

Экзамен. Обыкновенный и необыкновенный луч.

Рассмотрим одноосный кристалл. Выберем направление оси z вдоль оптической оси кристалла. Тогда $\varepsilon_x = \varepsilon_y \neq \varepsilon_z$. Для наглядности будем считать, что ось z направлена вертикально.

Рассмотрим произвольное центральное сечение лучевого эллипсоида.

Одна полуось сечения эллипсоида обязательно горизонтальна и равна радиусу окружности горизонтального сечения эллипсоида.

Длина горизонтальной полуоси сечения равна $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_x}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_y}}$ лучевой

скорости одного из лучей. Следовательно, для любого направления луча \vec{S} скорость одного из лучей равна $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_x}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_y}}$ и не зависит от направления луча.

Это — так называемый обыкновенный луч, так как его поведение аналогично поведению луча в изотропной среде, где так же скорость луча не зависит от направления.

Длина второй полуоси сечения лучевого эллипсоида зависит от направления сечения. Следовательно, скорость второго луча зависит от его направления. Поэтому второй луч называют необыкновенным.

Рассмотрим плоскопараллельную пластину, вырезанную из кристалла.

Неполяризованный свет, падая на кристалл под произвольным углом, расщепляется на два луча.

Если пластину вращать вокруг ее нормали, то два луча выходящие из пластинки в общем случае будут смещаться, оставаясь параллельными падающему на пластинку лучу.

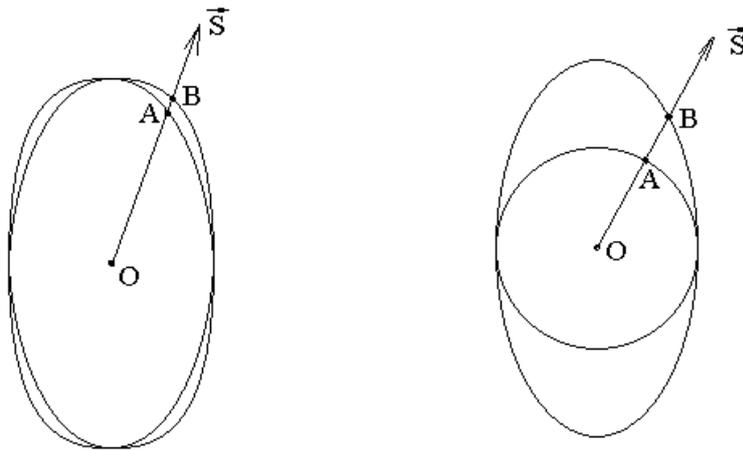
Для одноосных кристаллов один из лучей на выходе из пластины не смещается при ее вращении вокруг нормали. Не смещающийся луч называют обыкновенным лучом, а смещающийся — необыкновенным. В двуосных кристаллах оба луча — необыкновенные лучи.

Факультативно. Построение двойной лучевой поверхности с помощью лучевого эллипсоида.

Не надо путать лучевую поверхность с лучевым эллипсоидом.

На левом рисунке ниже изображена двойная лучевая поверхность для двуосного кристалла. Каждая из двух поверхностей обладает вертикальной и горизонтальной плоскостью симметрии. Плоскость рисунка тоже является плоскостью симметрии каждой из двух поверхностей.

На правом рисунке изображена двойная лучевая поверхность для одноосного кристалла, для которого одна из двух лучевых поверхностей окажется сферой, а вторая — эллипсоидом вращения с вертикальной осью симметрии. Эллипсоид может быть вытянут или приплюснут вдоль вертикальной оси.



Из точки O для каждого направления луча \vec{S} отложим два отрезка OA и OB , равных лучевым скоростям двух лучей в этом направлении \vec{S} . Значения этих лучевых скоростей равны длинам полуосей сечения лучевого эллипсоида. При этом рассматривается сечение перпендикулярное выбранному направлению луча \vec{S} . Каждая из двух точек A и B при изменении направления луча \vec{S} создает свою поверхность. Для двуосного кристалла каждая лучевая поверхность — поверхность четвертого порядка. Для одноосного кристалла скорость одного из лучей не зависит от направления луча, и соответствующая лучевая поверхность — сфера, для второго луча лучевая поверхность — эллипсоид вращения с вертикальной осью симметрии.

Факультативно. Построения Гюйгенса в изотропной и анизотропной среде.

Построения Гюйгенса нужны для того, чтобы из положения фронта волны в некоторый момент времени получить положение того же фронта волны в более поздний момент. Построения Гюйгенса выполняются в соответствии с принципом Гюйгенса.

Согласно принципу Гюйгенса каждая точка фронта волны является вторичным источником волны, исходящей из этой точки во все стороны. Для некоторого промежутка времени τ рассматривается множество точек, в которые приходят волны, излученные в начале этого промежутка вторичными источниками, расположенными на исходном фронте волны. Множество точек образует объем. Граница этого объема в направлении движения волны и будет согласно построениям Гюйгенса новым фронтом волны.

Для фронта волны в виде очень короткого светового импульса принцип Гюйгенса выполняется строго, для монохроматической волны — приближенно. Заметные отклонения от принципа Гюйгенса могут быть в том случае, когда амплитуда волны в разных точках фронта сильно различается.

Сначала излишне подробно проведем построения Гюйгенса в изотропной среде, чтобы затем аналогичные построения в кристалле были понятнее.

Рассмотрим границу вакуума и изотропной среды.

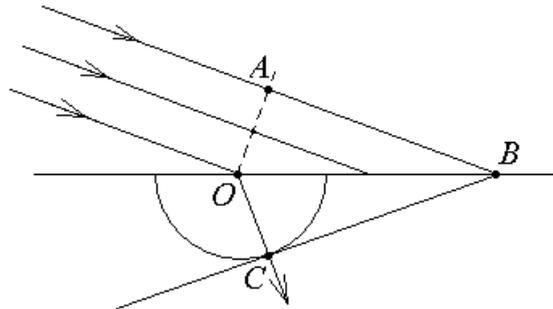
$V_1 = c$ — скорость света в вакууме.

$V_2 = \frac{c}{n}$ — скорость света в изотропной среде.

Пусть на границу раздела падает плоская световая волна. Ей соответствует параллельный пучок лучей.

Алгоритм построения Гюйгенса схематически представим в виде следующей логической цепочки:

$O \Rightarrow A \Rightarrow B \Rightarrow \tau \Rightarrow$ сфера \Rightarrow
 \Rightarrow новый фронт волны \Rightarrow направление преломленного луча.



1). Выберем точку O на границе двух сред.

2). Построим фронт падающей волны, проходящий через точку O , и выберем точку A на этом фронте и одновременно в плоскости падения волны (в плоскости рисунка).

3). Проведем луч падающей волны через точку A и найдем точку B — точку пересечения луча и границы среда-вакуум.

4). Найдем время τ распространения луча от A до B : $\tau = \frac{AB}{c}$.

5). Построим в среде под границей раздела полусферу с центром в точке O и радиусом $V_2\tau = \frac{c}{n}\tau$.

Предположим, что на границу среды падает не монохроматическая волна, а короткий световой импульс с фронтом OA .

В начальный момент времени промежутка времени τ свет находится на фронте OA .

Пока свет за время τ проходит путь из точки A в точку B , из точки O он может достичь любой точки на поверхности сферы радиусом $\frac{c}{n}\tau$.

Из симметрии задачи следует, что фронт волны в среде после преломления — плоский фронт. Эта новая плоскость фронта волны проходит через точку B и касается сферы с центром в точке O , потому что в соответствии с принципом Гюйгенса из точки O за время τ свет должен дойти до этой плоскости нового фронта волны и не может зайти за эту плоскость.

Через точку B можно по-разному провести плоскость касательную к сфере, поэтому уточним положение касательной плоскости.

При построении рисунка мы подразумевали, что волновой вектор \vec{k} падающей волны лежит в плоскости рисунка. Тогда перпендикуляр к рисунку, проходящий, например, через точку A , целиком лежит на фронте волны, проходящем через эту точку A . Аналогично, перпендикуляр к рисунку, проходящий через точку B , лежит на фронте падающей волны, проходящем через точку B .

Если перпендикуляр к рисунку, проходящий через точку B , лежит на фронте волны падающей на границу, то все точки на этом перпендикуляре имеют одинаковую фазу колебаний. Следовательно, перпендикуляр лежит и на фронте волны под границей среды.

Таким образом, касающаяся сферы плоскость фронта волны в среде проходит не только через точку B , но и через перпендикуляр к рисунку, проходящий через точку B . Такая плоскость единственная.

6). Строим плоскость нового фронта преломленной волны через перпендикуляр к рисунку, проходящий через точку B , так чтобы плоскость фронта касалась сферы с центром в точке O и радиусом $\frac{c}{n}\tau$.

7). Свет из точки O должен был дойти до нового фронта волны, следовательно, из точки O свет идет в точку касания сферы с новым фронтом. Обозначим эту точку касания, как точку C .

8). OC — направление преломленного луча.

9). Из построений Гюйгенса можно вывести закон преломления (закон Снеллиуса). И действительно.

$$\text{С одной стороны } OB = \frac{AB}{\sin(\angle AOB)} = \frac{\frac{c}{n_1}\tau}{\sin(\alpha_1)} = \frac{c\tau}{n_1 \sin(\alpha_1)},$$

$$\text{а с другой стороны } OB = \frac{OC}{\sin(\angle CBO)} = \frac{\frac{c}{n_2}\tau}{\sin(\alpha_2)} = \frac{c\tau}{n_2 \sin(\alpha_2)}, \text{ тогда}$$

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2).$$

Теперь проведем аналогичные построения Гюйгенса для кристалла.

Алгоритм построения Гюйгенса для границы вакуум-кристалл:

$O \Rightarrow A \Rightarrow B \Rightarrow \tau \Rightarrow$ лучевая поверхность \Rightarrow
новый фронт преломленной волны \Rightarrow новый преломленный луч \Rightarrow

$$\vec{V}_л \Rightarrow \vec{V}_ф.$$

Рассмотрим теперь этот алгоритм подробнее по пунктам.

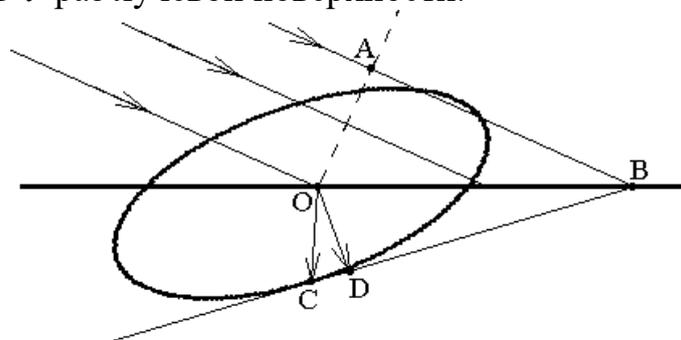
1). Выберем точку O на поверхности кристалла.

2). Построим фронт падающей волны, проходящей через точку O , и выберем точку A на этом фронте волны в плоскости падения.

3). Проведем луч падающей волны из точки A до поверхности кристалла и получим точку B .

4). Найдем время распространения волны от точки A до точки B : $\tau = \frac{AB}{c}$.

5). Построим лучевую поверхность с центром в точке O , растянутую в τ раз. Чтобы не загромождать рисунок построим только одну из двух лучевых поверхностей. Свет с лучевой скоростью \vec{V}_l за время τ достигнет из точки O точек растянутой в τ раз лучевой поверхности.



Лучевая поверхность обладает симметрией. Оси ее симметрии совпадают с главными диэлектрическими осями кристалла.

6). Перпендикуляр к рисунку, проходящий через точку B , лежит на фронте волны, падающей на границу кристалла, и на фронте преломленной волны. Проведем плоскость нового фронта волны через перпендикуляр, проходящий через точку B , так, чтобы плоскость нового фронта касалась растянутой в τ раз лучевой поверхности, построенной вокруг точки O .

7). Построим преломленный луч из точки O в точку касания C . Заметим, что точка C не обязана лежать в плоскости рисунка.

8). $\vec{V}_l = \frac{\vec{OC}}{\tau}$ — лучевая скорость преломленной световой волны.

9). Опустим из точки O перпендикуляр на фронт преломленной волны, касающийся растянутой в τ раз лучевой поверхности с центром в точке O . Обозначим основание перпендикуляра, как точку D . Точка D обязана находиться в плоскости рисунка.

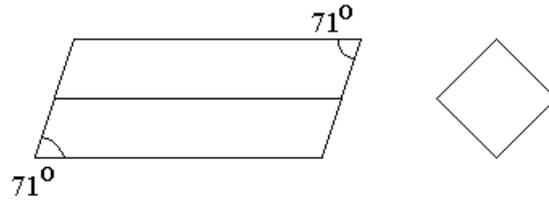
10). $\vec{V}_\phi = \frac{\vec{OD}}{\tau}$ — фазовая скорость преломленной световой волны, равная

составляющей вектора \vec{V}_l в направлении перпендикулярном фронту преломленной волны.

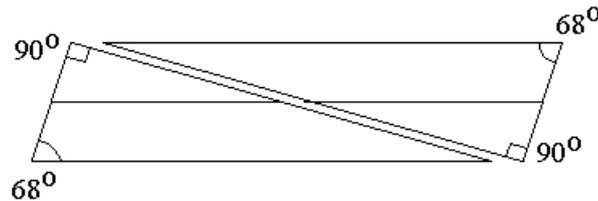
11). Аналогичные построения нужно провести и для второй лучевой поверхности, чтобы найти направление, лучевую и фазовую скорости второго преломленного луча.

Экзамен. Поляризаторы на основе призм Николя и Волластона.

Николь изготавливают из естественного кристалла исландского шпата, который имеет форму ромбоэдра:

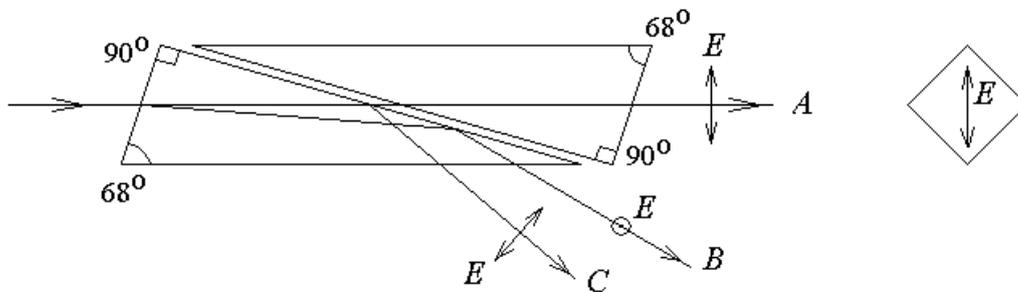


Боковые грани ромбоэдра стачивают так, чтобы превратить угол 71° в 68° . Кристалл разрезают вдоль диагональной плоскости, предварительно подобрав длину кристалла так, чтобы получить углы 90° :



Исландский шпат — одноосный кристалл с показателями преломления $n_o = 1.66 = \sqrt{\epsilon_x} = \sqrt{\epsilon_y}$ для обыкновенного луча и $n_e = 1.49 = \sqrt{\epsilon_z}$ для необыкновенного луча, когда он поляризован вдоль оптической оси z .

Две части склеивают канадским бальзамом, который имеет промежуточный показатель преломления $n = 1.53$.



Луч B , поляризованный перпендикулярно плоскости рисунка, испытывает полное внутреннее отражение, поэтому в прошедшем горизонтально луче A нет поляризации перпендикулярной плоскости рисунка. Прошедший луч A полностью поляризован. Так из неполяризованного света на входе призмы Николя на ее выходе получается линейно поляризованный свет.

Лучи B и C после отражения от канадского бальзама попадают на зачерненные нижние грани призмы Николя и полностью поглощаются.

Слой канадского бальзама должен быть достаточно толстым, чтобы можно было пренебречь амплитудой плоской неоднородной волны при полном внутреннем отражении на дальней границе слоя канадского бальзама.

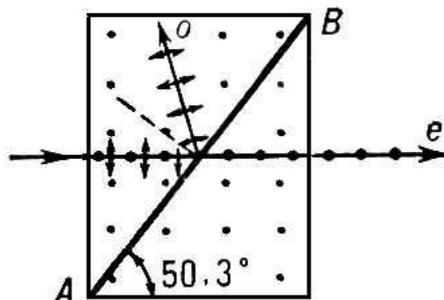
На экзамене достаточно сказать, что Николь делают из одноосного кристалла, который разрезают и склеивают прозрачным клеем с показателем

преломления промежуточным между показателями преломления обыкновенного n_o и необыкновенного n_e лучей кристалла.

Одна из двух линейных поляризаций испытывает полное внутреннее отражение в месте склейки, а вторая поляризация частично проходит и дает линейно поляризованный свет на выходе из призмы Николя.

Факультативная вставка.

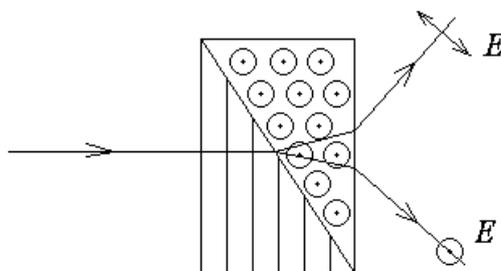
На практике в последнее время вместо призмы Николя обычно используется поляризационная призма Глана-Тейлора. В этой призме две призмы из исландского шпата разделены воздушным зазором вместо зазора с канадским бальзамом.



Угол 50.3° треугольной кристаллической призмы рассчитан таким образом, что полное внутреннее отражение для одной из двух линейных поляризаций света происходит при нормальном падении света на одну из граней призмы Глана-Тейлора.

Конец факультативной вставки.

----- Призма Волластона.



Одноосный кристалл разрезают, одну половину поворачивают на 90° и две половины склеивают так, чтобы ось кристалла в двух половинах образца была направлена взаимно ортогонально. На рисунке это вертикальное направление для левой части кристалла и направление перпендикулярное плоскости рисунка для правой части кристалла.

Если толщина клея мала (оптический контакт), то величина его показателя преломления не важна.

На склеенной границе луч одной поляризации переходит в среду с большим показателем преломления, а луч другой поляризации переходит в среду с меньшим показателем преломления. Один луч при этом поворачивает вверх в сторону нормали к границе, а другой — вниз.

Два луча расходятся на склеенной границе. При выходе из кристалла лучи расходятся еще больше.

Геометрическая оптика.

Экзамен. Центрированные оптические системы. Оптическая ось.

Центрированная оптическая система — это такая система, в которой все преломляющие границы сферические, и центры всех сфер лежат на одной прямой, называемой оптической осью системы.



Экзамен. Приближение параксиальной оптики.

Будем рассматривать только меридиональные лучи, то есть лучи, которые лежат в одной плоскости с оптической осью системы.

Приближение параксиальной оптики состоит в выполнении двух условий.

- 1). Все рассматриваемые лучи имеют малый угол с оптической осью.
- 2). Каждый луч, проходя преломляющую границу, находится на малом расстоянии от оптической оси. Расстояние мало по сравнению с радиусом кривизны преломляющей границы.

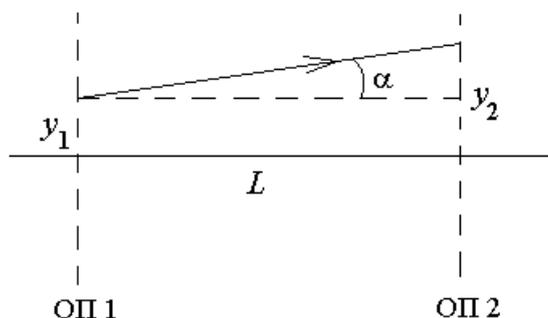
Следующие вопросы будем рассматривать в приближении параксиальной оптики, если не оговорено обратное условие.

Экзамен. Опорная плоскость. Трансляция луча.

Опорная плоскость — любая плоскость перпендикулярная оптической оси.

Трансляция луча — распространение луча в однородной среде.

Рассмотрим трансляцию луча между двумя опорными плоскостями.



Меридиональный луч не может выйти из плоскости первоначального направления луча и оптической оси. Будем считать, что плоскость рисунка совпадает с этой плоскостью. Будем считать, что ось x направлена вдоль оптической оси, а ось y направлена в плоскости рисунка перпендикулярно оптической оси.

Чтобы описать поведение меридионального луча достаточно рассмотреть два параметра луча:

1). y — y -координата луча в плоскости рисунка, модуль которой равен расстоянию от луча до оптической оси.

2). α — угол между лучом и оптической осью, который будем считать положительным, если в направлении луча y -координата луча возрастает.

В приближении парааксиальной оптики тангенс малого угла α равен его синусу и равен самому углу:

$$\operatorname{tg}(\alpha) \approx \sin(\alpha) \approx \alpha.$$

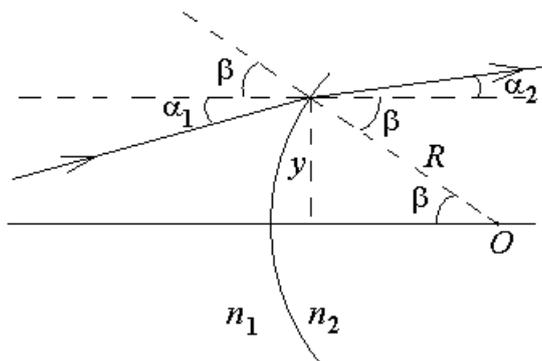
Из рисунка видно, как изменяется параметр y при переходе от одной опорной плоскости к другой:

$y_2 = y_1 + \alpha L$, где L — расстояние между опорными плоскостями, α — угол между лучом и оптической осью.

$$y_2 = y_1 + \alpha L \text{ — уравнение трансляции луча.}$$

Экзамен. Преломление света на сферической границе.

Рассмотрим преломление на сферической границе двух сред.



Здесь $(\alpha_1 + \beta)$ — угол падения света на сферическую границу раздела двух сред, $(\alpha_2 + \beta)$ — угол преломления.

По закону Снеллиуса: $n_1 \sin(\alpha_1 + \beta) = n_2 \sin(\alpha_2 + \beta)$.

В приближении парааксиальной оптики все углы малы, тогда:

$$n_1(\alpha_1 + \beta) = n_2(\alpha_2 + \beta) \quad \Rightarrow$$

$$n_2\alpha_2 = n_1\alpha_1 - (n_2 - n_1)\beta.$$

Из рисунка видно, что $\beta = \frac{y}{R}$, где R — радиус кривизны сферической границы двух сред, тогда

$n_2\alpha_2 = n_1\alpha_1 - \frac{n_2 - n_1}{R}y$ — уравнение преломления луча на сферической границе.

Экзамен. Координаты луча. Матрица трансляции. Матрица преломления на сферической границе.

Уравнение трансляции луча и уравнение преломления луча на сферической границе могут быть выражены через такие параметры луча, как y и $n\alpha$. Эти параметры будем называть координатами луча.

Сформируем из двух координат луча вектор $\begin{pmatrix} y \\ n\alpha \end{pmatrix}$ в некотором абстрактном двумерном пространстве.

Рассмотрим, как новые координаты луча выражаются через его старые координаты при трансляции луча и при преломлении на сферической границе.

При трансляции луча:

$$\begin{cases} y_2 = y_1 + \frac{L}{n} n_1 \alpha_1 \\ n_2 \alpha_2 = n_1 \alpha_1 \end{cases}.$$

Индекс 1 относится к параметрам луча в первой опорной плоскости, а индекс 2 — во второй.

Уравнения для трансляции луча можно переписать в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ n_2 \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ n_1 \alpha_1 \end{pmatrix}.$$

Назовем матрицу $\hat{M} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ матрицей трансляции.

Заметим, что коэффициенты матрицы не зависят от координат луча y и $n\alpha$. То есть матрица одинакова для всех лучей связывающих две опорные плоскости.

Теперь обсудим изменение координат луча при преломлении на сферической границе.

Будем считать, что две опорные плоскости для преломления луча на сферической границе расположены вплотную с двух сторон сферической границы. Тогда y координата луча почти не изменяется при переходе от одной опорной плоскости к другой.

Преломление на сферической границе следующим образом изменяет координаты луча

$$\begin{cases} y_2 = y_1 \\ n_2 \alpha_2 = -\frac{n_2 - n_1}{R} y_1 + n_1 \alpha_1 \end{cases}.$$

Уравнения преломления луча на сферической границе тоже можно переписать в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ n_2 \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{R} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ n_1 \alpha_1 \end{pmatrix}.$$

Назовем матрицу $\hat{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{R} & 1 \end{pmatrix}$ матрицей преломления на

сферической границе.

Заметим, что, как и для матрицы трансляции, все коэффициенты матрицы преломления на сферической границе не зависят от координат луча y и $n\alpha$. То есть матрица преломления на сферической границе также одинакова для всех лучей связывающих две опорные плоскости.

Экзамен. Матричная оптика.

Одна и та же матрица преобразует координаты любого луча при переходе от одной опорной плоскости к другой. Будем называть эту матрицу матрицей перехода от первой опорной плоскости ко второй.

В центрированной оптической системе с лучом могут происходить только две вещи: трансляция и преломление на сферической границе. Любая оптическая схема может быть представлена, как несколько последовательно включенных элементов, каждый из которых либо трансляция, либо преломление на сферической границе.

Рассмотрим два последовательных элемента оптической схемы и три соответствующие им опорные плоскости. Пусть \hat{M}_1 — матрица перехода от первой опорной плоскости ко второй, \hat{M}_2 — матрица перехода от второй опорной плоскости к третьей. Тогда

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} y_2 \\ n_2 \alpha_2 \end{pmatrix} = \hat{M}_1 \begin{pmatrix} y_1 \\ n_1 \alpha_1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} y_3 \\ n_3 \alpha_3 \end{pmatrix} = \hat{M}_2 \begin{pmatrix} y_2 \\ n_2 \alpha_2 \end{pmatrix} \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} y_3 \\ n_3 \alpha_3 \end{pmatrix} = \hat{M}_2 \cdot \hat{M}_1 \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ n_1 \alpha_1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$\hat{M} = \hat{M}_2 \hat{M}_1$ — матрица перехода от первой опорной плоскости к третьей.

Следовательно, матрицы последовательных элементов оптической системы перемножаются. Причем сомножители матриц элементов оптической схемы расположены в обратном порядке по отношению к расположению элементов оптической схемы вдоль луча.

Перемножая матрицы оптических элементов, можно найти матрицу перехода между двумя любыми опорными плоскостями. Таким образом, любой оптической схеме можно сопоставить матрицу.

Экзамен. Оптическая сила сферической границы. Оптическая сила тонкой линзы.

Будем обозначать оптическую силу буквой Φ .

Для сферической границы двух сред по определению:

$$\Phi \equiv \frac{n_2 - n_1}{R}.$$

Тогда матрицу сферической границы можно переписать в новом виде:

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{R} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi & 1 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим две близко расположенные друг к другу сферические границы:

$$\hat{M} = \hat{M}_2 \hat{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Phi_1 - \Phi_2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из правой части равенства видно, что две близко расположенных границы имеют такую же матрицу, как и одна сферическая граница с суммарной оптической силой. В этом смысле оптические силы близко расположенных сферических границ складываются $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

Рассмотрим тонкую линзу в вакууме.

Линза — это две сферические границы. Для одной сферической границы оптическая сила $\Phi = \frac{n_2 - n_1}{R}$.

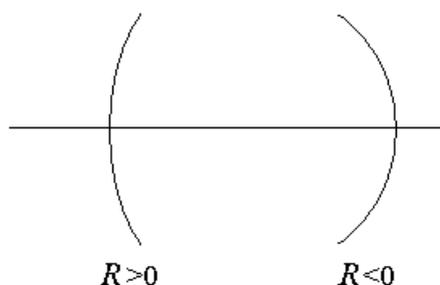
Для тонкой линзы в вакууме:

$$\Phi = \frac{n-1}{R_1} + \frac{1-n}{R_2} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \text{ тогда}$$

$$\Phi = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \text{ — оптическая сила тонкой линзы в вакууме, где}$$

для двояковыпуклой линзы $\begin{cases} R_1 > 0 \\ R_2 < 0 \end{cases}$.

Введем правило знаков для радиуса кривизны сферической границы.



Будем считать, что $R > 0$, если центр сферы находится справа от сферической границы, то есть имеет положительную координату вдоль оптической оси, если начало координат принять в месте расположения сферической границы.

