

УДК 535.312:535.313.1:535.314

Л. А. ВЕЛИЧКО, Т. Л. КУШНЕР, О. Ф. САВЧУК
Брест, БрГТУ

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТРАНСФОРМАЦИИ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ОДНОРОДНЫХ СРЕД

Законы геометрической оптики, такие как закон прямолинейного распространения света, закон отражения, закон преломления, которые были сформулированы на основе обобщения опытных данных, опираются на понятие прямой линии. В то же время в оптике формулируется закон независимости световых пучков. И здесь для понимания явлений более сложных, чем рассматриваемые в геометрической оптике, принимаются во внимание волновые свойства света, и эти явления описываются законами физической оптики.

Световой луч является абстракцией, но о нем можно говорить, поскольку данное понятие входит в дефиницию светового пучка, состоящего из множества лучей. В английском языке различают понятия *ray* – луч, *beam* – луч, пучок лучей. С геометрией пучка неразрывно связано понятие волнового фронта, геометрического места точек, до которых волны от вторичных источников, согласно принципу Гюйгенса, дошли одновременно.

В случае распространения света в центрированных и нецентрированных оптических системах важными являются понятия «параллельный пучок лучей» и «параксиальный пучок лучей». Лишь параксиальные пучки лучей в отсутствие аберраций точку изображают точкой, прямую – прямой и плоскость – плоскостью. На практике, однако, под параксиальным пучком лучей обычно понимают пучок лучей, проходящих под конечными – до нескольких градусов – углами, для которых отступления от строгих соотношений настолько малы, что ими можно пренебречь (критерии малости могут быть различными в рассматриваемых задачах). Область вокруг оптической оси системы, в которой лучи можно считать параксиальными, тоже называется параксиальной или областью Гаусса [1, с. 297].

В настоящей статье приведены некоторые аспекты трансформации световых пучков на границе раздела двух однородных прозрачных сред. Кроме того, мы посчитали возможным привести вывод одной из формул геометрической оптики, который редко встречается в учебной литературе.

Пусть на плоскую границу раздела двух сред с оптическими плотностями n_1 и n_2 падает нормально параллельный пучок лучей. В этом случае волновой фронт является плоским и для падающей, отраженной и прелом-

ленной волн не претерпевает трансформации. Ширина пучка остается постоянной.

При наклонном падении параллельного пучка лучей на плоскую границу раздела двух сред с оптическими плотностями n_1 и n_2 происходит изменение поперечного сечения пучка преломленных лучей, т. е. изменяются размеры волнового фронта (рисунок 1).

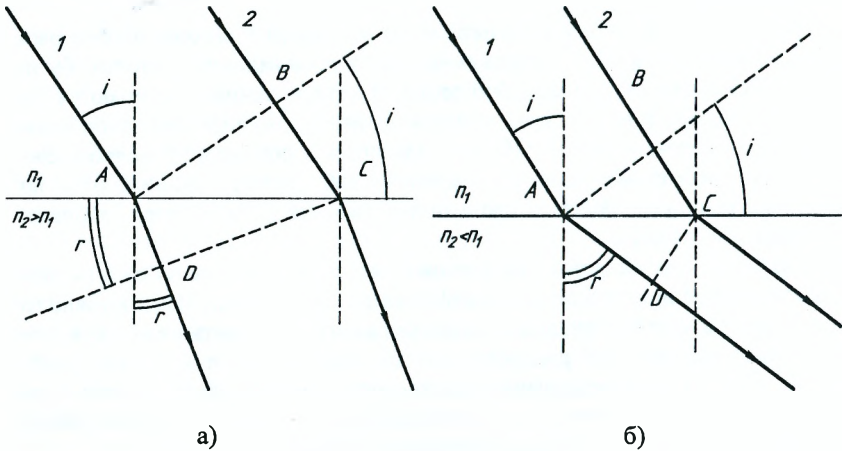


Рисунок 1 – Изменение размеров волнового фронта при наклонном падении параллельного пучка лучей на плоскую границу раздела двух сред с оптическими плотностями n_1 и n_2 : а) при падении из оптически менее плотной среды в более плотную; б) при падении из оптически более плотной среды в менее плотную

В падающем пучке ширина фронта выражается формулой:

$$AB = AC \cdot \cos i, \quad (1)$$

где i – угол падения (символьное обозначение i от английского слова *incident* – падающий).

В преломленном пучке ширина фронта запишется в виде:

$$CD = AC \cdot \cos r, \quad (2)$$

где r – угол преломления (символьное обозначение r от английского слова *refracted* – преломленный).

Из уравнений (1) и (2) имеем

$$\frac{CD}{AB} = \frac{AC \cdot \cos r}{AC \cdot \cos i} = \frac{\cos r}{\cos i}. \quad (3)$$

Анализируя выражение (3), сформулируем выводы. При $n_2 > n_1$ угол падения больше угла преломления, следовательно, $CD > AB$, т. е. сечение пучка преломленных лучей увеличивается в сравнении с сечением падающего пучка (рисунок 1а); соответственно при $n_1 > n_2$ угол падения меньше угла преломления, следовательно, $AB > CD$, а сечение пучка преломленных лучей уменьшается в сравнении с сечением падающего пучка (рисунок 1б). В обоих случаях, рассмотренных выше, волновой фронт остается плоским.

Пучок расходящихся лучей – более часто встречающееся понятие в физической оптике, чем пучок параллельных лучей. Одним из нестандартных примеров в литературе, описывающих возможности получения расходящегося пучка, является косо падение узкого пучка света на гладкую боковую поверхность цилиндрического стержня [2, с. 21]. После отражения световой пучок имеет конусовидную форму, следовательно, будет расходящимся. Наиболее традиционным описанием распространения света «внутри конуса» является пример из жизни. Если в солнечный день в темной комнате в плотной шторе сделать отверстие, то при наблюдении сбоку виден светящийся конус. Свет геометрически формируется в виде пучка расходящихся лучей, волновой фронт которого представляет собой часть сферической выпуклой поверхности. Ниже будут рассмотрены направления смещения вершины светового пучка.

Рассмотрим поведение расходящегося пучка лучей, падающего на плоскую границу раздела двух оптических однородных сред с различной оптической плотностью (рисунок 2). Накладываем условие: $n_2 > n_1$. Точечный источник света S , от которого распространяются лучи, называется действительной вершиной пучка. На рисунке 2а лучи 1 и 2 ограничивают в плоскости падения конус падающего света. Лучи 1' и 2' ограничивают конус света после преломления. Продолжения лучей 1' и 2' в среде показателем преломления n_1 пересекаются. Точка пересечения S_1 называется мнимой вершиной светового пучка. Таким образом, на границе раздела двух оптических однородных сред при распространении расходящегося пучка лучей из менее плотной среды в более плотную происходит его трансформация. «Расходимость» пучка уменьшается, а вершина пучка «отодвигается» от границы раздела в направлении, противоположном направлению распространения света. Волновой фронт является сферическим.

Пусть на эту же границу при $n_2 > n_1$ падает сходящийся пучок лучей, ограничиваемый в плоскости падения лучами 1 и 2, пересекающимися в мнимой вершине S . Преломленные лучи 1' и 2' пересекутся в точке S_1 , действительной вершине светового пучка. Таким образом, граница раздела двух сред при падении на нее сходящегося пучка лучей и условия $n_2 > n_1$ удаляет вершину пучка в направлении распространения падающего света. Мнимая вершина пучка трансформируется в действительную (рисунок 2б).

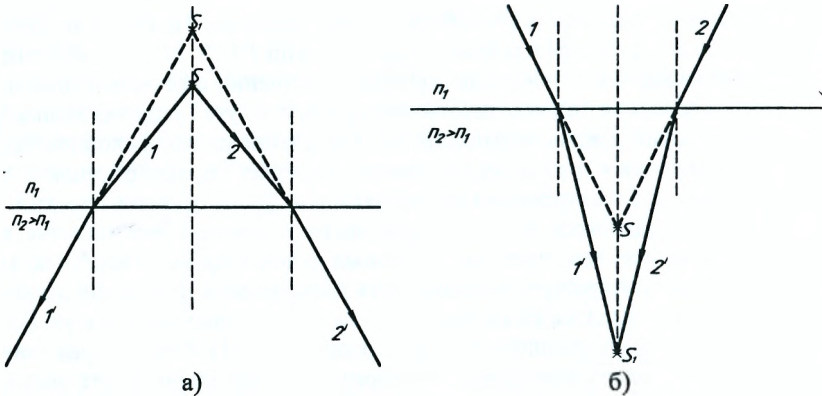


Рисунок 2 – Поведение расходящегося пучка лучей, падающего на плоскую границу раздела двух оптических однородных сред из оптически менее плотной среды в более плотную: а) при падении расходящегося пучка лучей; б) при падении сходящегося пучка лучей

Если поставить условие, что свет распространяется из оптически более плотной среды в менее плотную, т. е. $n_1 > n_2$, то влияние границы раздела будет таким: при расходящемся пучке света вершина пучка S_1 приблизится к границе, смещаясь по направлению падающего света, а при сходящемся пучке вершина S_1 тоже приблизится к границе, но уже в направлении противоположном направлению распространения света.

Неким аналогом параксиального пучка лучей можно считать расходящийся или сходящийся пучок лучей с малым углом расходимости (сходимости) не только в центрированной, но и в любой оптической системе. В этом случае допустимо использование ряда математических выражений, упрощающих применение некоторых законов оптики, например закона преломления [3, с. 58].

Рассмотрим пример построения стигматического изображения в такой оптической системе, как плоскопараллельная пластинка (рисунок 3). Каждая точка изображения соответствует одной точке изображаемого оптической системой объекта. Строго говоря, подобное соответствие возможно лишь в идеальных оптических системах при условии, что отсутствуют или устранены все аберрации, и допустимо пренебречь волновыми свойствами света, в частности дифракцией. Для реальных оптических систем понятие стигматического изображения служит полезным и широко используемым приближением. Итак, приводим вывод формулы, описывающей смещение вершины пучка при прохождении света через плоскопараллельную пластинку. Рассмотрим случай падения на пластинку расходящегося пучка.

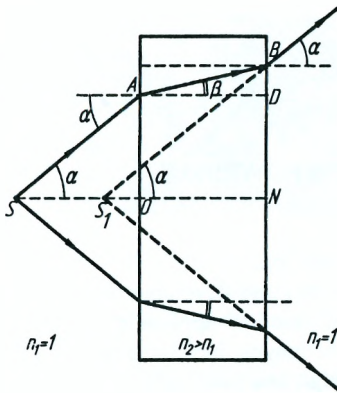


Рисунок 3 – Смещение вершины светового пучка при прохождении света через плоскопараллельную пластинку (случай падения расходящегося пучка)

Из треугольника SAO на рисунке 3 следует:

$$\sin \alpha = AO / AS. \quad (4)$$

Учитывая малость углов,

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = AO / SO. \quad (5)$$

Рассмотрим треугольник ABD с учетом аналогичного допущения

$$\sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta = BD / AD. \quad (6)$$

Рассмотрим треугольник S_1BN .

$$\sin \alpha \approx \frac{BN}{S_1N} = \frac{DN + BD}{S_1N} = \frac{AO + BD}{S_1N}. \quad (7)$$

Из закона преломления учтем, что

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta. \quad (8)$$

Вследствие малости углов заменим

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha, \quad \sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta \approx \beta. \quad (9)$$

Запишем формулу (7) с учетом (5), (6), (8), (9).

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{SO \cdot \alpha + ON \cdot \beta}{S_1N} = \frac{SO \cdot \alpha + ON \cdot \alpha / n}{S_1N} \approx \alpha. \quad (10)$$

Откуда

$$S_1N = SO + ON / n. \quad (11)$$

Выразим расстояние SS_1 из геометрических соображений.

$$SS_1 = SO + ON - S_1N = SO + ON - SO + ON / n = ON(n - 1) / n. \quad (12)$$

Величина SS_1 показывает приближение вершины светового пучка при прохождении света через плоскопараллельную пластинку в случае падения на пластинку расходящегося пучка лучей. А как будет со сходящимся?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маскевич, А. А. Оптика : учебное пособие / А. А. Маскевич. – М. : Инфра-М, 2017. – 656 с.
2. Поль, Р. В. Оптика и атомная физика / Р. В. Поль. – М. : Наука, 1966. – 552 с.
3. Русинов, М. М. Техническая оптика : учеб. пособие для вузов / М. М. Русинов. – М. : Либроком, 2017. – 488 с.