

# Прохождение лучей через поверхности второго порядка с учетом поляризации

С.А. Силифонкин

Самарский национальный исследовательский университет им.  
академика С.П. Королёва  
Самара, Россия  
sergei.silifonkin@yandex.ru

С.А. Дегтярев

Самарский национальный исследовательский университет им.  
академика С.П. Королёва  
Самара, Россия;  
Институт систем обработки изображений - филиал ФНИИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия  
sealek@gmail.com

**Аннотация** — В работе реализован алгоритм трассировки лучей, позволяющий моделировать преломление и отражение световых лучей при их взаимодействии с границами раздела сред с различными показателями преломления. В работе учитываются эффекты поляризации, набега фазы и двулучепреломление в анизотропных средах. Поляризация описывается в нотации Джонса, набег фазы рассчитывается исходя из оптического пути луча, двулучепреломление учитывает тензорный вид диэлектрической проницаемости среды. Рассматривалась трассировка лучей через поверхности второго порядка, в частности, через конические поверхности.

**Ключевые слова** — алгоритм, вектор, луч, моделирование, геометрическая оптика, поляризация, вектор Джонса, отражение Френеля

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей компьютерной графики является реалистичное изображение моделируемых посредством математических расчётов процессов и объектов [1]. В данной работе рассмотрено одно из перспективных направлений компьютерного моделирования — трассировка лучей.

Метод трассировки заключается в том, что не учитывается волновая природа света [2, 3]. Вместо этого он представляется в виде массива геометрических векторов, что позволяет применять довольно простые и потому лёгкие в вычислениях законы геометрической оптики при преломлении и отражении световых лучей. Данный раздел оптики не учитывает таких явлений, как интерференция и дифракция, поэтому в данной работе рассматривается трассировка лучей с учётом их поляризационных состояний с целью повышения точности и информативности модели.

Разработанный алгоритм отслеживает путь луча из точки его начала до пересечения с объектом, при взаимодействии с которым просчитывается преломление и/или отражение с применением законов геометрической оптики в векторной форме. На основе этих результатов производится расчёт нового поляризационного состояния луча после взаимодействия с объектом. Данные расчёты могут быть применены к любому считающемуся прозрачным материалу с известными показателями преломления: они вводятся в алгоритм в виде численных переменных.

Задача моделирования распространения световых лучей в пространстве и различных средах актуальны в настоящее время в связи с широким распространением при визуализации [1, 3].

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ ОДНООСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Алгоритм реализован на языке Python 3.10 с использованием свободных библиотек NumPy версии 1.22.4 и Matplotlib версии 3.5.3.

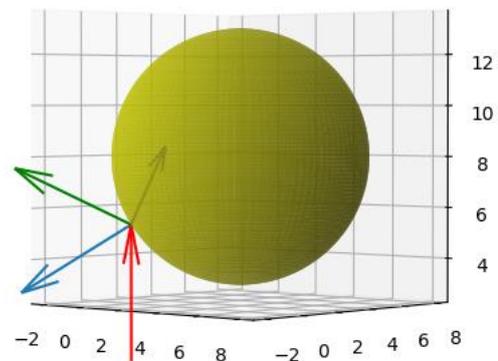


Рис. 1. Отрисовка сферы и лучей: падающего, отражённого и преломленного, а также нормали

При расчёте явления двулучепреломления использовался тензор диэлектрической проницаемости, значения элементов которого были получены из считающихся известными заранее показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\Sigma_1 = v_2^2; \quad (2)$$

$$\Sigma_2 = v_{2uv}^2, \quad (3)$$

где  $n_2$  — показатель преломления для обыкновенного луча,  $n_{2un}$  — показатель преломления для необыкновенного луча.

На этой основе из вектора индукции рассчитывается напряжённость электрического поля необыкновенной волны. Уже из этого значения происходит расчёт направляющего вектора необыкновенного луча:

$$\vec{\lambda} = [\vec{E} \cdot \vec{\sigma}], \quad (4)$$

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{v}}{|\vec{E} \cdot \vec{v}|}, \quad (5)$$

где  $\vec{e}$  – вектор направления падающего луча,  $\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности в точке падения.

Построение рассчитанного вектора представлено на рис. 2. На рис. 3 представлены эллипсы поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей для случая, когда начальный луч имел круговую поляризацию. Данные результаты получены при значениях  $n_{2un}=2$ ,  $n_2=1,5$  для формул (2) - (3),  $\vec{n}=(1, 1, 1)$ ,  $\vec{e}=(0, 0, 1)$  для формулы (5).

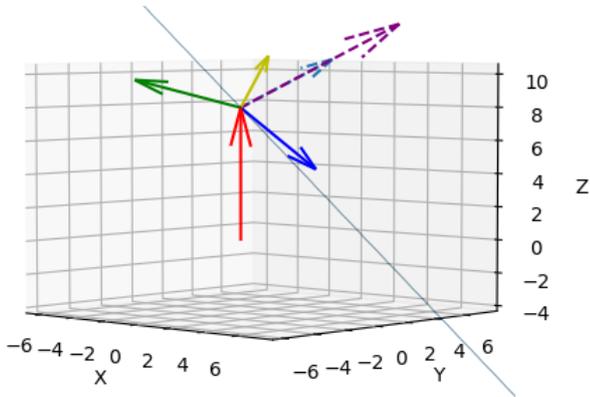


Рис. 2. Отрисовка плоскости и векторов: падающего луча, отражённого луча, обыкновенного луча, необыкновенного луча, нормали и оптической оси

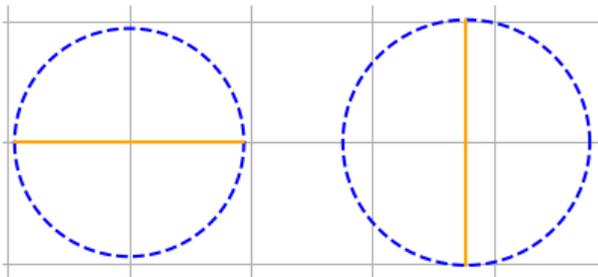


Рис. 3. Эллипсы поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей в собственной системе координат начального луча (в ней перпендикулярным векторам поляризации  $\vec{s}$  и  $\vec{p}$  является вектор направления самого луча)

Поскольку оба луча плоско поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, можно говорить об успехе моделирования: натурные эксперименты подтверждают такой результат. Различие диаметров окружностей, ограничивающих вырожденные эллипсы поляризации, символизирует собой различность амплитуд поляризации лучей и равно различие переносимой ими энергии.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был реализован алгоритм трассировки лучей с использованием законов отражения и преломления в векторной форме.

Промоделировано поведение луча при взаимодействии с некоторыми поверхностями.

Выполнен перерасчет вектора Джонса с использованием формул Френеля.

Реализован алгоритм построения эллипсов поляризации.

Выполнена проверка правильности построения эллипсов поляризации с использованием угла Брюстера.

Промоделировано поведение составленного из параллельных лучей с разными точками начала массива, имитирующего реальный световой луч – лазер.

Промоделирован частный случай явления двулучепреломления в анизотропной среде.

Можно заключить, что использование связанного с вектором Джонса математического аппарата позволяет существенно повысить информативность основанной на трассировке лучей модели, что открывает для этого метода весьма широкие горизонты в направлении повышения степени физической корректности и информативности без значительного увеличения количества требуемых вычислений: расчёт вектора Джонса легче расчёта собственно трассировки и использует данные о луче, которые всё равно потребовались бы.

С помощью разработанного программного обеспечения показана возможность совмещения работы оптического элемента с разделением поляризации падающего излучения. Таким образом, возможно формирование бифокальных поляризирующих линз, аксионов, дифракционных оптических элементов, выполненных из одноосного и двуосного анизотропного оптического материала.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FSSS-2023-0006.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Брундасов, С.М. Компьютерная графика: учебник для вузов / С.М. Брундасов. – Брянск: БГТУ, 2004. – 241 с.
- [2] Ли, Дж. Трёхмерная графика и анимация / Дж. Ли, Б. Уэр. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2002. — 640 с.
- [3] Chalmers, A. Practical parallel rendering / A. Chalmers, T. Davis, E. Reinhard. – 1-st ed. – Massachusetts: A K Peters, 2002. – 392 p.