

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики полимеров и кристаллов

ЗАДАЧА

**Оптические свойства кристаллов**

Москва, 2010

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Изучаются особенности распространения света в кристаллах. Наблюдаются явления интерференции света - коноскопические фигуры при прохождении света через кристаллические пластины. Измеряется угол между оптическими осями двуосных кристаллов.

### § 1. Введение.

Изучение особенностей распространения света в кристаллах является предметом кристаллооптики. В изотропных средах при нормальных условиях скорость распространения света одинакова по всем направлениям. Следовательно, такие среды характеризуются лишь одним показателем преломления. Если величины показателей преломления откладывать в известном масштабе в направлениях распространения световой волны, то полученная поверхность будет представлять собой сферу. К изотропным средам относятся жидкости, стекла и кристаллы, обладающие так называемой кубической симметрией.

В оптически анизотропных средах, к которым относятся все остальные кристаллы, скорость распространения света зависит от направления и состояния поляризации света. И по любому направлению в кристалле, в общем случае, свет распространяется с двумя различными скоростями и, следовательно, каждое направление в такой среде характеризуется двумя показателями преломления.

Следует отметить, что в кристаллах скорость распространения энергии (лучевая скорость) и скорость распространения волнового фронта (волновая скорость) различны как по величине, так и по направлению, в то время, как для изотропной среды оба вектора совпадают между собой.

Геометрические построения для отыскания величин показателей преломления двух волн, распространяющихся в кристаллах при заданном направлении волновой нормали.

Распространение света в анизотропной среде сопровождается поляризацией света. Как указано выше, при заданном направлении волновой нормали в кристалле могут распространяться две волны с различными скоростями и с взаимно-перпендикулярной ориентацией векторов электрической индукции  $\vec{D}$ .

С другой стороны, задание направления вектора  $\vec{D}$  однозначно определяет фазовую скорость распространения волны  $V$ . Как следует из уравнений Максвелла, фазовая скорость зависит от направления колебаний вектора  $\vec{D}$  следующим образом:

$$V^2 = c^2 \left( \frac{D_x^2}{|\vec{D}|^2 n_p^2} + \frac{D_y^2}{|\vec{D}|^2 n_m^2} + \frac{D_z^2}{|\vec{D}|^2 n_g^2} \right), \quad (1)$$

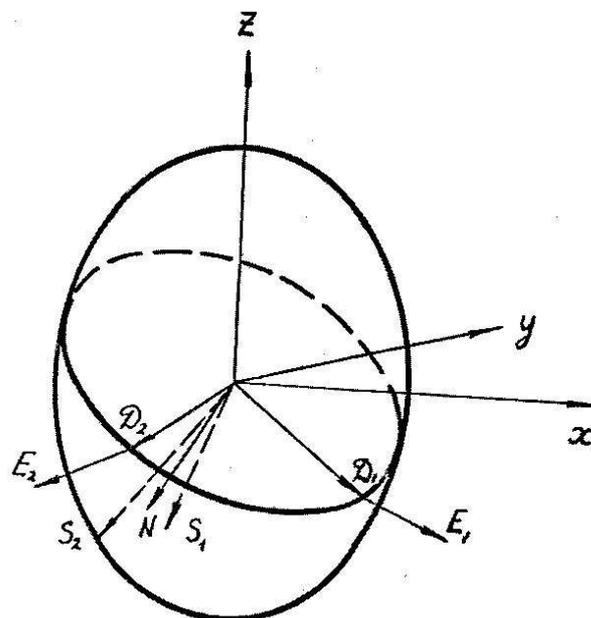
где  $c$  - скорость света в пустоте, а  $n_p, n_m, n_g$  - главные показатели преломления кристалла, а оси  $X, Y, Z$  выбраны так, чтобы они совпадали с главными диэлектрическими осями кристалла. Отсюда следует, что если за направление радиуса вектора принять направление колебаний вектора  $\vec{D}$ , а его длину принять равной показателю преломления, то конец радиуса вектора опишет эллипсоид - так называемый эллипсоид Коши. Часто его называют эллипсоидом волновых нормалей или оптической индикатрисой. Уравнение эллипсоида имеет вид:

$$\frac{x^2}{n_p^2} + \frac{y^2}{n_m^2} + \frac{z^2}{n_g^2} = 1, \quad (2)$$

где

$$x = \frac{D_x}{|\vec{D}|} \cdot \frac{c}{V}; y = \frac{D_y}{|\vec{D}|} \cdot \frac{c}{V}; z = \frac{D_z}{|\vec{D}|} \cdot \frac{c}{V}$$

Полуосями этого эллипсоида являются так называемые главные показатели преломления кристалла:  $n_g$  -наибольший,  $n_m$  - средний,  $n_p$  - наименьший. Оптическая индикатриса жестко связана с решеткой кристалла, поэтому



**Рис. 1.** Эллипсоид Коши (оптическая индикатриса двуосного кристалла). Построение направлений колебаний векторов  $\vec{D}_1$  и  $\vec{D}_2$  и при заданном направлении волновой нормали  $\vec{N}$  и соответствующих им ( $\vec{D}_1$  и  $\vec{D}_2$ ) векторов  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  в направлении лучей  $\vec{S}_1$  и  $\vec{S}_2$ .

главные показатели преломления соответствуют вполне определенным направлениям распространения света в кристалле. Зная их можно построить и саму индикатрису.

Для графического определения показателя преломления в заданном направлении волновой нормали  $\vec{N}$  нужно взять центральное сечение эллипсоида Коши, перпендикулярное к этому направлению. Согласно принципу построения эллипсоида, показатели преломления двух волн, распространяющихся в выбранном направлении, соответствуют величинам полуосей эллипсов сечения, а направление последних определяет соответствующие этим волнам направления колебаний векторов электрической индукции  $\vec{D}_1$  и  $\vec{D}_2$  (см. рис. 1). Для отыскания направлений

колебаний векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ , соответствующих этим двум волнам, можно также воспользоваться эллипсоидом Коши. Направление колебаний векторов  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  совпадают с направлениями нормалей к эллипсоиду, восстановленных в конечных точках векторов  $\vec{D}_1$  и  $\vec{D}_2$ . Направления же 2-х лучей, соответствующих данному направлению нормали, можно найти, учитывая, что луч или вектор Пойтинга, всегда лежит в плоскости, проходящей через волновую нормаль и вектора  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ , и перпендикулярен вектору  $\vec{E}$ . Итак, волне с заданным направлением волновой нормали  $\vec{N}$  будут соответствовать два луча  $\vec{S}_1$  и  $\vec{S}_2$ , лежащих в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях,  $\vec{S}_1$  - в плоскости содержащей векторы  $\vec{N}$ ,  $\vec{E}_1$  и  $\vec{D}_1$  и  $\vec{S}_2$  - в плоскости векторов  $\vec{N}$ ,  $\vec{E}_2$  и  $\vec{D}_2$ .

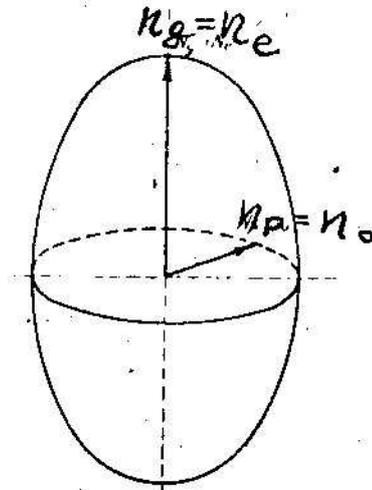
### Оптическая классификация кристаллов.

Кристаллы по своим оптическим свойствам делятся на три различные группы – двуосные, одноосные и изотропные. К двуосным кристаллам относятся низкосимметричные кристаллы, характеризующиеся тремя различными главными показателями преломления.

Кристаллы с повышенной симметрией, относящиеся к так называемым средним сингониям, характеризуются наличием лишь двух показателей преломления:  $n_p$  и  $n_g$ . В связи с этим оптическая индикатриса вырождается в эллипсоид вращения. В этом случае кристаллы обладают одной оптической осью, так как эллипсоид вращения имеет одно круговое сечение. В изотропных телах оптическая индикатриса вырождается в сферу.

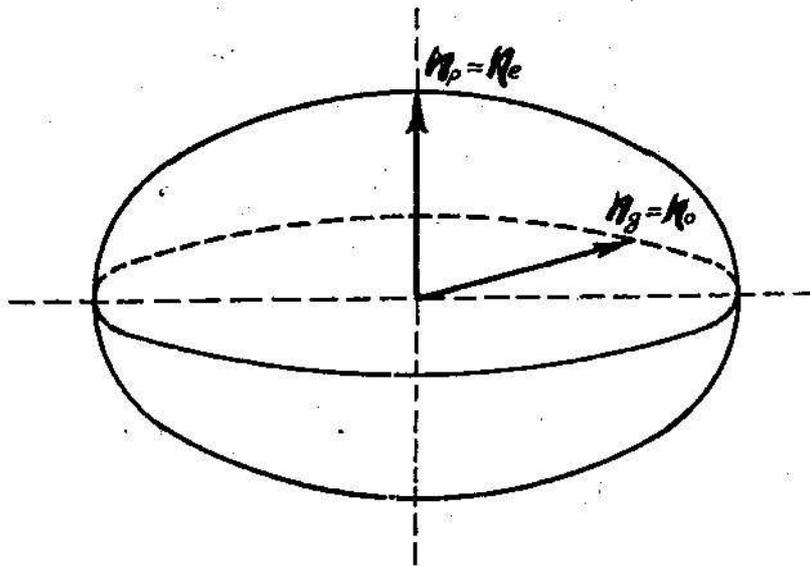
В зависимости от соотношения между главными показателями преломления различают оптически положительные и отрицательные кристаллы. Если с оптической осью одноосного кристалла совпадает ось  $n_g$  индикатрисы (вытянутый эллипсоид вращения, рис. 2), то знак кристалла

положительный, если же с ней совпадает ось  $n_p$ . (сплюснутый эллипсоид вращения), то кристалл считается оптически отрицательным (рис. 3).



**Рис. 2.** Оптическая индикатриса одноосного положительного кристалла.

Оптический знак одноосного кристалла можно охарактеризовать еще следующим образом. В одноосном кристалле одна из двух волн, идущих в заданном направлении волновой нормали, распространяется со скоростью, которая не зависит от направления волновой нормали света. Эта волна называется обыкновенной. Другая волна, скорость распространения которой зависит от направления волновой нормали, носит название необыкновенной. Соответствующие этим волнам показатели преломления обозначаются через  $n_o$  и  $n_e$ . Если необыкновенному лучу соответствует больший показатель преломления, т.е. если  $n_e > n_o$ , то кристалл оптически положителен, если же наоборот  $n_e < n_o$ , то кристалл отрицательный.



**Рис. 3.** Оптическая индикатриса одноосного отрицательного кристалла.

Двуосные кристаллы различаются по оптическому знаку следующим образом: если оптическая ось кристалла образует меньший угол с осью  $Z$  индикатрисы, то кристалл положителен, а если меньший угол образуется с осью  $X$ , то кристалл оптически отрицателен. В первом случае ось  $Z$ , а во втором ось  $X$  являются биссектрисами острого угла между оптическими осями, равного  $2\gamma$ . Таким образом, оптический знак двуосного кристалла положителен, если с биссектрисой острого угла совпадает ось  $Z$  и отрицателен, если с ней совпадает ось  $X$ .

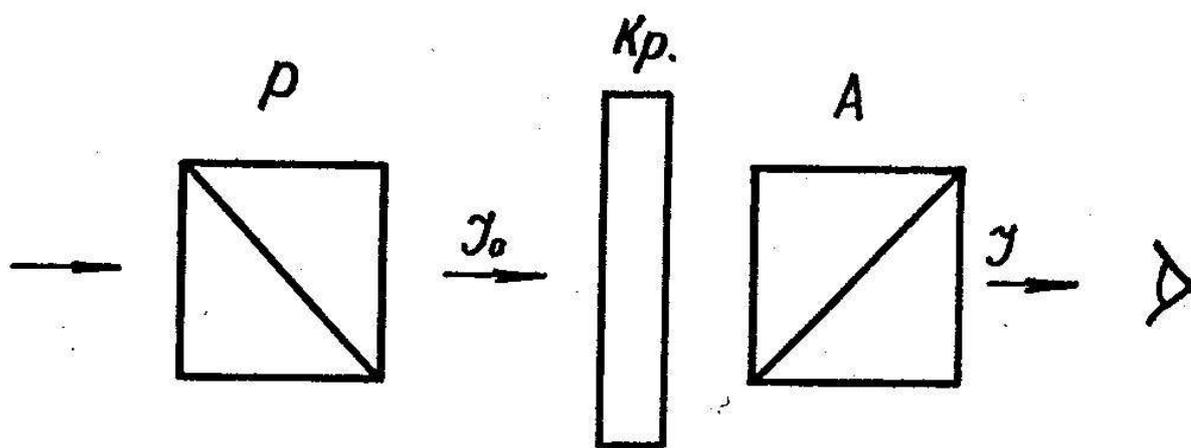
### Интерференционные явления, возникающие при прохождении света через кристаллические пластинки.

Наблюдение явлений интерференции света при прохождении поляризованного света через плоско-параллельные пластинки позволяет выяснить ряд свойств кристаллов, таких, например, как оптический класс кристаллов (т.е. является ли кристалл изотропным, одноосным или двуосным), позволяет отделить монокристаллические образцы от поликристаллических, определить оптический знак кристалла и ряд других свойств.

Начнем с рассмотрения явлений интерференции света при нормальном падении параллельного пучка поляризованного света на плоско-параллельную пластину, т.е. поместим кристаллическую пластинку между поляризатором и анализатором и осветим систему параллельным пучком света с длиной волны  $\lambda$  (см. рис 4). Тогда в кристалле будут распространяться две волны, поляризованные в 2-х взаимно-перпендикулярных плоскостях. Эти волны будут распространяться с разной скоростью. Поэтому на выходе пластинки будут складываться два взаимно-перпендикулярных колебания, имеющие разность фаз  $\delta$ , приобретенную за счет различной скорости распространения в кристалле с толщиной  $d$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_1 - n_2), \quad (3)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  - два значения показателя преломления света для двух волн различной поляризации. В результате на выходе пластинки свет будет уже не линейно поляризованным, а эллиптически поляризованным. В частном случае этот эллипс может вырождаться в прямую. Так, если разность фаз кратна  $2\pi$ , то свет будет поляризован так же как и до входа в пластинку.



**Рис. 4.** Оптическая схема для наблюдения интерференции света, прошедшего через кристаллическую пластинку.  $P$  – поляризатор,  $A$  – анализатор,  $Кр$  – кристаллическая плоско-параллельная пластинка.

Интенсивность света, прошедшего через анализатор, будет зависеть от взаимной ориентации анализатора и поляризатора. В том случае, когда анализатор и поляризатор скрещены, интенсивность прошедшего света определяется выражением (см., напр., /4/)

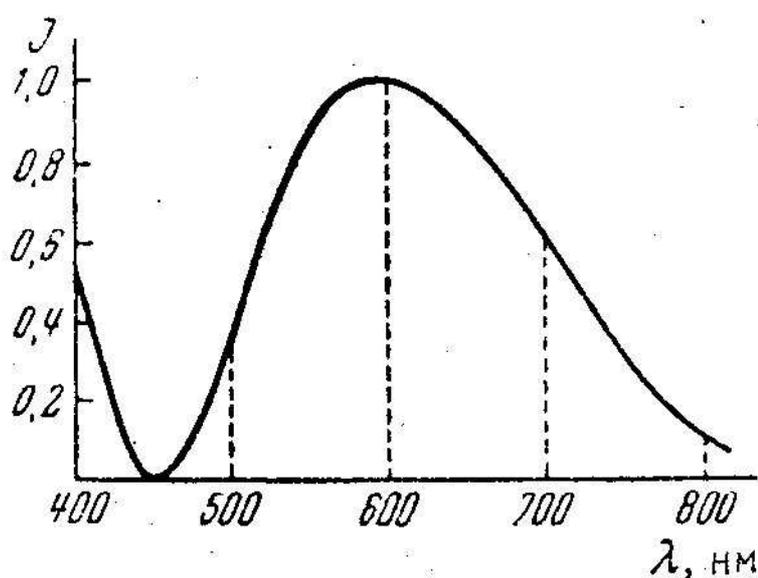
$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

где  $I_0$  - интенсивность света, падающего на кристалл, а  $\varphi$  - угол между направлением колебаний, пропускаемых поляризатором, и направлением вектора индукции  $\vec{D}$  одной из двух волн, могущих распространяться в кристалле (здесь не учитываются потери на отражение).

Если на кристалл падает не монохроматический свет, а белый, и если принять, что амплитуды колебаний в падающем свете для всех длин волн одинаковы, то при прохождении такого света через систему, изображенную на рис. 6, спектральный состав света будет изменен, поскольку величина  $\delta$  зависит от длины волны. Из формулы (4) сразу видно, что если оставить неподвижными анализатор и поляризатор, то при вращении кристалла вокруг оптической оси интенсивность прошедшего света четыре раза обратится в нуль при повороте пластинки на  $360^\circ$  одновременно для света всех длин волн. Интенсивность света обращается в нуль, когда направление колебаний векторов индукции волн, могущих распространяться в кристалле, совпадает с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором.

Второй важный вывод, вытекающий из рассмотрения прохождения белого света через оптическую систему, изображенную на рис. 6, состоит в том, что распределение интенсивности в спектре прошедшего света как уже было сказано будет иным по сравнению с падающим. Свет тех длин волн, для которых состояние поляризации на выходе пластинки остается таким же, каким оно было на входе, не пройдет через анализатор. Свет этих волн будет отсутствовать в прошедшем свете. Свет близлежащий длин волн будет сильно ослаблен. Если толщина кристалла невелика, т.е., если разность хода 2-х волн, распространяющихся в кристалле не превышает нескольких длин

волн, то прошедший свет по спектральному составу будет сильно отличаться от падающего. График зависимости интенсивности прошедшего через систему света от длины волны, когда  $d(n_1 - n_2) = 600$  нм, представлен на рис. 5. Если толщина пластинки такова, что в пределах видимого света от 400-700 нм укладывается один максимум интенсивности прошедшего света, пластинка кажется окрашенной в тот цвет, которому соответствует максимальное значение интенсивности прошедшего света. Подобное рассмотрение позволяет понять принцип действия двух компенсаторов, применяемых в дальнейшем в этой задаче.



**Рис. 5.** График зависимости интенсивности (в условных единицах) света, прошедшего через систему, изображенную на рис. 4, при скрещенных поляризаторах от длины волны света

Первый компенсатор – это так называемая пластинка «чувствительного оттенка». Она представляет собой кварцевую плоско-параллельную пластинку, вырезанную параллельно оптической оси (направление оптической оси указано на оправе пластинки и обозначено там как  $N_g$ ). Толщина пластинки такова, что вносимая ею разность хода  $d(n_e - n_o) = 555$  нм. Тогда, согласно сказанному выше, свет с длиной волны 555 нм на выходе

будет иметь ту же поляризацию, что и на входе пластинки, т.е. анализатор не пропускает свет с указанной длиной волны. Таким образом, из белого света будет изъята зеленая часть спектра. Пластика будет казаться окрашенной в фиолетово-красный цвет при наблюдении в скрещенных николях. Если теперь на пути лучей ввести дополнительную разность хода, то уже при небольшом увеличении разности хода пластика кажется окрашенной в синий цвет (минимум пропускания сместится в красную сторону). Если разность хода несколько уменьшить, то окраска становится оранжево-красной. Пластика «чувствительного оттенка» применяется для обнаружения небольших разностей хода лучей.

Второй компенсатор – это кварцевый клин. Обычно он вырезан так, что угол его имеет величину около  $0.5^\circ$  и длина клина составляет  $\sim 5$  см, так что максимальная толщина клина 0.5 мм. Оптическая ось кварца обычно бывает параллельна ребру клина и ее направление указано на оправе клина (обозначение  $N_g$ ) Если такой клин поместить между скрещенными николями так, чтобы оптическая ось клина составила угол  $45^\circ$  с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором и направить на систему белый свет, то различные по толщине места клина будут окрашены в разные цвета. Наблюдаемое чередование цветов при скрещенных поляризаторах приведено в следующей таблице, где первая колонка содержит значения разности хода, вторая соответствующую ей окраску.

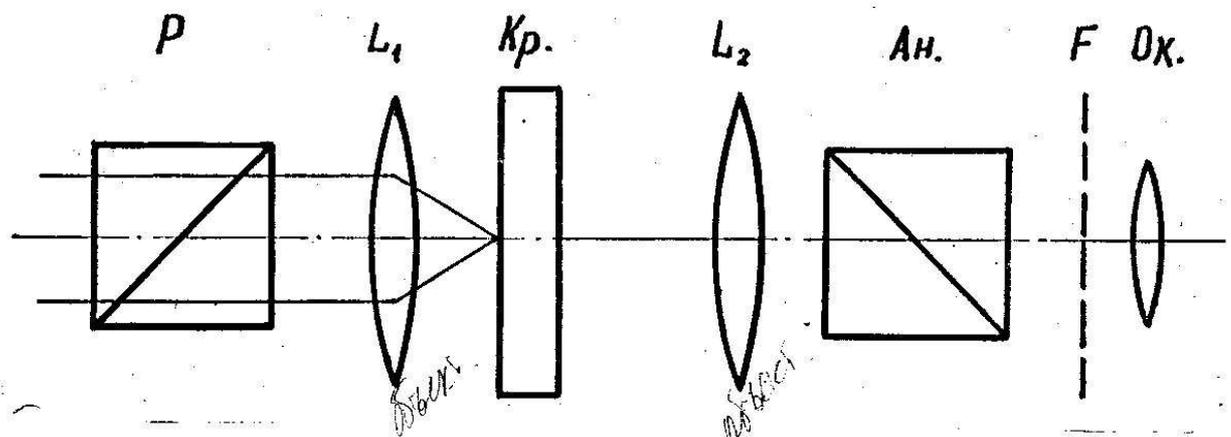
**Таблица.**

Разность хода $d(n_e - n_o)$ (нм)	Цвет в скрещенных поляризаторах	№ порядка
260	белый	1
300	желтый	
500	оранжевый	
550	красный	
565	малиновый	2
590	синий	
660	голубой	
728	зелено-голубой	
840	зелено-желтый	
910	желтый	
950	оранжевый	
1100	светло-малиновый	3
1130	серо-голубой	
1380	зеленый	
1430	желтый	
1530	оранжевый	
1650	беловато-малиновый	
1710	зеленый	4
2000	серый	
2050	светло-красный	

При разности хода, равной 555 нм, наблюдается, как мы уже говорили, фиолетово-красный оттенок, который повторяется при увеличении разности хода в два, три и т.д. раза. Поэтому все интерференционные полосы условно делятся на полосы 1, 2, 3,... порядков в зависимости от разности хода, вносимой пластинкой. При разности хода, лежащей в интервале от 0 до 555 нм, говорят о полосах первого порядка, при разности хода от 555 нм до 1100 нм говорят о полосах второго порядка и т.д. Определяемый таким образом порядок интерференции указан в третьем столбце таблицы. Пластинка «чувствительного оттенка» и кварцевый клин применяются в дальнейшем для определения оптического знака кристалла.

### Коноскопические фигуры.

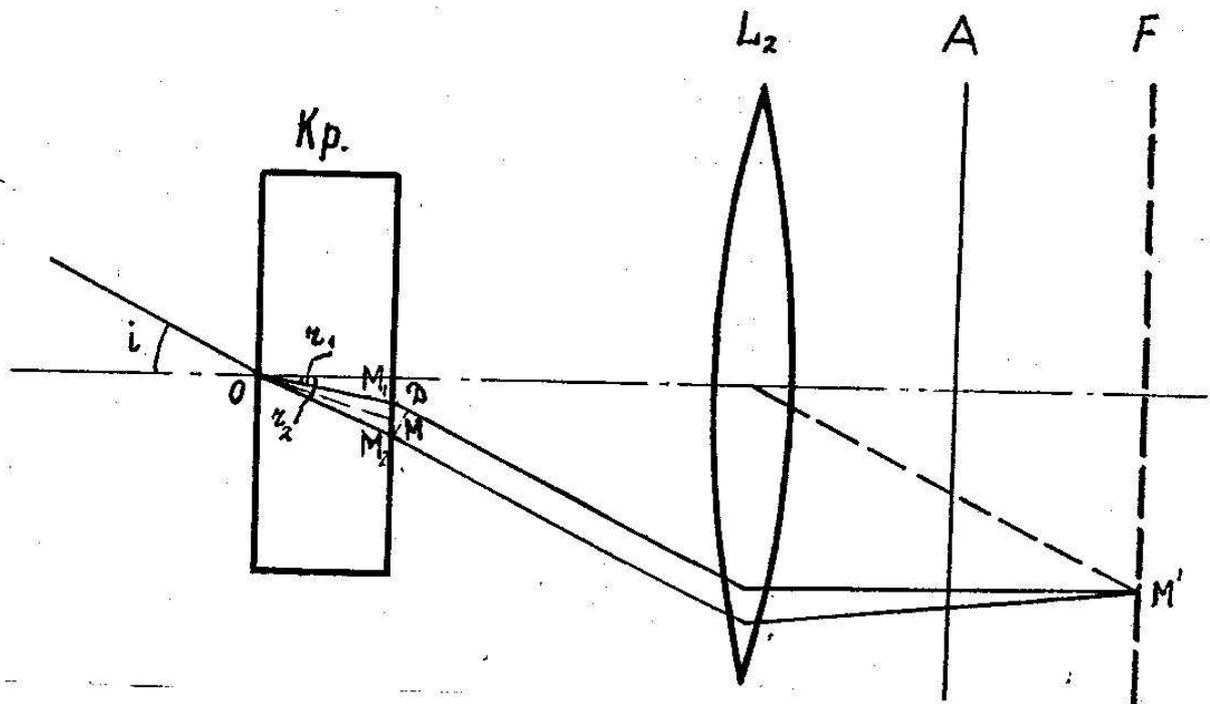
При прохождении сходящегося поляризованного светового пучка через кристалл возникают сложные интерференционные картины, которые можно наблюдать с помощью поляризационного микроскопа. Принципиальная схема показана на рисунке 6.



**Рис. 6.** Оптическая схема для наблюдения коноскопических фигур. *P* – поляризатор, *A* – анализатор, *Кр* – кристалл, *L<sub>1</sub>* – объектив, фокусирующий свет на входную поверхность кристалла; *F* – фокальная плоскость объектива *L<sub>2</sub>*, *Ок* – окуляр.

Параллельный пучок света, прошедший через поляризатор Р, фокусируется с помощью объектива  $L_1$  на входную поверхность плоско-параллельной кристаллической пластинки. Если за пластинкой поставить второй объектив и пропустить свет через анализатор А, то в фокальной плоскости  $F$  объектива  $L_2$  образуется интерференционная картина, которую можно наблюдать с помощью окуляра Ок, сфокусированного на фокальную плоскость объектива  $L_2$ .

Для выяснения вида интерференционной картины рассмотрим более подробно ход одного луча, падающего на кристалл под некоторым углом  $i$  (см. рис. 7). Внутри кристалла будут распространяться две линейно поляризованные волны, волновые вектора которых будут ориентированы под углами  $r_1$  и  $r_2$  к нормали пластинки. Из кристалла обе волны выйдут параллельно падающему свету, так что линзой  $L_2$  они соберутся в одну точку  $M'$  в фокальной плоскости объектива  $L_2$ .



**Рис. 7.** К определению разности фаз, приобретаемой двумя волнами, прошедшими кристаллическую пластинку.

Эти два луча когерентны и обладают разностью хода, поскольку они распространяются в кристалле с разной скоростью и идут по несколько различающимся путям. Эта разность хода равна:

$$\Delta = OM_1n_1 + M_1D - OM_2n_2.$$

Но учитывая, что

$$\sin i / \sin r_1 = n_1; \sin i / \sin r_2 = n_2, OM_1 = d/\cos r_1; OM_2 = d/\cos r_2;$$

получаем

$$\Delta = d(n_2\cos r_2 - n_1\cos r_1)$$

Таким образом, разность хода определяется различием скоростей или показателей преломления двух волн и различием в углах преломления. Поскольку углы преломления различаются очень немного, разность хода двух волн приближенно равна:

$$\Delta = (d/\cos r)(n_2 - n_1),$$

где  $r$  некоторое среднее значение угла преломления, а величина  $(d/\cos r)$  есть средний геометрический путь световой волны в кристалле. На рис. 7 этот средний путь  $(d/\cos r) = OM$  и показан пунктиром.

Возвращаясь к рис. 7 и учитывая последнее приближение, можно видеть, что луч, пересекший выходную поверхность пластины в точке  $M$  попадает в точку  $M'$  в фокальной плоскости линзы  $L_2$ . Луч, пересекший любую другую точку выходной поверхности пластины, попадет уже в другую точку фокальной плоскости. Таким образом, каждой точке фокальной плоскости  $M'$  будет соответствовать своя точка  $M$  на поверхности кристалла. Поэтому, учитывая это взаимно-однозначное соответствие точек  $M$  и  $M'$ , в дальнейшем мы будем говорить о точках выходной поверхности кристалла  $M$ , хотя через окуляр рассматривается интерференционная картина в точках  $M'$  фокальной плоскости объектива  $L_2$ .

Для выяснения вида интерференционной картины воспользуемся следующим построением. Предположим, что через точку  $O$  кристалла (рис. 7) проходит множество плоских волн, причем в каждом направлении могут распространяться две волны с различными скоростями.

Построим теперь вокруг точки  $O$  поверхность, которая является геометрическим местом точек, таких, что для каждой из них разность фаз двух волн, идущих в одном направлении, одна и та же. Тогда получится поверхность, которая называется поверхностью «равной разности фаз» или изохроматической поверхностью. Сечение этой поверхности выходной плоскостью кристалла определяет вид изохроматических линий, которые и наблюдаются (с очень небольшим искажением) в фокальной плоскости объектива  $L_2$  микроскопа.

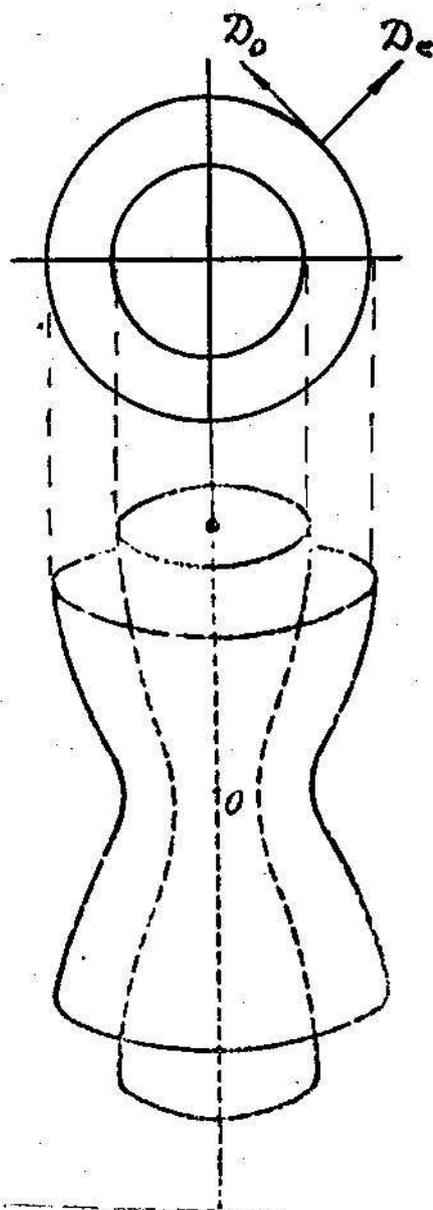
Поскольку разность фаз зависит от длины волны света изохроматы представляют собой чередующиеся темные и светлые линии для монохроматического света и окрашенные линии для белого света.

Кроме изохроматических поверхностей, которые являются геометрическим местом точек, для которых разность фаз двух интерферирующих волн является постоянной величиной  $\delta = \text{const}$ , интерференционная картина характеризуется еще одной системой линий – так называемых изогир – совокупность точек с одинаковым значением угла  $\varphi$  (см. формулу 9). Семейство кривых, вдоль которых интенсивность света равна 0, называются главными изогирями и главными изохроматами. Согласно формуле 9, они задаются соотношениями  $\sin 2\varphi = 0$  и  $\sin (\delta/2) = 0$ . Для главных изогир направление колебаний вектора электрического поля, пропускаемых поляризатором, совпадает с одним из направлений колебаний в кристалле, т.е. прошедшая через кристалл волна сохраняет свое состояние поляризации.

Рассмотрим отдельно вид изохромат и изогир в случаях, когда пластинки вырезаны из одноосных и двуосных кристаллов (см. /4/). Для одноосных кристаллов изохроматическая поверхность представляет собой поверхность вращения вокруг оптической оси. Вид этой поверхности для двух разностей хода  $\lambda$  и  $2\lambda$  изображен на рис. 8.

Пользуясь этим рисунком легко определить вид изохромат, анализируя сечение этой поверхности плоскостями, находящимися на различном

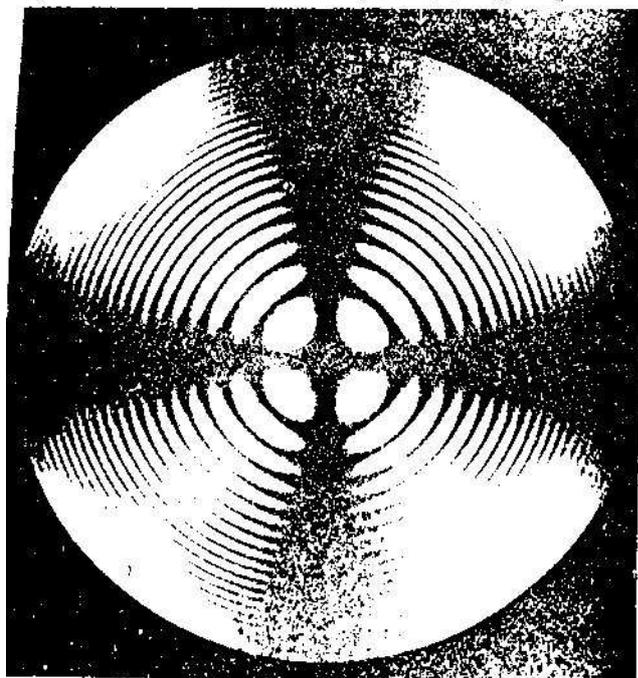
расстоянии от точки  $O$ , что соответствует наблюдению изохромат на внешней грани кристаллической пластинки. Из рассмотрения рисунка видно, что форма изохромат зависит от ориентации этой грани относительно оптической оси пластинки. Если пластинка вырезана перпендикулярно



**Рис. 8.** Вид изохроматической поверхности одноосного кристалла для двух разностей хода  $\lambda$  и  $2\lambda$ . Вверху показано сечение этой поверхности плоскостью перпендикулярной оптической оси кристалла.

оптической оси, то изохроматы имеют вид окружностей. Главные изогиры в этом случае имеют вид темного расплывчатого креста, ветви которого параллельны направлениям колебаний, пропускаемых поляризатором и

анализатором. Центр этой картины лежит на оси оптической системы. При вращении кристалла вокруг оси оптической системы вид изохромат и изогир остается в этом случае неизменным. На рис. 9 показана типичная интерференционная картина, полученная с одноосным кристаллом,



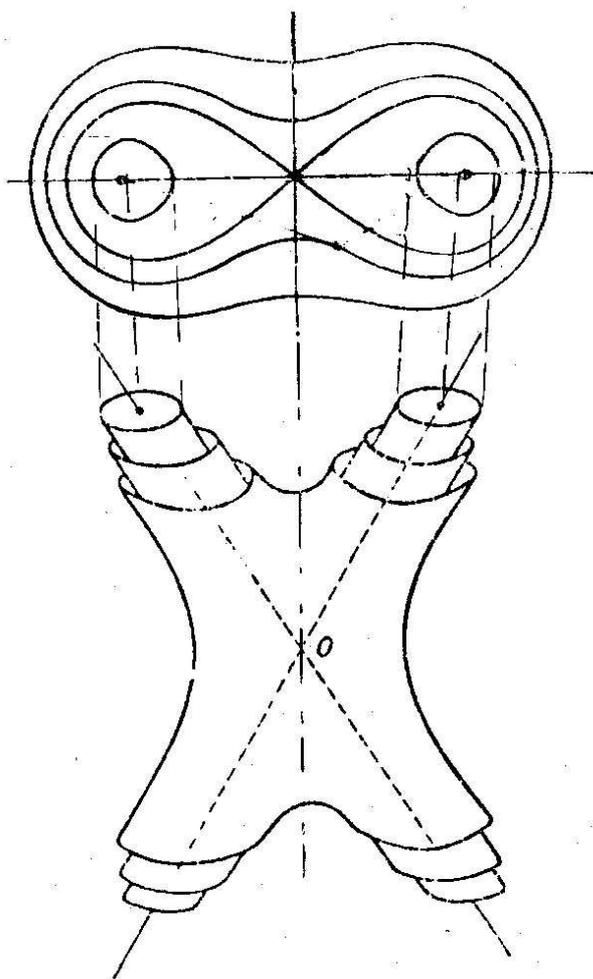
**Рис. 9.** Интерференционная картина, полученная с одноосным кристаллом, вырезанным перпендикулярно оптической оси при скрещенных поляризаторах.

вырезанным перпендикулярно оптической оси. На ней четко видны главные изогирь и изохроматы.

Направление колебаний вектора электрической индукции в обыкновенной волне всегда перпендикулярно к главной плоскости кристалла, т.е. плоскости, содержащей волновую нормаль и оптическую ось кристалла, т.е. направление вектора  $\vec{D}$  обыкновенной волны совпадает с касательной к окружности равной разности хода. Вектор  $\vec{D}$  необыкновенной волны лежит в главной плоскости, т.е. его проекция на плоскость перпендикулярную оптической оси всегда направлена по радиусам интерференционной картины (см. рис. 8, верхняя часть).

Если пластинка вырезана параллельно оптической оси, изохроматические кривые приближаются к гиперболам.

Для плоско-параллельной пластины, вырезанной из двуосного кристалла, вид изохромат гораздо более сложный. Общая картина изохроматической поверхности для двуосного кристалла изображена на рис. 10, где пунктирные линии изображают две оптические оси кристалла (бинормали).

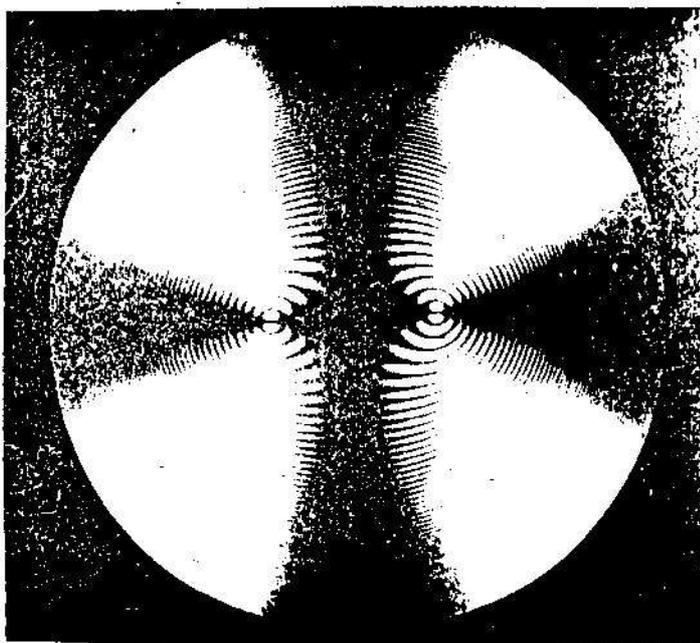


**Рис. 10.** Вид изохроматической поверхности для двуосного кристалла. Пунктиром показаны оптические оси кристалла. Вверху показано сечение изохроматической поверхности плоскостью перпендикулярной биссектрисе угла между оптическими осями.

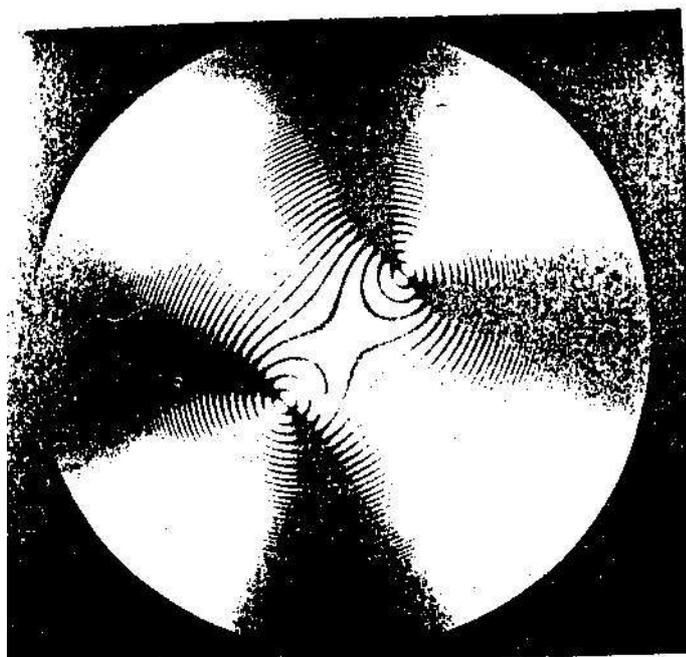
Для кристалла, вырезанного перпендикулярно биссектрисе угла между осями, вид изохромат изображен вверху на том же рис. 10. Вблизи

оптических осей изохроматы являются замкнутыми кривыми, приближающимися к эллипсам и окружающими две точки, которые соответствуют пересечению внешней поверхности пластины с оптическими осями кристалла. Если эту пластинку ориентировать так, что плоскость, содержащая оптические оси, будет параллельна направлению колебаний, пропускаемых поляризатором, то главные изогиры будут иметь вид темного креста, ветви которого совпадают с направлениями колебаний, пропускаемых анализатором и поляризатором.

Если кристаллическая пластинка повернута так, что плоскость, содержащая оптические оси, составляет  $45^\circ$  с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором, главные изогиры имеют вид гиперболических кривых, проходящих через точки выходом оптических осей. Типичные интерференционные картины приведены соответственно на рис. 11 и 12.



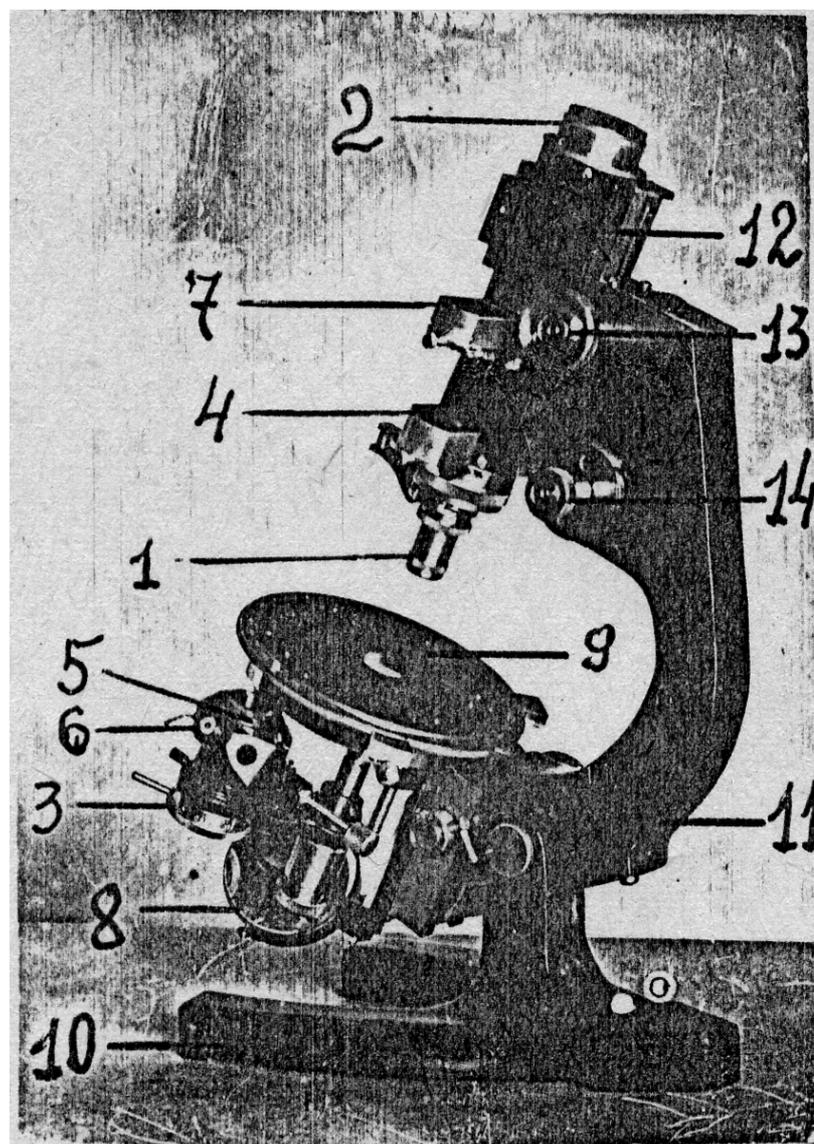
**Рис. 11.** Коноскопическая картина, наблюдаемая с двuosным кристаллом, вырезанным перпендикулярно биссектрисе острого угла между осями. Кристалл ориентирован так, что плоскость, содержащая оптические оси, параллельна направлению колебаний, пропускаемых поляризатором.



**Рис. 12.** Коноскопическая картина, наблюдаемая с двуосным кристаллом, вырезанным перпендикулярно биссектрисе острого угла между осями кристалла. Кристалл ориентирован так, что плоскость, содержащая оптически оси составляет угол  $45^\circ$  с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором.

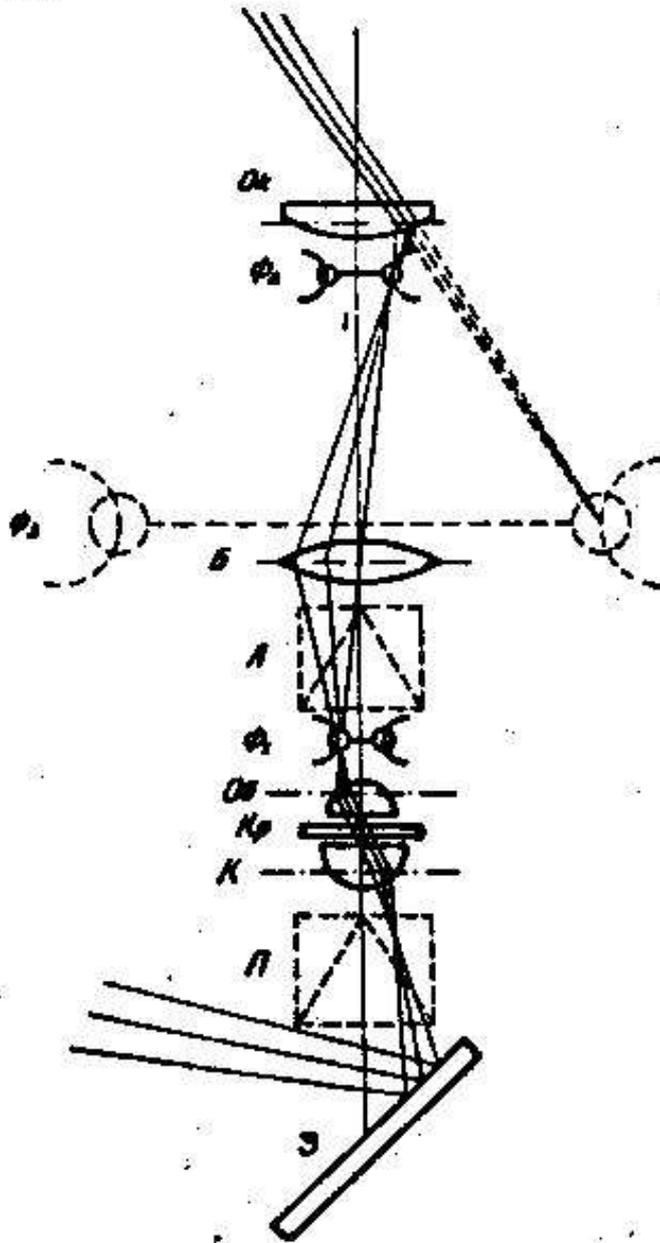
## § 2. Устройство поляризационного микроскопа. (изучается на месте)

Конструкция поляризационного микроскопа показана на рис. 13, а ход лучей в нем – на рис. 14. Воспользуемся последним рисунком для выяснения роли наиболее существенных деталей микроскопа. Свет от источника, отраженный зеркалом микроскопа, проходит через поляризатор. Последний может вращаться в специальной обойме, что позволяет изменить направление поляризации лучей света, прошедшего через поляризатор. Плоскополяризованный пучок света попадает в конденсор К, представляющий собой систему линз, которая концентрирует лучи света на исследуемом объекте. Непосредственно под конденсором помещается линза



**Рис. 13.** Общий вид поляризационного микроскопа.

1 – объектив, 2 – окуляр, 3 – поляризатор, 4 – анализатор, 5 – конденсор, 6 – линза Лазо, 7 – линза Бертрана, 8 – зеркало, 9 – предметный столик, 10 – тренога, 11 – штатив, 12 – тубус, 13 – кремальера грубой наводки, 14 – кремальера тонкой наводки.



*Ok - окуляр, Об - объектив, Б - линза Бертрама, А - анализатор, П - поляризатор, Кр - кристалл, К - конденсор, З - зеркало, Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub> и Ф<sub>3</sub> - первичная, вторичная и видимая коноскопические фигуры.*

**Рис. 14.** Ход лучей в микроскопе при исследовании кристаллов в сходящемся свете.

*Ok* - окуляр, *Об* - объектив, *Б* - линза Бертрама, *А* - анализатор, *П* - поляризатор, *Кр* - кристалл, *К* - конденсор, *З* - зеркало, *Ф<sub>1</sub>*, *Ф<sub>2</sub>*, *Ф<sub>3</sub>* - первичная, вторичная и видимая коноскопические фигуры.

Лазо, вставленная в специальную оправу, легко откидывающуюся в сторону. Она употребляется для получения сильно сходящегося пучка света при определенных исследованиях кристаллов, о которых будет сказано ниже. Пройдя через кристаллическую пластинку, пучок света попадает в объектив микроскопа – систему короткофокусных линз, заключенную в металлическую оправу. В верхней утолщенной части этой оправы имеются центрировочные винты, служащие для юстировки объектива. На пути между объективом и окуляром помещена еще одна поляризационная призма – анализатор А. Он дает возможность исследовать в отдельности каждый из двух лучей, проходящих через кристаллическую пластинку. Анализатор вставлен в оправу, которая может быть введена в тубус микроскопа и выведена из него.

Изображение предмета, даваемое объективом микроскопа, рассматривается через окуляр. Он представляет собой систему из двух линз, заключенных в специальную обойму. Как и в обычном микроскопе, глядя в окуляр, мы видим мнимое, перевернутое и увеличенное изображение предмета. Поляризационный микроскоп по нашему желанию можно использовать в виде двух разных оптических систем. Система, в которой используется плоская сторона зеркала микроскопа, поляризатор, объектив, анализатор и окуляр, представляет собой так называемый ортоскоп, предназначенный для исследования кристаллов в параллельном свете.

Включение линзы Лазо и замена плоского зеркала на вогнутое превращает ортоскоп в коноскоп, применяющийся при исследовании в сходящемся свете. В последнем случае употребляются объективы с большим увеличением ( $60^{\times}$  или  $40^{\times}$ ), а в тубус микроскопа вводится дополнительная линза, так называемая линза Бертрана Б, предназначенная для увеличения коноскопической картины. Непосредственно к микроскопу не относятся, но входят в комплект прибора компенсаторы.

В настоящей задаче применяются компенсаторы двух типов: кварцевая пластинка «чувствительного оттенка» и кварцевый клин. Оба компенсатора

вводятся в специальный прорез тубуса микроскопа, расположенный над объективом. Принцип действия компенсаторов был описан ранее.

### § 3. Подготовка микроскопа к работе.

Установка освещения. Для освещения исследуемого объекта применяется специальный осветитель. Отражающее зеркало должно быть наклонено так, чтобы ось отраженного пучка совпадала с оптической осью микроскопа. Поле зрения микроскопа должно быть при этом освещено. При исследовании кристаллов в сходящемся свете нужно пользоваться рассеянным светом, для чего перед источником помещается матовое стекло.

### Проверка скрещенности поляризатора и анализатора.

Большинство оптических исследований проводится при скрещенных поляризаторе и анализаторе, т.е. при таком их взаимном расположении, когда направление колебаний света, пропускаемого поляризатором, перпендикулярно к соответствующему направлению колебаний, пропускаемых анализатором. Проверка скрещенности поляризатора и анализатора осуществляется следующим образом. Из тубуса микроскопа вынимается окуляр и выдвигается анализатор. Изображение спирали электрической лампочки с помощью зеркала устанавливается в центре поля зрения. Затем вводят анализатор и добиваются максимального потемнения изображения светящейся нити, вращая поляризатор. В этом положении поляризатор закрепляется специальным винтом.

### Центрировка микроскопа.

В центрированном микроскопе оптические оси окуляра, объектива и конденсора должны совпадать друг с другом и с осью вращения столика. Последнее требование вызвано тем, что при некоторых исследованиях необходимо, чтобы исследуемый кристалл, изображение которого обычно помещается в центре поля зрения на пересечении нитей окуляра (т.е. на его

оптической оси) не смещался при вращении столика микроскопа. Центрировка микроскопа выполняется при его сборке, однако, в процессе работы с микроскопом приходится менять объективы, и каждый из них при каждом новом включении несколько меняет свое положение. Таким образом, центрировка объективов нарушается, а потому ее приходится часто восстанавливать.

Для этой цели каждый объектив снабжен двумя центрировочными винтами, вращая которые можно перемещать объектив перпендикулярно его оси в двух направлениях. Центрировочные винты при этом поворачиваются с помощью особых ключей, которые хранятся в футляре для объективов и надеваются только во время центрировки.

Для центрировки объектива следует поступать следующим образом. Найдя в поле зрения какую-либо достаточно мелкую и четкую деталь, устанавливают ее перемещением препарата в центр поля зрения, а затем поворачивают столик на  $180^\circ$ . При этом, если микроскоп не центрирован, установленная в центре поля зрения точка, описав полуокружность, переместится на максимальное расстояние от центра. Следовательно, ось вращения столика будет находиться на середине расстояния между переместившейся точкой и перекрестием нитей.

Поэтому, для центрировки объекта необходимо перемещением препарата перевести выбранную точку на середину этого расстояния, проверить, не смещается ли она при вращении столика, затем с помощью центрировочных винтов совместить ее с перекрестием нитей.

### **Задание 1. Монокристаллы и поликристаллы в параллельном пучке света между скрещенными поляризатором и анализатором.**

Рассматривая препарат под микроскопом в параллельном пучке света при скрещенных анализаторе и поляризаторе можно легко определить, являются ли кристаллы оптически изотропными или анизотропными. В первом случае интенсивность прошедшего через микроскоп света остается

равной нулю при любой ориентации образца. Во втором случае при полном обороте образца интенсивность прошедшего света четыре раза обращается в нуль (см. формулу 9):

При рассматривании под микроскопом поликристаллического образца можно легко заметить, что интенсивность прошедшего света различна для разных участков образца, что легко позволяет отделить поликристаллический образец от монокристаллического.

Следует провести анализ образцов под микроскопом (с № 1 по № 6) и установить среди них оптически изотропные, анизотропные и поликристаллические образцы.

### **Задание 2. Ознакомление с работой кварцевой пластинки «чувствительного оттенка» и кварцевого клина.**

Установить пластинку «чувствительного оттенка» между скрещенными поляризатором и анализатором так, чтобы оптическая ось пластинки составила угол  $45^\circ$  с главной плоскостью поляризатора. Построить теоретический график зависимости интенсивности прошедшего света в функции  $1/\lambda$ . Убедиться в том, что в прошедшем свете пластинка окрашена в фиолетово-красный цвет.

Вместо кварцевой пластинки установить кварцевый клин так, чтобы ребро клина составляло угол  $45^\circ$  с главной плоскостью поляризатора. Наблюдая интерференционные полосы и сопоставляя наблюдаемое чередование цветов с окраской, указанной в таблице, определить какое число порядков удастся наблюдать на кварцевом клине.

### **Исследование кристаллов в сходящемся пучке света.**

#### **Задание 3. Определение оптического класса кристаллов.**

Изучение коноскопических фигур кристаллов позволяет установить, является ли кристалл одноосным или двуосным. Легче всего это установить, наблюдая коноскопические фигуры с пластинками, вырезанными

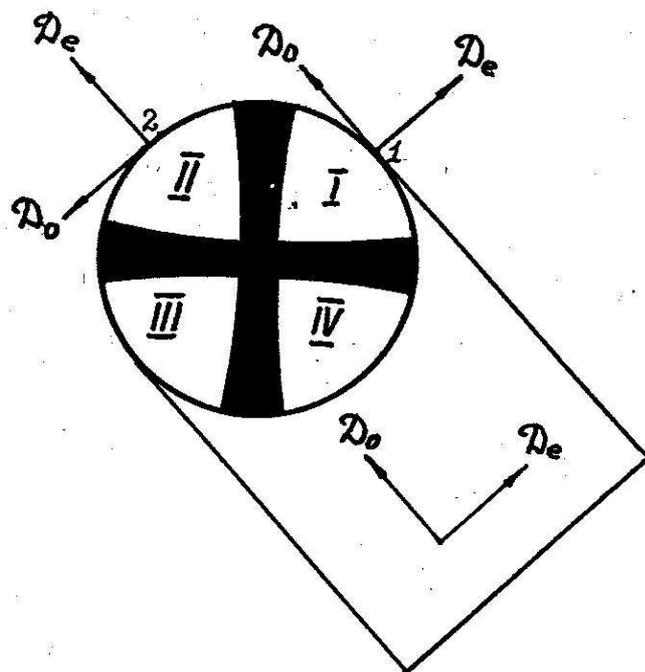
перпендикулярно оптической оси или биссектрисе угла между осями. Для этого необходимо настроить микроскоп для наблюдения коноскопических фигур. Рассматривая коноскопические фигуры (препараты №№ 1, 5, 6, 7) зарисовать наблюдаемые интерференционные картины и по ним установить оптический класс кристаллов, т.е. установить какие кристаллы являются одноосными и какие двуосными.

#### **Задание 4. Определение оптического знака кристаллов.**

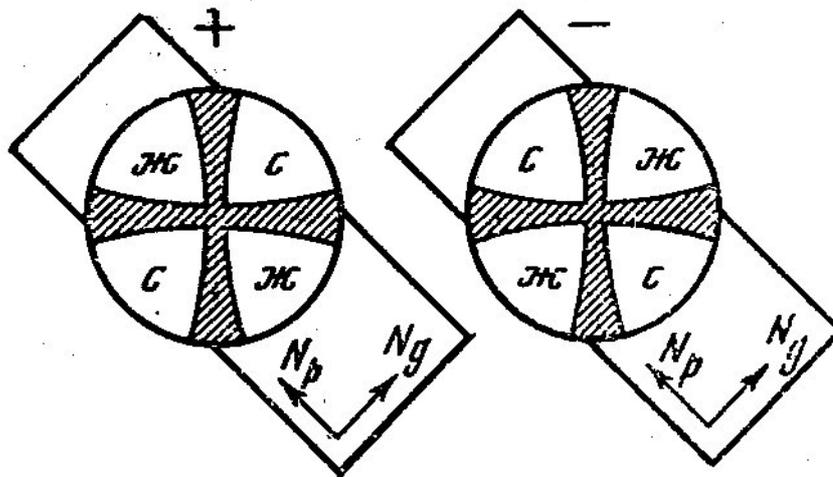
Для определения оптического знака кристалла может быть использована пластинка «чувствительного оттенка». Для этого в скрещенных николях наблюдается коноскопическая картина, полученная с пластинкой, вырезанной из одноосного кристалла перпендикулярно оптической оси. Затем в специальную прорезь микроскопа вводится пластинка «чувствительного оттенка» так, что ее оптическая ось располагается под углом  $45^\circ$  к плоскости колебания электрического вектора световой волны, прошедшей через поляризатор. Тогда вместо черного креста, соответствующего главным изогирам, будет наблюдаться крест, окрашенный в фиолетово-красный цвет, а в накрест лежащих квадрантах появится красная или синяя окраска. Оптический знак кристалла будет положительным, если в квадрантах, пересекаемых длинной стороной пластинки появится желто-красная окраска, а в двух других синяя. Для того чтобы это понять, обратимся к рис. 15. Рассмотрим две точки 1, 2 кристалла, лежащие на биссектрисах углов, образованных главными изогирами. В точке 1 колебания вектора электрического поля необыкновенной световой волны происходят, как уже было сказано, вдоль радиуса интерференционной картины (см. рис. 16), т.е. совпадает с направлением оптической оси пластинки «чувствительного оттенка» (на рисунке эти направления указаны в правом нижнем углу). Если кристалл положительный, т.е. такой же, как пластинка «чувствительного оттенка», оптическая разность хода, даваемая неизвестным кристаллом, добавляется к оптической разности хода лучей в пластинке

«чувствительного оттенка». Но, как уже было сказано, небольшое увеличение разности хода смещает окраску пластинки «чувствительного оттенка» в синюю сторону. Поэтому квадрант, содержащий точку 1, оказывается окрашенным в синий цвет. В точке 2 колебания необыкновенной волны совпадают с колебаниями обыкновенной волны в пластинке «чувствительного оттенка» и поэтому разность хода уменьшается, что приводит к смещению окраски в желто-красную сторону (см. рис. 21, точка 2).

В случае отрицательного кристалла изменение окраски в синюю сторону произойдет в квадранте, содержащем точку 1, и в желто-красную сторону в квадранте, содержащем точку 2. Результат введения пластинки «чувствительного оттенка» демонстрирует рис. 16.



**Рис. 15.** К объяснению смещения интерференционной окраски в различных квадрантах коноскопической фигуры, наблюдаемой с пластинкой одноосного кристалла, вырезанной перпендикулярно оптической оси, если на пути света введена пластинка «чувствительного оттенка».

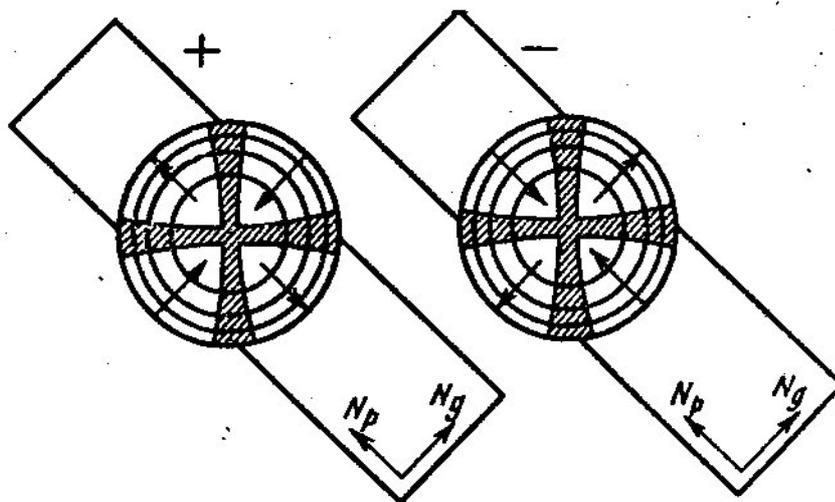


**Рис. 16.** Смещение окраски в различных квадрантах при наблюдении коноскопической фигуры с одноосным кристаллом, вырезанным перпендикулярно оптической оси при введении на пути света кварцевой пластинки «чувствительного оттенка».

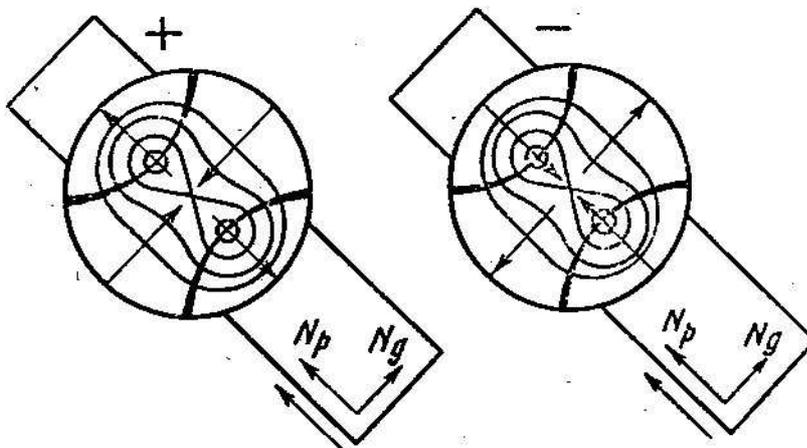
Оптический знак кристалла может быть определен также с помощью кварцевого клина. Наблюдая коноскопическую фигуру, полученную с одноосным кристаллом, вырезанным перпендикулярно оптической оси, необходимо вдвигать кварцевый клин так, чтобы его длинная сторона перемещалась параллельно биссектрисе угла между изогирами. Тогда в квадрантах 1 и 3 разность хода, создаваемая исследуемой пластинкой и клином будет увеличиваться, если исследуемый кристалл положительный, и, следовательно, интерференционные полосы будут сбегаться к центру. В квадрантах 2 и 4 суммарная разность хода, создаваемая исследуемой пластинкой и кварцевым клином, будет уменьшаться, и интерференционные полосы будут разбегаться от центра (см. рис. 17).

В случае двуосных положительных кристаллов при введении кварцевого клина интерференционные полосы между ветвями гипербол смещаются к центру, а по другую сторону гипербол от центра (см. рис. 18). Следует определить оптический знак кристаллов (образцы № 1,5, 6, 7) с

помощью пластинки «чувствительного оттенка» и с помощью кварцевого клина.



**Рис. 17.** К определению оптического знака одноосного кристалла.



**Рис. 18.** К определению оптического знака двуосного кристалла.

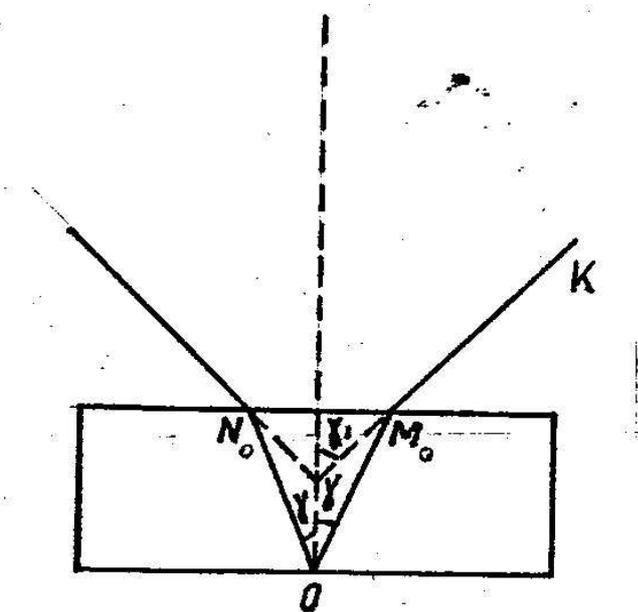
**Задание 5.** Измерение угла между оптическими осями двуосного кристалла.

Угол между оптическими осями двуосного кристалла  $2\gamma$  (см. формулу 3) может быть измерен по коноскопическим фигурам, наблюдаемым с пластинами, вырезанными перпендикулярно биссектрисе острого угла между осями и ориентированными так, чтобы плоскость, содержащая оптические

оси составляла угол  $45^\circ$  с направлением колебаний, пропускаемых поляризатором.

Принцип измерения этих углов может быть понят из рис. 19. На рисунке представлено сечение кристаллической пластинки плоскостью X, Z, т.е. плоскостью, содержащей обе оптические оси (обозначенные на рис. 25  $OM_0$  и  $ON_0$ ). Если волновая нормаль света внутри кристалла совпадает с оптической осью, то на выходе из пластинки свет преломится под бóльшим углом  $\gamma_1$ , определяемым соотношением

$$\sin \gamma / \sin \gamma_1 = 1/n_m \quad (10)$$



**Рис. 19.** К определению угла между оптическими осями двуосного кристалла. Показано сечение кристалла, вырезанного перпендикулярно биссектрисе острого угла между оптическими осями плоскостью, содержащей оптические оси.  $OM_0$  и  $ON_0$  - направление оптических осей в кристалле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Меланхолин Н.Н., Методы исследования оптических свойств кристаллов. 1970.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. Гл. 16 и 26.