 13.

Как можно видеть на изображениях источник света излучает не поляризованный свет (источник света чёрный на карте поляризации), который при отражении частично линейно поляризуется (см. центр рис. 4), а при прохождении через кристалл поляризация может становиться эллиптической (рис. 5). Эллиптическая поляризация обычно возникает при полном внутреннем отражении или при слиянии частично линейно поляризованных лучей.

Спектр пикселей монохромных на изображениях на рис. 3, 7, 12 рассчитывается как отношение рассчитанного значения в пикселе к значению CIE D65 для той же длины волны, умноженный на спектр CIE D65, в результате изображения выглядят серыми, а не окрашенные цветом, соответствующим длине волны.

4.2 Анизотропный объект

Ситуация с эллиптичностью и степенью поляризации света в сцене кардинально меняется если, заменить стеклянный кристалл на кристалл вырезанный из кальцита (анизотропный), оставляя источник света неполяризованным, результат показан на рис. 6–9. На рис. 9 видно, что практически весь прошедший через кристалл свет стал линейно поляризованным. А эллиптически поляризованный свет в сцене отсутствует вообще, поскольку прозрачные анизотропные кристаллы являются естественными поляризаторами (в них может распространяться только линейно поляризованный свет).



Рис. 6. Цветное изображение



Рис. 7. Монохромное изображение (580 нм)

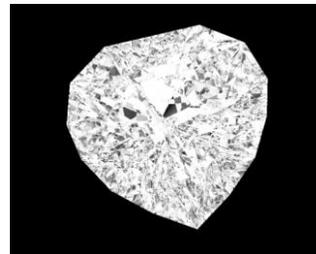


Рис. 8. Карта поляризации (580 нм)

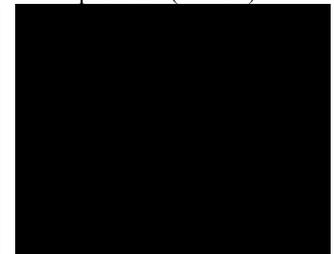


Рис. 9. Карта эллиптичности (580 нм)

4.3 Поляризованный источник света

Рассмотрим, что произойдёт, если заменить источник света линейно поляризованным, то есть, как будто бы кристалл разместили на фоне ЖК-монитора. Для этого над источником размещена виртуальная пластинка кальцита, через которую пропускаются испущенные источником лучи. Внутри пластинки алгоритмически оставляется только один из двух образованных при преломлении на её границе лучей. Оптическая ось пластинки выбрана так, что в результате, плоскость поляризации выходящих из пластины лучей расположена по диагонали текстуры.

Результат для сцены со стеклянным кристаллом показан на рис. 10–13. Монохромное и цветное изображения практически не изменились, на карте поляризации источник стал белым, что говорит о его полной поляризации, а эллиптичность всё равно осталась (хотя и меньше, чем на рис. 5), хотя освещение изначально было линейно поляризованным.

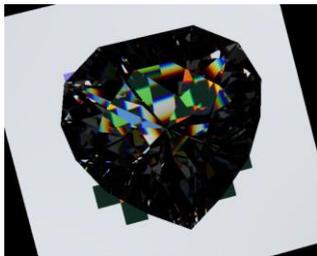


Рис. 10. Цветное изображение

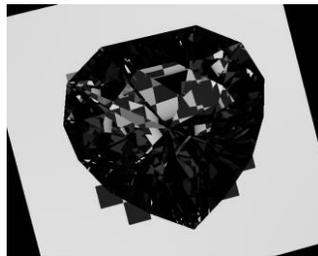


Рис. 11. Монохромное изображение (580 нм)



Рис. 12. Карта поляризации (580 нм)

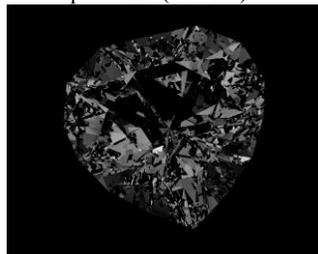


Рис. 13. Карта эллиптичности (580 нм)

Если в такой сцене заменить стеклянный кристалл, на анизотропный кристалл кальцита то результат будет следующий:

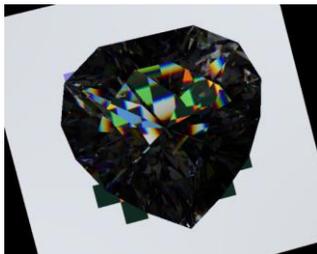


Рис. 14. Цветное изображение

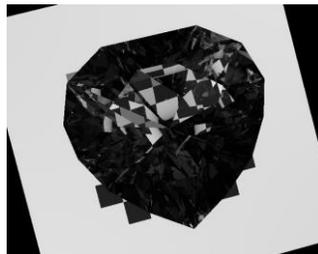


Рис. 15. Монохромное изображение (580 нм)



Рис. 16. Карта поляризации (580 нм)

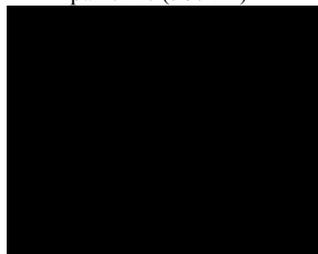


Рис. 17. Карта эллиптичности (580 нм)

Почти весь свет оказывается полностью поляризованным. Тёмные пятна на фоне кристалла могут быть объяснены тем, что часть трассирующих лучей не достигают источника из-за ограничения глубины трассировки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к визуализации распределения поляризованного света в сцене. Распределение рассматривается по таким параметрам, как степень поляризации и степень эллиптичности. Камера в алгоритме лучевой трассировке

модифицирована и «фотографирует» вместо традиционного параметра луча (интенсивности), значение выбранного параметра поляризации луча, а затем собирает изображение, показывающее распределение значений данного параметра в свете идущим из сцены.

Предложенный подход показал хорошую наглядность и позволяет «оценить» количество поляризованного света в сцене, его распределение и его характеристики.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность моему научному руководителю Дебелову Виктору Алексеевичу за постановку задачи и постоянное внимание к данной работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-07-00391 а.

7. БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] 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, pp. 1274-1287, Aug. 2013, doi:10.1109/TVCG.2012.304.
- [2] Devlin K., Chalmers A., Wilkie A., Purgathofer W. *STAR: Tone Reproduction and Physically Based Spectral Rendering*. *State of the Art Reports, Eurographics 2002*, pp. 101–123.
- [3] Glassner A.S. *Principles of digital image synthesis*. // *Morgan Kaufmann Publishers, Inc, San Francisco, California, 1994*.
- [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] Борн М., Вольф Э. *Основы Оптики*. Москва, “Наука”, 1973.
- [6] Дебелов В.А., Козлов Д.С., Саттаров М.А. *Рендеринг монокристаллов с учетом поляризации луча* // *Proceedings of 6th International Workshop on Virtual Environment on PC Cluster, VEonPC'2006, Protvino-Altai*. - Изд-во ИФТИ, Протвино. - С. 15-22.
- [7] Фёдоров Ф.И., Филиппов В.В. *Отражение и преломление света прозрачными кристаллами*. Минск, “Наука и техника”, 1976.
- [8] Шерклифф У. *Поляризованный свет. Получение и использование*. Москва, “Мир”, 1965.

Об авторах

Дмитрий Сергеевич Козлов – аспирант Новосибирского государственного университета.

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