

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тульский государственный педагогический университет  
им. Л. Н. Толстого»

# **ФИЗИКА**

## **ОПТИКА**

*Учебное пособие*

**В двух частях**

**Часть 1**

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА**

Издание второе,  
переработанное и дополненное

Тула  
Издательство ТГПУ им. Л. Н. Толстого  
2013

ББК 22.34я73

Ф48

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор *Ю. П. Смирнов*  
(ТулГУ);

доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Панин*  
(ТГПУ им. Л. Н. Толстого)

**Физика. Оптика:** Учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 1. Геометрическая  
Ф48 оптика / Авт.-сост. А. В. Парамонов, Л. В. Никольская, И. А. Кле-  
пинина, А. В. Ермолов.– Изд. второе, перераб. и доп.– Тула: Изд-во  
Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2013.– 146 с.

ISBN 978-5-87954-789-4 (ч. 1)

ISBN 978-5-87954-788-7

Пособие содержит теоретический материал, освещающий основ-  
ные вопросы геометрической оптики (основные понятия и определения,  
методы построения и расчета изображений, даваемых оптическими сис-  
темами и т. д.), и задачи, сопровождаемые подробным решением.

Издание предназначено студентам естественнонаучных специаль-  
ностей университетов, для которых физика является профилирующим  
предметом.

**ББК 22.34я73**

ISBN 978-5-87954-789-4 (ч. 1)  
ISBN 978-5-87954-788-7

© Авторы-составители А. В. Парамонов,  
Л. В. Никольская, И. А. Клепинина,  
А. В. Ермолов, 2013

© ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Глава I. Геометрическая оптика. ....	4
§ 1. Основные законы геометрической оптики .....	4
§ 2. Линзы .....	7
§ 3. Зеркала .....	9
3.1. Плоское зеркало. ....	9
3.2. Сферическое зеркало. ....	9
§ 4. Описание оптических систем .....	11
4.1. Элементы оптических систем. ....	11
4.2. Взаимное расположение элементов в оптической системе. ....	13
4.3. Правила знаков. ....	15
4.4. Предмет и изображение в оптической системе. ....	16
§ 5. Теория идеальных оптических систем.....	17
5.1. Линейное, угловое, продольное увеличение.....	18
5.2. Кардинальные точки и отрезки. ....	19
§ 6. Аберрации оптических систем .....	21
§ 7. Построение изображений в оптических системах .....	27
§ 8. Основные соотношения параксиальной оптики .....	29
8.1. Вывод зависимости между положением и размером предмета и изображения. ....	29
8.2. Угловое увеличение и узловые точки.....	31
8.3. Частные случаи положения предмета и изображения. ....	32
8.4. Связь продольного увеличения с поперечным и угловым. ....	33
8.5. Диоптрическое исчисление. ....	35
8.6. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца. ....	35
Глава II. Решение задач. ....	37
Литература.....	145

# ГЛАВА I. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

## § 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Оптика, как раздел электродинамики, включает теорию распространения светового излучения в неоднородной, неизотропной среде. В этом случае световая волна описывается уравнениями Максвелла, точное решение которых представляет сложную математическую проблему. Причина в том, что в этих уравнениях электромагнитные свойства произвольной среды представлены не коэффициентом преломления, а двумя наборами 18 величин, называемых тензорами диэлектрической и магнитной проницаемостей.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho;$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = -\int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \quad \int_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV;$$

$$\oint_{(L)} \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}} + I_{\text{см}}; \quad \oint_{(S)} \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Задача существенно упрощается в приближении геометрической оптики: если в каждом небольшом участке пространства фронт волны можно рассматривать как плоскую поверхность, то можно говорить о направлении распространения волны, перпендикулярном волновому фронту. В геометрической оптике вводят математическое понятие луч – линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения фронта волны в окрестности этой точки. Это приближение автоматически приводит к введению двух различных коэффициентов преломления, определяющих траектории лучей, различающихся поляризацией. В изотропной, однородной среде коэффициенты преломления одинаковы для лучей различной поляризации.

Геометрическая оптика рассматривает световую волну как пучок лучей, ортогональных к волновым фронтам, совершенно отвлекаясь от волновой природы света. Поэтому основные законы геометрической оптики – закон отражения и закон преломления – полностью игнорируют дифракционные явления. Это означает, что должны выполняться следующие условия:

1) длина волны  $\lambda \ll a$ , где  $a$  — характерные размеры неоднородности,

2) площадь сечения неоднородности значительно больше площади первых зон Френеля: расстояние  $r$  от неоднородности до точки наблюдения удовлетворяет условию  $\lambda r \ll a^2$ ,

3) приращение показателя преломления на расстояниях порядка длины волны  $\lambda$  достаточно мало.

Пусть точечный источник света  $O$  расположен в однородной среде с показателем преломления  $n$ ;  $P(x, y, z)$  - точка наблюдения,  $s(x, y, z) = OP$  расстояние между точками  $O$  и  $P$ . Фаза

сферической волны  $\varphi = \omega t - \frac{\omega l}{v}$ . Очевидно,  $\tau = \frac{s}{v} = \frac{ns}{c}$  - время

распространения фронта волны. Лучи представляют собой пучок прямых, исходящих из точки  $O$ . Фазу волны можно представить в

виде  $\varphi = \omega t - \frac{\omega l}{c}$ . Величину  $l = ns$  называют оптической длиной

отрезка  $OP$ . Траектория луча света — отрезок прямой  $OP$ , соответствующий наименьшему значению оптической длины.

В 1662 г. П.Ферма установил основной закон геометрической оптики: световой луч, соединяющий две точки, представляет собой кривую, для которой оптическая длина принимает наименьшее значение.

Основной задачей геометрической оптики является определение траекторий лучей в оптически неоднородной среде, показатель преломления которой  $n = n(x, y, z)$  является функцией координат.

Принцип Ферма позволяет получить уравнения для радиус-вектора произвольной точки луча, проходящего через любую точку заданного волнового фронта.

В оптически неоднородной среде луч представляет собой кривую линию. Разобьем ее на  $N$  малых отрезков длиной  $\Delta S_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ). Выберем на каждом отрезке точку  $M_k$ . Обозначим через  $n_k$ , значение показателя преломления в точке  $M_k$ . Оптической длиной кривой, соединяющей точки  $L$  и  $P$ , называют величину  $l = l(x, y, z)$ :

$$l = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \max |\Delta S_k| \rightarrow 0}} \sum_{k=1}^N n_k \Delta S_k .$$

Время распространения малого участка фронта световой волны по траектории луча  $\tau = \frac{l}{c}$ .

С современной точки зрения принцип Ферма отражает волновую природу света: в точку наблюдения приходит волна, фаза которой равна экстремальному значению оптической длины:

$$\varphi_{\mathcal{O}} = \omega t - \frac{\omega l_{\mathcal{O}}}{c} .$$

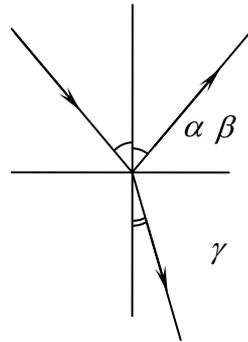
Еще до установления природы света были известны следующие законы:

Закон прямолинейного распространения света: свет в оптически однородной и изотропной среде распространяется прямолинейно.

Световой луч – линия, вдоль которой переносится световая энергия. В однородной среде лучи света представляют собой прямые линии.

Закон независимости световых пучков: эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

Закон отражения: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол падения равен углу отражения  $\angle \alpha = \angle \beta$ .



**Рис. 1.** Преломление и отражение света на границе раздела двух сред

Закон преломления (рис. 1): луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред и равна  $n_{21}$ , где  $n_{21}$  – относительный показатель преломления второй среды относительно первой, который равен отношению абсолютных показателей преломления двух сред.

Следовательно, закон преломления (рис.1) будет иметь вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}, \quad n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Абсолютным показателем преломления среды называется величина  $n$ , равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме  $c$  к их фазовой скорости  $v$  в среде.

Поскольку фазовая скорость  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ , то  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ , где  $\epsilon$

и  $\mu$  – соответственно электрическая и магнитная проницаемость среды.

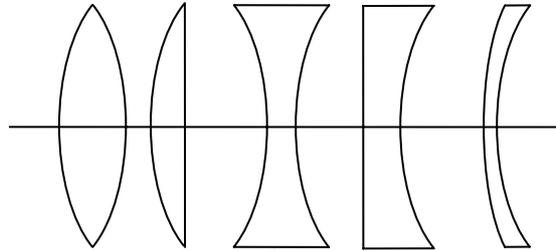
## § 2. Линзы

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон криволинейной поверхностью. (В частном случае одна из поверхностей может быть плоской) [7].

По внешней форме линзы делятся на:

- 1) двояковыпуклые;
- 2) плосковыпуклые;
- 3) двояковогнутые;
- 4) плосковогнутые;
- 5) выпукло-вогнутые.

Формы линз изображены на рис. 2.



**Рис. 2.** Форма линз

Линза называется тонкой, если ее толщина значительно меньше, чем радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$  обеих поверхностей. На оптических схемах линзы обычно обозначают двунаправленной стрелкой.

Радиус кривизны  $R > 0$  для выпуклой поверхности;  $R < 0$  для вогнутой.

Прямая проходящая через центры кривизны поверхностей линзы называется главной оптической осью.

Оптическим центром линзы (обычно обозначается  $O$ ) называется точка, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходя сквозь нее не преломляются. Побочными оптическими осями называются прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью.

Фокусом линзы  $F$  называется точка, лежащая на главной оптической оси, в которой пересекаются лучи параксиального (приосевого) светового пучка, распространяющиеся параллельно главной оптической оси.

Фокальной плоскостью называется плоскость, проходящая через фокус линзы перпендикулярно ее главной оптической оси.

Фокусным расстоянием называется расстояние между оптическим центром линзы  $O$  и ее фокусом  $F$ .

$$F = \frac{1}{(n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}.$$

Формула тонкой линзы:

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}.$$

Величина  $D = \frac{1}{F}$  называется оптической силой линзы. Ее единица – диоптрия (*дптр*) - оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

Линзы с положительной оптической силой являются собирающими, с отрицательной - рассеивающими.

В отличие от собирающей линзы, рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. В мнимом фокусе сходятся (после преломления) воображаемые продолжения лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси.

### § 3. ЗЕРКАЛА

#### 3.1. Плоское зеркало

Простейшим оптическим устройством, способным создавать изображение предмета, является плоское зеркало. Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от зеркальной поверхности. Это изображение является мнимым, так как оно образуется пересечением не самих отраженных лучей, а их продолжений в «зазеркалье».

Вследствие закона отражения света мнимое изображение предмета располагается симметрично относительно зеркальной поверхности. Размер изображения равен размеру самого предмета.

#### 3.2. Сферическое зеркало

Сферическим зеркалом называют зеркально отражающую поверхность, имеющую форму сферического сегмента. Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют оптическим центром зеркала.

Вершину сферического сегмента называют полюсом. Прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется главной оптической осью сферического зеркала. Главная оптическая ось выделена из всех других прямых, проходящих через оптический центр, только тем, что она является осью симметрии зеркала.

Сферические зеркала бывают вогнутыми и выпуклыми. Если на вогнутое сферическое зеркало падает пучок лучей, параллельный главной оптической оси, то после отражения от зеркала лучи пересекутся в точке, которая называется главным фокусом зеркала  $F$ . Расстояние от фокуса до полюса зеркала называют фокусным расстоянием и обозначают той же буквой  $F$ . У вогнутого сферического зеркала главный фокус действительный. Он расположен посередине между центром и полюсом зеркала.

Следует иметь в виду, что отраженные лучи пересекаются приблизительно в одной точке только в том случае, если падающий параллельный пучок был достаточно узким (так называемый параксиальный пучок).

Главный фокус выпуклого зеркала является мнимым. Если на выпуклое зеркало падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после отражения в фокусе пересекутся не сами лучи, а их продолжения.

Фокусным расстоянием сферических зеркал приписывается определенный знак: для вогнутого зеркала  $F = \frac{R}{2}$ , для выпуклого

$F = -\frac{R}{2}$ , где  $R$  – радиус кривизны зеркала.

Положение изображения и его размер можно также определить с помощью формулы сферического зеркала:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

здесь  $d$  – расстояние от предмета до зеркала,  $f$  – расстояние от зеркала до изображения.

Линейное увеличение сферического зеркала  $\Gamma$  определяется как отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = -\frac{f}{d}.$$