

# Расчет хода лучей в аксиконе с малым углом раскрытия

М.С. Губаев<sup>1</sup>, С.А. Дегтярев<sup>1,2</sup>, А.В. Устинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** На языке Python разработана программа, позволяющая рассчитывать ход лучей через преломляющие поверхности. Программа позволяет строить дерево лучей, одновременно учитывая отражение и преломление на поверхности. Рассчитан ход лучей через двумерный аксикон с малым углом раскрытия. Показана высокая чувствительность характеристик выходного луча к малым изменениям показателя преломления материала аксикона.

## 1. Введение

Одним из методов геометрической оптики является трассировка лучей [1]. Суть его заключается в отслеживании взаимодействия отдельных лучей с поверхностями рассматриваемой модели. Трассировка лучей используется при проектировании и исследовании оптических систем, а также при построении изображений трехмерных моделей [2].

Алгоритм трассировки лучей строится из следующих пунктов [3]:

- Нахождение точек пересечения с поверхностью падающих на поверхность лучей и отсеивание тех лучей, которые ее не пересекают.
- Определение геометрических и физических (к примеру, нормаль и коэффициент преломления) свойств поверхности в точках, где ее пересекают лучи.
- Расчет параметров новых лучей и установка для каждого луча в качестве его начала координаты точки пересечения с поверхностью.

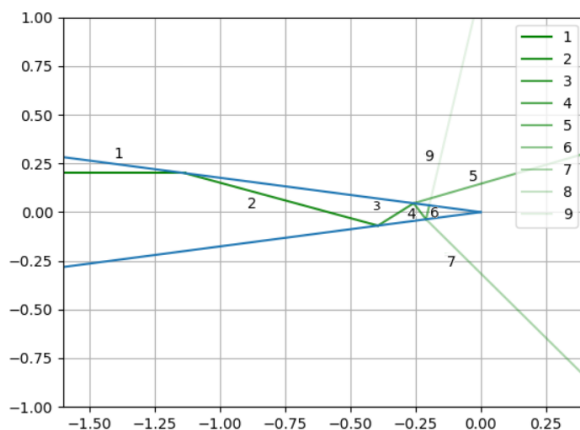
В работе проведен расчет хода лучей через рефракционный аксикон методом трассировки лучей. Уже в работе [4] была показана высокая зависимость характера рассеивания света на аксиконе от малых изменений угла раскрытия аксикона. В данной работе исследовалась зависимость коэффициентов пропускания и отражения энергии для второго взаимодействия луча с поверхностью.

## 2. Ход лучей в аксиконе

В работе рассчитан ход лучей через аксикон с малым углом при вершине. Трассировка луча в аксиконе включала в себя построение бинарного дерева лучей, где родительским элементом является падающий луч. В левом потомке находится отраженный луч, а в правом преломленный. Если происходило полное внутреннее отражение, то результирующий луч помещался в левое поддерево. Чтобы сократить время работы программы, глубина дерева

ограничивалась, после достижения заданной глубины дальнейшее отслеживание хода луча прекращалось.

Рассмотрим аксикон с углом при вершине  $\alpha = 10^\circ$ . Ход лучей в таком аксиконе показан на рис. 1.

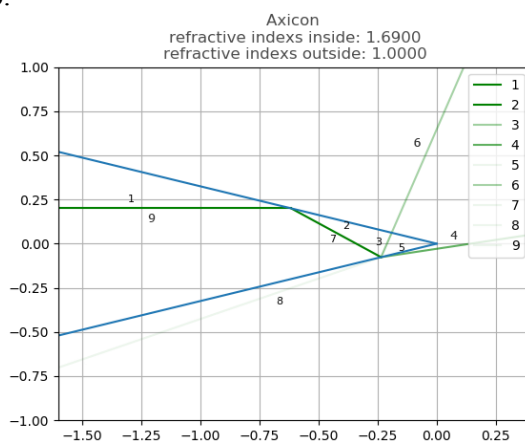


**Рисунок 1.** Ход луча в аксиконе с углом раскрытия  $\alpha = 10^\circ$ .

Из рис. 1 видно, что луч света при параллельном падении на аксикон имеет два полных внутренних отражения (падающие лучи 1 и 2) прежде чем выйти за границы аксикона (луч 5). При каждом следующем отражении луч, падающий на противоположную сторону конуса, имеет все меньший угол падения. И уже 8-ой луч падает приблизительно под прямым углом и совпадает с лучом 6.

### 2.1 Расчет коэффициентов отражения и пропускания

На рис. 2 изображен ход луча в аксиконе с углом при вершине 18 градусов. Показатель преломления материала аксикона равен 1,69, а окружающей среды равен 1,0. Сначала луч света (луч 1) входит в основание аксикона параллельно оптической оси. Первое взаимодействие с рабочей поверхностью аксикона состоит в полном внутреннем отражении (луч 2). Далее луч 2 падает на рабочую поверхность аксикона и испытывает преломление (луч 4) с частичным отражением (луч 3). Луч 3 падает на границу сред под прямым углом и практически вся его энергия выходит с лучом 6.

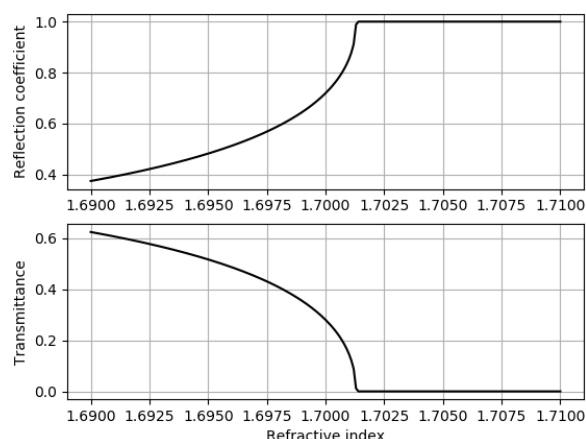


**Рисунок 2.** Ход луча в аксиконе с углом раскрытия  $\alpha = 18^\circ$ .

Рассмотрим распределение энергии луча 2 по лучам 3 и 4. Для расчета интенсивности преломленной и отраженной электромагнитной волны луча были использованы формулы Френеля. Рассматривалась р-поляризация. Зависимость коэффициентов преломления и пропускания от показателя преломления материала аксикона показана на рисунке 3. Показатель преломления варьировался от 1,69 до 1,71 с шагом дискретизации 0.0001 (200 итераций).

Как видно из рисунка 3 с постепенным увеличением показателя преломления аксикона коэффициент пропускания убывает, а отражения возрастает. Это происходит до тех пор, пока в аксиконе не происходит явление полного внутреннего отражения, когда вся световая энергия от падающего луча переходит к отраженному лучу.

На рис. 4 показаны совмещенные графики, где можно увидеть, что они имеют точку пересечения рисунок 4. При значении показателя преломления аксикона  $n = 1,6956$  энергия падающего луча 2 поровну распределяется между отраженным – 3-им и преломленным – 4-ым лучами.

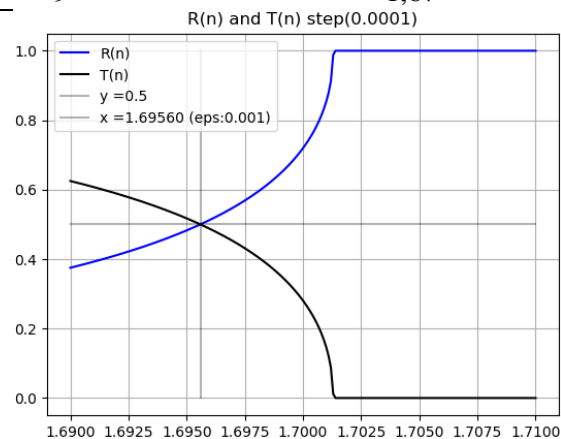


**Рисунок 3.** Зависимость коэффициентов преломления и пропускания от показателя преломления аксикона.

Однако стоит отметить, что малая часть энергии первоначального луча будет содержаться в лучах 8 и 9, которые получаются из отраженного луча 5 при падении луча 3 на границу раздела. В таблице 1 приведено процентное соотношение энергии указанных лучей по отношению к лучу 1.

**Таблица 1.** Процентное соотношение энергии лучей по отношению к лучу 1.

Номер луча	Процентное соотношение (%)
3	50,03
4	49,97
5	3,33
6	46,70
8	1,66
9	1,67



**Рисунок 4.** Зависимость коэффициентов преломления и пропускания от показателя преломления аксикона.

## 2.2 Структура программы

На рисунке 5 изображена структурная схема взаимосвязи типов элементов присутствующих в программе. Данная диаграмма классов позволяет разграничивать ответственность между сущностями и облегчает дальнейшую разработку.

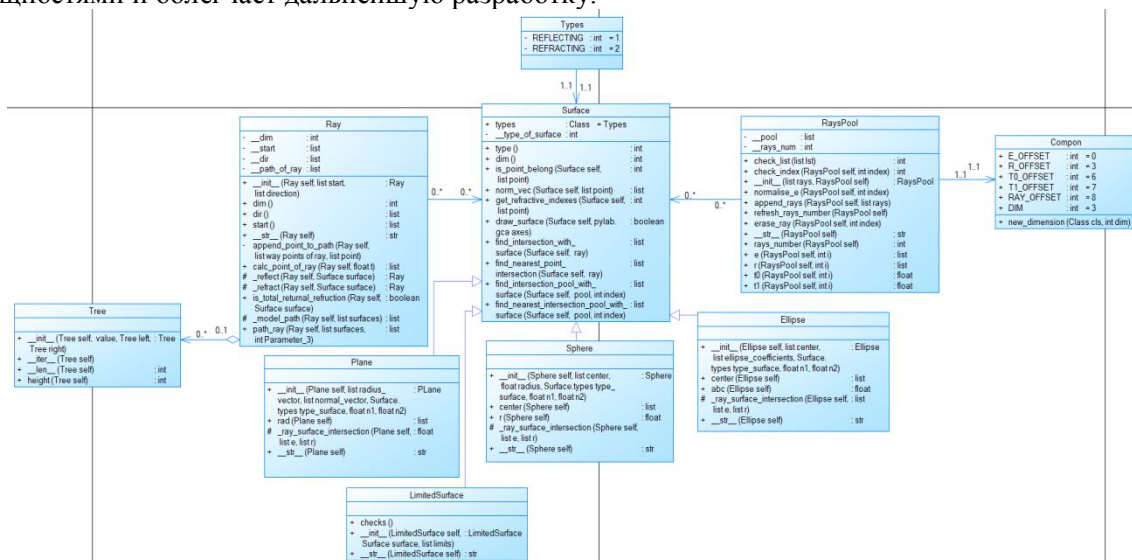


Рисунок 5. Диаграмма классов.

## 3. Заключение

В данной работе кратко описана разработанная программа, реализующая алгоритм трассировки лучей. С помощью разработанной программы рассчитан ход лучей в аксиконе с малым углом раскрытия. Показан сложный характер рассеяния света на аксиконе. Рассчитаны коэффициенты Френеля при отражении и преломлении лучей на поверхности аксикона для различных значений показателя преломления аксикона. Найдены значения показателя преломления материала аксикона, при которых энергия делится пополам ( $n = 1.695$ ), и когда энергия уходит по отраженному лучу ( $n = 1.7013$ ).

## 4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-29-20045-мк, 20-37-70025, 18-37-00056 мол\_a), государственному заданию 3.3025.2017/4.6 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/Ч3363/26).

## 5. Литература

- [1] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- [2] Анализ перспективности использования метода трассировки лучей в 3D моделировании // Информационный портал Pandia, 2010 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/79/390/27350.php>.
- [3] Брундасов, С.М. Компьютерная графика: учебник для вузов – Брянск: БГТУ, 2004. – 241 с.
- [4] Устинов, А.В. Дифракция на аксиконе с учётом нескольких внутренних отражений / А.В. Устинов, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 500-507. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-500-507.

# Calculation of the rays path in an axicon with a small opening angle

M.S. Gubaev<sup>1</sup>, S.A. Degtyarev<sup>1,2</sup>, A.V. Ustinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** Program has been developed that allows one to calculate the path of rays through refractive surfaces. Development was conducted in programming language Python 3.7. Also the class diagram was build. The program allows you to build a tree of rays, while taking into account the reflection and refraction on the surface. The beam path through a two-dimensional axicon with a small opening angle is calculated.