

Д.С. Беляжкин

КРИСТАЛЛООПТИКА



ГОСПОДСТВО

Д. С. БЕЛЯНКИН

КРИСТАЛЛООПТИКА

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ
ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено Министерством высшего образования
в качестве учебного пособия
для ВУЗОВ*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва — 1949

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

В текст настоящего издания внесены некоторые довольно существенные изменения в целях максимального приближения его к уровню познаний начинающих. Большую помощь в этом деле оказал мне проф. В. П. Петров, который является автором дополнительных параграфов о компенсаторе Берека, о пятиосном столике, а также заключительной главы „Систематический ход исследования кристаллов под микроскопом“.

Д. С. Белянкин

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Руководствами по кристаллооптике мы довольно богаты. Отчасти они представляют собой самостоятельные издания, отчасти являются отдельными главами общих курсов кристаллографии. Большинство их кратки и в той или иной мере упрощены. Некоторые, напротив того, более солидны и выдержаны, но зато неполны: посвящены или только элементам кристаллооптики, или универсальному методу Федорова. Освещающая этот вопрос книга Никитина пугает учащихся своим объемом. При таком положении вещей задачей автора была попытка дать учебник промежуточного типа — краткий, но не слишком упрощенный: основы кристаллооптики для начинающих. В основу положены явления светопреломления и двупреломления в исландском шпате. Из наблюдений над ними выводится индуктивным путем индикатриса. Из аппаратуры на передний план — до николей и поляризационного микроскопа — выдвинут рефрактометр. Все методическое, в том числе и универсальный метод Федорова, передано по возможности сжато, без излишних подробностей. За ними мы отсылаем читателя к пособиям Никитина, Усова, Лодочникова и других авторов.

Д. С. Беллякин

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О СВЕТЕ

Природа света. Свет рассматривается здесь как одна из форм лучистой энергии, как некоторое гармоническое колебательное движение, распространяющееся волнами во все стороны от светящегося тела¹.

В световом колебательном движении можно различать: 1) направление колебаний и 2) направление распространения колебаний. Плоскость, проходящая через оба направления, называется плоскостью колебаний. Направление распространения колебаний мы обычно называем лучом и считаем, что колебания направлены относительно луча поперечно, точно к нему перпендикулярно. Впоследствии мы увидим, что такое представление может быть признано правильным только для случая распространения света в средах изотропных. Только эти последние мы и будем иметь в виду непосредственно дальше.

Свет обыкновенный и поляризованный. Различают свет обыкновенный и свет поляризованный. В первом случае плоскость колебаний непрерывно и быстро меняется, как бы вращаясь вокруг луча, во втором она остается

¹ В настоящее время мы относим свет к электромагнитным колебаниям с определенными длинами волн. Им противопоставляются более короткие волны рентгеновых лучей и более длинные — лучей Герца, образующих основу современной радиотехники.

Природа света двойственна. С одной стороны, это — пучок частиц энергии — фотонов, а с другой — волновые колебательные движения. В некоторых явлениях на первое место выступает строение света как пучка фотонов (фотоэффект, люминесценция и др.); в других, наоборот, наиболее ясно проявляется волновая природа света (светопреломление, интерференция, отражение света, прохождение его через прозрачные вещества и т. д.). Собственно кристаллооптика является той частью науки о свете, где впервые Френелем была с несомненностью установлена волновая природа света и разработана теория, объясняющая весьма удовлетворительно все наблюдаемые факты.

постоянной. Плоскость, перпендикулярная к ней, называется плоскостью поляризации.

Наиболее просто поляризованный свет получается при отражении от поверхности какого-либо прозрачного тела, например стекла. Плоскость поляризации такого отраженного луча перпендикулярна к отражающей поверхности.

Чтобы составить себе некоторое представление о характере колебательного светового движения, вообразим вспомогательное равномерное движение по окружности и будем проектировать его на прямые, перпендикулярные к лучу.

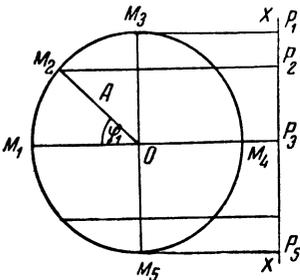


Рис. 1. Световое колебательное движение

Пусть точка M равномерно движется по окружности радиуса A (рис. 1). Движение ее проектируем на прямую XX' .

1. Точка M в начальном положении находится в M_1 . Проекция ее — в P_3 .

2. Точка M перешла в M_2 . Угол $M_1OM_2 = \varphi_1$. Проекция M_2 находится в P_2 ; $P_3P_2 = A \sin \varphi_1$.

3. Точка M перешла в M_3 ; $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Проекция — в P_1 , т. е. в наибольшем удалении от начального положения:

$$P_1P_3 = A.$$

4. M_4 ; $\varphi = \pi$. Проекция проходит через начальное положение P_3 .

5. M_5 ; $\varphi = \frac{3\pi}{2}$. Проекция — в крайнем нижнем положении: P_5 .

6. $M_6 = M_1$; $\varphi = 2\pi$. Проекция P_3 — в начальном положении и с таким же, как вначале, направлением движения.

Угол φ называют фазой колебательного движения. Фазой можно назвать также соответствующие положения точки P : P_1, P_2, P_3 и т. д.

Примем следующие обозначения:

T — время полного колебания точки P . Это так называемый период колебательного движения. T соответствует пробегу вспомогательной точки M полной окружности 2π ;

A — величина наибольшего удаления P от начального положения, равная радиусу вспомогательного движения; она образует амплитуду. Амплитуда определяет силу света I , пропорциональную ее квадрату.

Колебательное движение от точки P , которую мы назовем точкой 1, передается в точку 2, далее — в точку 3 и т. д. В то время как точка 1 совершит свое полное колебание и вернется в положение 1 (рис. 2), точка 2, увлеченная ею, но отстающая в своем колебательном движении на некоторую элементарную фазу φ_2 , займет положение 2₁. Одновременно точка 3, отстающая на $2\varphi_2$, придет в положение 3₁

и т. д. В результате все наши точки расположатся на волнообразной, так называемой синусоидальной кривой, обозначенной на рис. 2 в виде сплошной черной линии. Очевидно такое же расположение точек будет и тогда, когда точка 1 совершит целый ряд (n) своих полных колебаний, когда, следовательно, для нее $\varphi = 2\pi n$.

Черной линией с точками (рис. 2) изображена та же синусоида в момент, когда $\varphi = 2\pi n + \frac{\pi}{2}$, пунктиром — в момент, когда $\varphi = 2\pi n + \pi$, причем n — везде целое число.

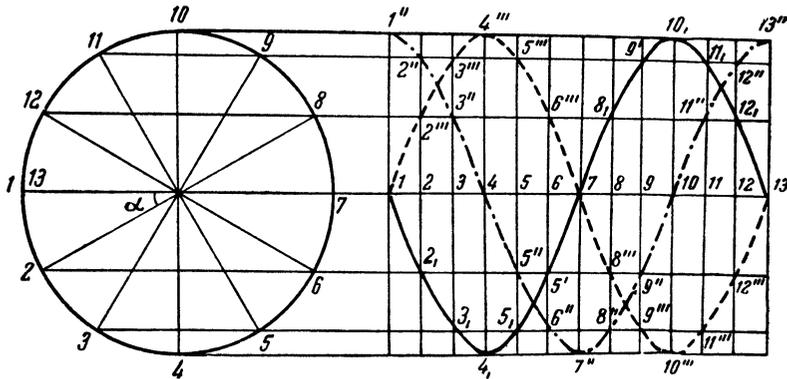


Рис. 2. Построение синусоиды световой волны

Расстояние, на которое распространяется волнообразное колебательное движение за один период T , называется длиной волны и обозначается через λ . T и λ определяют цвет луча. Из видимых лучей самые быстрые колебания и соответственно

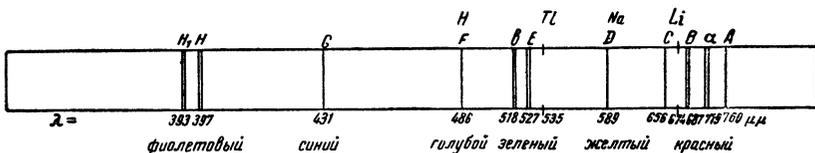


Рис. 3. Спектр видимого света с важными линиями поглощения солнечного спектра и указанием длин волн важнейших спектральных линий, которые дают пары различных металлов

самые короткие волны принадлежат фиолетовым ($\lambda_{\phi} = 393 \text{ м}\mu$, где $\text{м}\mu$ обозначают миллионные доли миллиметра, $1 \text{ м}\mu = 10 \text{ \AA}$) а самые медленные колебания и самые длинные волны характеризуют красные ($\lambda_{\kappa} = 760 \text{ м}\mu$).

Схема солнечного спектра с важными линиями поглощения и с обозначением длины волн в миллионных долях миллиметра приведены на рис. 3.

Интерференция света. Если два колебательных движения распространяются по одному и тому же направлению и обла- дают одной и той же длиной волны, они взаимодействуют, складываются, или, как говорят, интерферируют между собой. Наиболее простой случай интерференции наблюдается тогда,

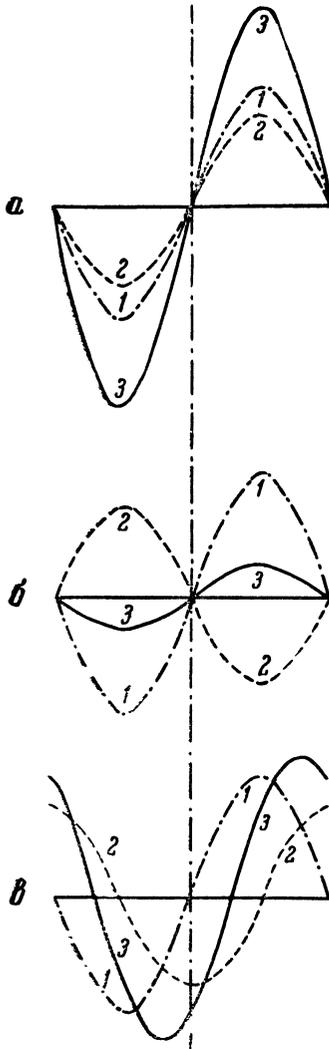


Рис. 4. Интерференция двух волн, находящихся в разных фазах: а) $\Delta = 0$; б) $\Delta = \frac{1}{2}\lambda$;

в) $\Delta = \frac{1}{4}\lambda$

1 и 2—исходные лучи; 3—результатные лучи

когда оба интерферирующих луча поляризованы, и притом поляризованы в одной и той же плоскости.

Результат интерференции зависит от того, в каких относительных фазах встречаются колебания обоих интерферирующих лучей.

Здесь возможны следующие случаи.

1) Колебания соответственных точек того и другого лучей встречаются в одинаковых фазах (рис. 4, а): $\varphi_2 = \varphi_1$, или, что то же, $\varphi_2 = 2\pi n + \varphi_1$; $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n$, где $n = 0$ или целому числу; разность хода лучей $\Delta = n\lambda$ (целому числу волн) или $2n \frac{\lambda}{2}$ (четному числу полуволн). Амплитуда результирующего колебательного движения равняется сумме амплитуд слагаемых движений: $A = A_1 + A_2$. Если $A_1 = A_2$, то $A = 2A_1$, т. е. амплитуда удваивается, а интенсивность света при этом учетверяется: $I = 4I_1$.

2) Колебания соответственных точек интерферирующих лучей встречаются в прямо противоположных фазах (рис. 4, б): $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$, или $2\pi n + \pi$, или $(2n + 1)\pi$; $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ (нечетному числу полуволн). Амплитуда результирующего колебательного движения равняется разности амплитуд слагаемых движений: $A = A_1 - A_2$. Происходит ослабление света, а если слагаемые амплитуды равны между собой, то и полное его погашение: $A = 0$ и $I = 0$.

3) Разность фаз слагаемых колебательных движений является

промежуточной между двумя предыдущими случаями (рис. 4, *б*): $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n + \frac{2\pi}{p}$ и $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{p}$, где p равно любому целому числу, кроме 1 и 2. Соответственно и амплитуда результирующего движения A является промежуточной между $(A_1 + A_2)$ и $(A_1 - A_2)$ или если $A_1 = A_2$, то между $2A_1$ и 0. Результирующая синусоида передвинута относительно слагаемых синусоид.

Распространение света. Как показывает наблюдение, световая энергия распространяется во все стороны от источника света. Представим себе для простоты этот источник в виде светящейся точки. Проведем от нее во все стороны прямые, пропорциональные по своей длине скорости света в соответственном направлении, и соединим концы прямых непрерывной поверхностью. Эта поверхность называется поверхностью

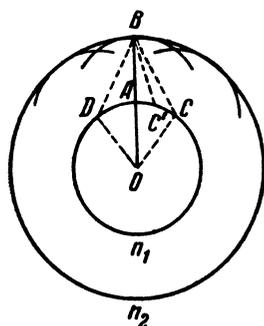


Рис. 5. Построение Гюйгенса для шаровой волны

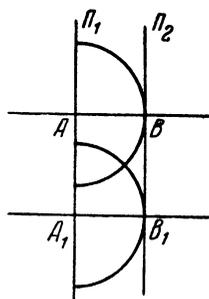


Рис. 6. Построение Гюйгенса для плоской волны

лучевых скоростей, а также лучевой поверхностью, и еще чаще — поверхностью волны. Если свет распространяется в среде изотропной, где скорость его не зависит от направления, поверхность волны шаровая.

Взаимные отношения между всесторонним и прямолинейным распространением света уясняются из следующего построения, предложенного Гюйгенсом и доведенного до логического конца Френелем.

Пусть (рис. 5) точка O изображает центр колебательного движения в какой-нибудь изотропной среде. Обозначим через t начало колебательного движения, через t_1 — некоторый последующий момент этого движения. Предположим, что в промежуток времени $t_1 - t$ колебательное движение, распространяясь во все стороны, достигло поверхности радиуса OA ; обозначим ее через Π_1 . Каждую точку этой поверхности, согласно Гюйгенсу, можно рассматривать как новый самостоятельный центр колебаний. Таким образом, если за новый, последующий промежуток времени $t_2 - t_1$ колебательное

движение, исходящее из O , достигло, например, второй поверхности P_2 радиуса $OB = OA + AB$, то это все равно, как если бы оно, распространяясь из каждой точки поверхности P_1 , достигло очень многих мелких поверхностей радиуса AB . По отношению к этим мелким поверхностям, называемым элементарными поверхностями или элементарными волнами, поверхность P_2 является объемлющей и касательной к ним.

Пусть в точке B находится глаз наблюдателя. Он должен воспринять световую энергию не только из точки A , но и из точек C и D и из бесчисленного количества других точек на поверхности P_1 . Соответственные лучи образуют в своей совокупности ряд конических поверхностей вокруг AB как их оси. Основания этих конусов образуют на поверхности P_1 малые концентрические круги. Ввиду огромного количества конусов совершенно очевидно, что к каждому лучу любого конуса мы можем подобрать другой, соседний луч из другого конуса — такой, чтобы их разность хода была равна $\frac{\lambda}{2}$. Такие пары лучей, согласно изложенному выше, интерферируют между собой, должны гасить друг друга. Правда, они не распространяются, строго говоря, по одному и тому же направлению, что необходимо для интерференции, но в то же время угол между ними столь мал, что практически их можно считать направленными одинаково. Исключение из всех лучей составляет только центральный луч AB , для которого не остается парного луча; он один только и сохраняется. Таким образом, глаз наблюдателя, расположенный в B , только по линии OAB и воспринимает световую энергию.

Как видно из рис. 5, направление луча OAB на участке от A до B определяется точкой B , которая является точкой между объемлющей волной P_2 (с центром в O) и элементарной волной с центром в точке A . Таким образом, можно вывести следующее правило: если мы хотим знать направление луча после прохождения его через точку A , то эту последнюю соединяем с означенной точкой касания B . Линия AB и будет искомым направлением.

В случае лучей параллельных, когда светящийся центр находится на бесконечно далеком расстоянии от нас, объемлющая поверхность P_2 получает бесконечно большой радиус, или, что то же, превращается в плоскость, перпендикулярную к лучам. Так как она служит для отыскания направления параллельных лучей, то ее так и называют направляющей плоскостью.

Предположим, что каких-нибудь два параллельных луча (рис. 6) в момент времени t достигли в точках A и A_1 некоторой плоскости P_1 . Строим вокруг A и вокруг A_1 элементарные волны радиусом, соответствующим промежутку времени $t_2 - t_1$. Проводим к ним касательную плоскость в B и B_1 ; она

будет, очевидно, направляющей плоскостью Π_2 , а AB и A_1B_1 показывают направления наших лучей после прохождения ими плоскости Π_1 .

Преломление света. При переходе световых лучей из одной среды в другую (из воздуха в воду, из воды в стекло и т. д.) происходит, как известно, преломление света на границе этих сред. По принципу Гюйгенса легко и для этого случая построить направление лучей.

Пусть TT_1 (рис. 7) изображает след разделяющей плоскости двух сред, расположенной перпендикулярно к бумаге; SS_1 —падающие лучи; RR_1 —преломленные лучи; v_i —скорость лучей в среде их падения; v_r —скорость их в среде преломления.

Предположим, что в момент времени t_1 лучи S и S_1 достигли плоскости AP_1 . Начиная отсюда луч S_1 продолжает распространяться в той же среде падения, а луч S распространяется уже в среде преломления. В момент времени t_2 , когда луч S_1 еще только достиг разделяющей плоскости TT_1 , лучу S будет соответствовать уже элементарная волна с радиусом $AB = v_r(t_2 - t_1)$. Можно сказать, что и лучу S_1 в момент t_2 также соответствует в среде преломления своя элементарная волна, но только волна с радиусом, равным нулю, т. е. самая точка B_1 . Таким образом, мы получаем для среды преломления две элементарные волны и можем воспользоваться ими для построения преломленных лучей.

В самом деле, две элементарные волны определяют общую к ним касательную направляющую плоскость. Так как, согласно сказанному, элементарная волна луча S_1 в момент времени t_2 совпадает с точкой B_1 , то практически нам остается только провести через B_1 касательную к кругу с радиусом $v_r(t_2 - t_1)$. Проведя ее, соединяем A с точкой касания B ; прямая AB и покажет направление преломленных лучей.

Угол $SAP = i$, образуемый падающим лучом с перпендикуляром к разделяющей плоскости в точке падения, называется углом падения.

Угол $RAP = r$ —аналогичный угол преломления, образуемый с тем же перпендикуляром и лучом преломленным.

В треугольнике AA_1B_1 угол $A_1AB_1 = i$; $A_1B_1 = AB_1 \sin i$.

В треугольнике ABB_1 угол $AB_1B = r$; $AB = AB_1 \sin r$.

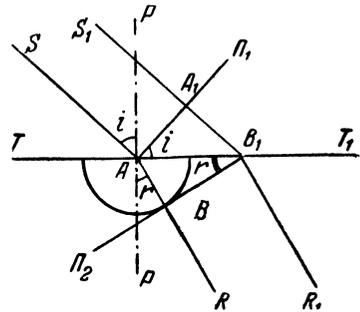


Рис. 7. Преломление света

SA и S_1B_1 —падающие лучи; AR и B_1R_1 —преломленные лучи; Π_1 —фронт падающей волны; Π_2 —фронт преломленной волны.

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r} = N.$$

Разделим первое равенство на второе:

$$\frac{A_1 B_1}{AB} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

Но

$$A_1 B_1 = v_i (t_2 - t_1) \text{ и } AB = v_r (t_2 - t_1).$$

Следовательно, мы можем написать:

$$\frac{v_i}{v_r} = \frac{\sin i}{\sin r} = N.$$

Величина N называется показателем преломления второй среды относительно первой. Когда $v_i > v_r$, N больше единицы; когда же $v_i < v_r$, тогда, наоборот, N меньше единицы. Во втором из этих двух случаев, где r больше i , увеличивая последовательно i , мы достигаем наконец такого положения, когда r станет равно 90° , а потом больше 90° . Очевидно, при таких мнимых r луч совершенно не может проникнуть из первой среды во вторую, и тогда он целиком отражается от раздельной поверхности в первую среду. Происходит так называемое полное внутреннее отражение. Предельный угол i , при котором r становится равным 90° , называется углом полного внутреннего отражения.

Чтобы сделать возможно более сравнимыми показатели преломления различных веществ, за первую среду (среду падения) обычно принимают пустоту или воздух (показатель преломления которого относительно пустоты равен 1,00029, т. е. почти единице). Показатель преломления N какого-либо вещества относительно пустоты или воздуха можно назвать абсолютным показателем преломления, а все остальные его показатели n относительно других сред будут уже относительными.

Обозначим через:

N — абсолютный показатель светопреломления данного тела;

n — показатель относительно среды, абсолютный показатель преломления которой равен N_1 ;

v_0 — скорость света в воздухе;

v — скорость света в данном теле (среде) преломления;

v_1 — скорость света в среде падения:

$$\frac{v_0}{v} = N; \quad \frac{v_0}{v_1} = N_1; \quad \frac{v_1}{v} = n.$$

Помножим второе равенство на третье: $\frac{v_0}{v} = nN_1$ или, что то же, $N = nN_1$, т. е. абсолютное светопреломление данного тела равно относительному, умноженному на абсолютное светопреломление среды падения.

Дисперсия показателей преломления. Величина показателя преломления строго постоянна и полностью определяет веще-

ство только в том случае, если этот показатель определен для света какой-либо одной длины волны (в так называемом монохроматическом свете). С изменением длины волны меняется и величина показателя преломления. Обычно он выше для коротких волн (синих и фиолетовых) и ниже для длинных (красных и оранжевых). Явление это называется дисперсией показателей преломления. Численная величина дисперсий (обычно $N_F - N_C$, рис. 3) также может служить характеристикой вещества.

При определении светопреломления обычно пользуются желтым светом раскаленных паров натрия. Он строго монохроматичен (длина волны 589,3 мμ) и легко получается, если в пламя газовой горелки внести какую-либо соль натрия. Удобно также пользоваться специальной электрической лампой, где разряд происходит в парах натрия. Длина волны натриевого света лежит в области максимальной чувствительности человеческого глаза и близка к средней длине волны дневного света (550 мμ).

§ 2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Светопреломление принадлежит к числу важнейших физических свойств, характеризующих физико-химическую природу того или иного вещества. Существуют различные способы его определения.

Определение светопреломления по способу призмы. Наиболее точным является способ призмы, который заключается в измерении отклонения от первоначального направления луча при прохождении его через призму из данного тела, причем под призмой подразумевается здесь совокупность двух граней, пересекающихся между собой. На рис. 8 такая призма представлена в поперечном разрезе; ребро ее проходит через вершину угла A перпендикулярно к бумаге. Угол A — преломляющий угол призмы; угол δ обозначает отклонение луча призмой. Из рисунка непосредственно следует, что $A = r + r_1$ и что

$$\delta = (i - r) + (i_1 - r_1).$$

Если $i = i_1$ и $r = r_1$, отклонение луча призмой принимает наименьшее значение. Одновременно получают следующие соотношения:

$$1) A = 2r, \quad \delta = 2i - 2r;$$

$$2) r = \frac{A}{2}; \quad i = \frac{A + \delta}{2};$$

$$3) N = \frac{\sin \frac{A + \delta}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

A и δ измеряются на гониометре: A — обычным способом, а δ — следующим образом: 1) устанавливают коллиматор и зрительную трубу в противостояние (на 180° между ними) и наблюдают изображение сигнала коллиматора, образуемое падающими лучами, минуя призму (направление AB , рис. 9); 2) поворачивают зрительную трубу до тех пор, пока не появится в ее поле зрения изображение сигнала, образуемое преломленными лучами (PC); 3) вращают призму, одновременно следуя за сигналом преломленных лучей при помощи зрительной трубы, до тех пор пока $\angle BPC = \delta$ примет наименьшее значение, требуемое 3-й формулой.

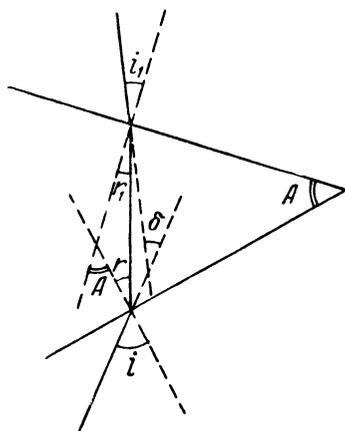


Рис. 8. Определение светопре-
ломления по методу призмы

A — преломляющий угол призмы;
 δ — отклонение луча призмой

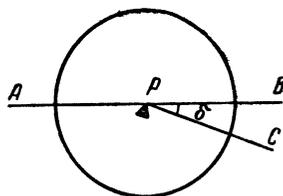


Рис. 9. Схема измерения
угла отклонения луча
призмой

По способу призмы и угла наименьшего отклонения показатели преломления определяются с точностью до четвертого десятичного знака. Призмы, необходимые для получения величин A и δ , образуются естественными гранями кристалла или выпиливаются искусственно.

По этому же методу можно измерять и светопреломление жидкостей. Для этого используют устанавливаемую на гониометре полу призму из плоско-параллельных стекол, куда помещают каплю жидкости.

Преимуществом метода призмы, по сравнению со всеми другими, является то, что при его помощи можно измерять светопреломление любого высокопреломляющего вещества.

Определение светопреломления по способу рефрактометра. Второй способ определения показателей преломления, также довольно точный, хотя и не столь универсальный, как только что описанный, основан на явлениях полного внутреннего отражения на границе двух сред. Специальные приборы, употребляемые для наблюдения этих явлений, называются рефрактометрами. В кристаллооптике обычно пользуются

кристаллорефрактометром с полушарием из стекла с высоким показателем преломления: $N = 1,8 - 1,9$. На верхней плоской поверхности полушария помещается капля жидкости, а на нее сверху накладывается пластинка исследуемого вещества, под которой капля растекается в тонкую пленку с плоско-параллельными стенками. Если обозначить искомый показатель преломления через N , а показатели преломления стекла и жидкости — через N_1 и N_2 , то обязательно должно быть соблюдено условие: $N < N_2 < N_1$. Жидкость служит для вытеснения воздушной прослойки между полушарием и пластинкой; в то же время вследствие плоско-параллельности жидкий слой не оказывает влияния на i и r в полушарии и пластинке (рис. 10).

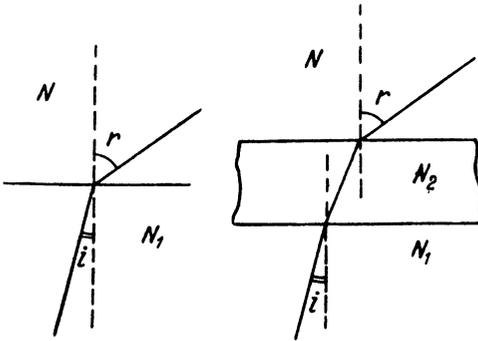


Рис. 10. Прохождение света через плоско-параллельную пластинку

Плоско-параллельная пластинка N_2 , помещенная между средами N_1 и N , не влияет на величину угла преломления в последней среде

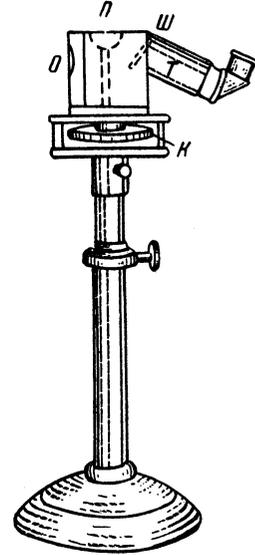


Рис. 11. Простейший кристалл-рефрактометр
 П — полушарие из высокопреломляющего стекла; О — отверстие для освещения монохроматическим светом; К — кольцо для вращения полушария; Т — зрительная труба; Ш — шкала показателей преломления

На рис. 11 изображен рефрактометр одного из простейших типов с полушарием. Полушарие Π укреплено на вертикальной оси внутри металлической оправы, имеющей форму цилиндра. Ось с полушарием можно приводить во вращение с помощью кольца K , которое служит основанием оправы. В вертикальной стенке оправы сделано боковое отверстие O для освещения полушария (монохроматическим светом) с нижней, сферической его стороны. К другой стороне стенки, противоположающей отверстию, присоединена оптическая труба T , ось которой проходит через центр полушария. При освещении последнего снизу получается ход лучей, показанный на рис. 12, a . Все лучи, падающие из полушария на пластинку под углами больше предельного угла полного внутреннего отражения

($NOI = i_{lim}$), целиком отражаются от пластинки, а те, которые падают под углами меньше предельного, только частично отражаются от нее, а в главной своей массе, после соответственного преломления, уходят в пластинку. В результате поле зрения оптической трубы оказывается разделенным на две половинки: одну — светлую, освещенную лучами полного внутреннего отражения, а другую — более темную, освещенную только лучами частичного внутреннего отражения. Граница между ними точно соответствует предельному углу. На рис. 12, б

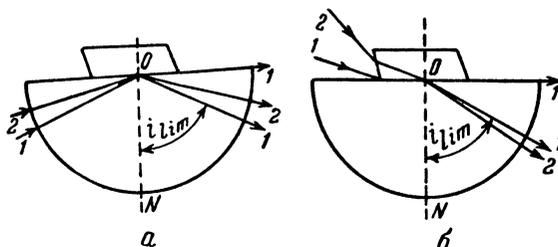


Рис. 12. Схема хода лучей в рефрактометре
а—при освещении снизу; б—при освещении сверху

показан ход лучей в рефрактометре при освещении сверху, со стороны пластинки. Как видно из этого рисунка, темная и светлая половинки меняются своими местами, причем здесь, в противоположность рис. 12, а получается не относительная, а полная темнота.

В оптической трубе рефрактометра находится шкала показателей преломления. Данные шкалы вычислены из предельных углов i_{lim} по формуле $N = N_1 \sin i_{lim}$ (где N_1 — показатель преломления стекла полушария, а $\sin i_{lim} = n_1$ — показателю преломления пластинки относительно стекла полушария).

Точность измерения показателя преломления на описанном выше рефрактометре не превышает 2—3 единиц третьего десятичного знака. Более совершенные инструменты этого рода с точной установкой полушария, с оптической трубой, вращающейся вокруг горизонтальной оси, со специальным лимбом для отсчета углов i_{lim} , с поляризационными приспособлениями и т. д., дают соответственно и большую точность, до четвертого десятичного знака. Один из таких рефрактометров изображен на рис. 13.

Иммерсионный метод. Если исследование светопреломления ведется по методу призмы и рефрактометра с полушарием, то при отсутствии подходящих естественных граней приходится создавать их на кристаллах искусственно — путем выпиливания, шлифования и полирования. Ввиду известной громоздкости всех этих операций, на практике светопреломление кристаллических тел определяется часто иначе — путем сравнения его

с известным заранее светопреломлением той или иной жидкости. Самое определение производится под микроскопом. При этом наблюдают тончайшие зернышки (пыль) кристаллов, погруженные в капельку жидкости и смачиваемые ею со всех сторон. Если светопреломление жидкости сильно отличается от светопреломления твердого тела, то контуры зернышек представляются резко очерченными, очень яркими вследствие явлений полного внутреннего отражения на границе обеих сред. Чем ближе друг к другу величины светопреломления твердого и жидкого тел, тем менее резкими становятся контуры, пока, наконец, при равенстве обеих величин они совершенно исчезают, и зерна, если только они имеют одинаковую с жидкостью окраску, становятся совершенно неразличимыми в ней.

Для ускорения определения показателей преломления по указанному способу погружения, или иммерсии, желательно уметь не только констатировать равенство величин светопреломления жидкого и твердого веществ, но и отличать случаи, когда светопреломление N твердого вещества больше, чем светопреломление N_1 жидкого, т. е. когда $N > N_1$, от таких, когда, наоборот, $N < N_1$. Достигается это весьма просто при

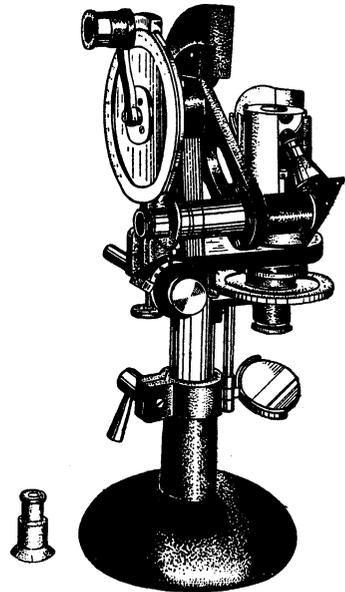


Рис. 13. Общий вид большого лабораторного рефрактометра

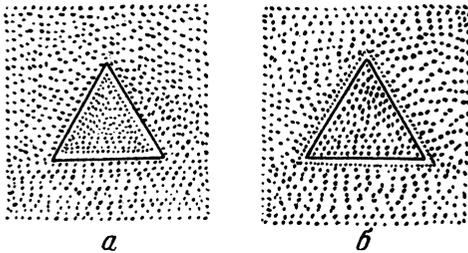


Рис. 14. Полоска Бекке в случае зерна, светопреломляющего выше жидкости
a—при подъеме трубы микроскопа; *б*—при ее опускании

помощи так называемой линии Бекке — светлой полоски на границе твердого и жидкого веществ, ясно распознаваемой при средних увеличениях микроскопа и при достаточном перемещении вверх и вниз его трубы. Если передвигаем трубу вверх, то полоска Бекке перемещается в сторону среды, обладающей более высоким

светопреломлением (треугольник рис. 14, *a*). Если же опустят трубу вниз, то она перемещается в обратном

направлении — в сторону слабее преломляющей среды (рис. 14, б)¹.

Линия Бекке появляется в результате интерференции лучей, прошедших через зерно и жидкость, и усиливается лучами, претерпевшими полное внутреннее отражение от пограничной поверхности твердого и жидкого тел.

Для определения по иммерсионному методу можно употреблять различные жидкости (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Жидкости, применяемые для определения светопреломления по иммерсионному методу

№ п/п	Название жидкости	Показатель преломления
1	Вода	1,336
2	Этиловый спирт	1,360
3	Глицерин	1,467
4	Касторовое масло	1,478
5	Ксилол	1,487
6	Кедровое масло	1,502
7	Монохлорбензол	1,521
8	Гвоздичное масло	1,544
9	Нитробензол	1,552
10	Монобромбензол	1,561
11	Бромформ	1,590
12	Коричное масло	1,605
13	Моноидбензол	1,619
14	α -монохлорнафталин	1,635
15	α -монобромнафталин	1,655
16	Иодистый метилен	1,740
17	Раствор серы в иодистом метиле	1,800
18	Раствор серы и фосфора в иодистом метиле	2,06

¹ Правило движения полоски Бекке каждый работающий с микроскопом должен запомнить совершенно твердо. Лодочников рекомендует для этого следующее мнемоническое правило: „Полоска Бекке при **П**одъеме трубы микроскопа движется в **П**оложительную сторону (в сторону большего показателя преломления), а при **О**пускании — в **О**трицательную (в сторону вещества с меньшим показателем преломления)“.

Пример определения. При погружении мелких осколков минерала лейцита в различные жидкости и при наблюдении (каждый раз) полоски Бекке под микроскопом оказалось, что светопреломление лейцита больше 1,502 (кедровое масло) и меньше 1,521 (моноклорбензол). Отсюда мы заключаем, что для лейцита $N = 1,511 \pm 0,010$. ($N = \frac{1,502 + 1,521}{2} = 1,511$; ошибка составляет $\frac{1,521 - 1,502}{2} = 0,010$.)

Обычно при работе применяются заранее изготовленные наборы иммерсионных жидкостей, где, кроме простых жидкостей, используют их смеси. Наиболее употребительным является набор, состоящий из ста иммерсионных жидкостей. Светопреломление каждой последующей жидкости больше светопреломления предыдущей: в средней части такого набора — на 0,003, а в области малых показателей — на 0,010—0,005.

При наличии рефрактометра или гониометра с полый призмой наборы иммерсионных жидкостей можно готовить в любой лаборатории. Жидкости для смесей необходимо подбирать таким образом, чтобы получалась однородная смесь, а не эмульсия (жидкость мутная), и чтобы температуры кипения смешиваемых жидкостей были близки между собой, так как при удалении легколетучей жидкости из смеси светопреломление этой последней будет сильно изменяться. В зависимости от назначения наборы можно готовить из различных исходных материалов. Очень хорошо сохраняются жидкости, приготовленные из различных масел, но их трудно отмывать от препарата; жидкости из углеводов легко отмываются; но растворяют органические минералы и очень легколетучи, они испаряются иногда раньше, чем удастся закончить измерение. Жидкости из воды и глицерина хотя и очень устойчивы, но растворяют многие минеральные соли, причем изменяют свое светопреломление, и т. д. Наиболее часто в качестве низкокипящих жидкостей применяют низкокипящие дистиллаты нефти (до 1,470), для интервала 1,470—1,655 — смеси высококипящего бензинового дистиллата и α -монобромнафталина, а далее — смеси этого последнего и иодистого метилена.

Даже хорошо подобранные наборы жидкостей требуют периодической проверки (примерно один раз в год) на рефрактометре. Для этого наблюдают полное внутреннее отражение лучей от нижней поверхности капельки, помещенной на полушарии рефрактометра (стр. 14).

При обычной работе с готовым набором и без учета температуры точность определения не превышает $\pm 0,003$. При проверке жидкостей на большом рефрактометре точность определения легко может быть доведена до третьего и даже,

если учитывать температуру, и дисперсию, до четвертого десятичного знака.

Обычно наборы иммерсионных жидкостей состояются до максимального светопреломления $N = 1,80$. Жидкости с более высоким светопреломлением можно получать, растворяя в иодистом метиле иодоформ и иодиды сурьмы, мышьяка и олова (до 1,86) или в том же иодистом метиле — серу и фосфор (до 2,06). Растворы обоих типов неудобны; они чрезвычайно ядовиты, а фосфорная жидкость, кроме того, может самовозгораться. Поэтому для определения светопреломления высокопреломляющих веществ лучше прибегать к иммерсионным сплавам. Порошок испытуемого вещества загружается в сжиженный путем нагревания сплав; наблюдение линии Бекке ведется после затвердевания и охлаждения сплава. Рекомендуемые сплавы: 1) пиперин с иодистой сурьмой ($N = 1,9$ при 50% и 2,0 при 75% SbJ_3); 2) сера с селеном (при наблюдении в натриевом свете $N = 2,1$ при 30%, 2,2 при 50%, 2,3 при 65%, 2,4 при 73%, 2,5 при 80%, 2,6 при 86% и 2,7 при 91% Se); 3) селен с селенистым мышьяком (N от 2,7 до 3,2 в зависимости от состава сплава и длины волны применяемого света).

Светопреломление сплава определяется по методу призмы, причем в призму заплavляется исследуемое вещество.

Точность определения светопреломления при применении сплавов намного ниже, чем при работе с жидкостями, и практически не превышает $\pm 0,01 - 0,03$.

Дисперсия показателей преломления твердых тел обычно ниже, чем жидкостей, так что, подбирая иммерсионные жидкости, можно достигнуть полного равенства светопреломления только для света какой-либо одной длины волны, например, для желтых лучей. Тогда для красных лучей светопреломление жидкости будет ниже, чем твердого вещества, а для синих, наоборот, выше, и наблюдатель может увидеть две цветные полосы Бекке — голубую, набегающую при подъеме трубы микроскопа на жидкость, и красновато-оранжевую, движущуюся с жидкости на минерал. Для суждения о величине показателя преломления (для желтого цвета) в этом случае приходится руководствоваться относительной яркостью голубой и оранжевой полос или применять монохроматический свет.

Описанным явлением различной дисперсии твердого вещества и жидкости можно воспользоваться для построения кривой дисперсии твердого тела, если известны дисперсии жидкостей. Помещая твердое тело в различные жидкости, изменяют состав света и по полоске Бекке фиксируют момент совпадения показателей преломления. Полученные данные служат для построения кривой дисперсии искомого вещества.

Подобным образом можно использовать изменение светопреломления с температурой. Светопреломление жидкостей

при нагревании падает значительно быстрее, чем светопреломление твердых тел.

Разновидность иммерсионного метода, при которой для определения светопреломления минеральных зерен используют изменение состава света и температуры жидкостей, носит название метода двойной вариации. Применение его особенно удобно при работе со сплавами, где смена иммерсионных сред особенно затруднительна.

§ 3. ПРОХОЖДЕНИЕ СВЕТА ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛЫ

Изотропные и анизотропные вещества. Двупреломление. Измеряя показатели преломления по различным направлениям в каком-нибудь оптически изотропном веществе — аморфной материи или кристалле кубической системы, — мы, разумеется, не найдем никакой разницы в их величинах; по всем направлениям они сохраняют одно и то же значение. Иначе говоря, подобно поверхности световых скоростей, поверхность показателей преломления должна иметь сферическую (шаровую) форму. Совершенно иначе обстоит дело, когда от аморфного или кубического вещества мы переходим к кристаллам иных систем. Все они оказываются анизотропными. При этом не только скорости распространения света и показатели преломления меняются в них с направлением, но и самые лучи в них раздваиваются. Из одного луча получаются два, каждый со своим показателем преломления. Возникает, таким образом, новое и совершенно оригинальное явление двупреломления (двойного лучепреломления).

Двупреломление в исландском шпате. Впервые это явление наблюдалось в спайных кусках совершенно прозрачного и бесцветного кальцита, ввезенного из Исландии, так называемого исландского шпата. Этот минерал и ныне является наилучшим объектом для наблюдения и исследования двупреломления непосредственно, без применения специальных и сложных оптических инструментов.

Итак, будем рассматривать какой-нибудь маленький предмет, например, отверстие в черной ширмочке, через спайный ромбоэдр исландского шпата. Мы увидим вместо одного два изображения этого отверстия (рис. 15). Они располагаются по прямой, параллельной короткой диагонали AB той ромбической площадки исландского шпата, через которую мы рассматриваем наше отверстие. Будем вращать кристалл вокруг луча, идущего из отверстия к нашему глазу. Луч и та площадка (или, точнее, пара параллельных площадок), через которую мы производим наблюдение, предполагаются при этом взаимно перпендикулярными. При указанном вращении одно изображение останется неподвижным, а другое будет вращаться вокруг первого

вместе с поворотом короткой диагонали. Когда кристалл повернется на 360° , оно опишет маленькую окружность.

Если мы возьмем сечение исландского шпата, проходящее через луч и малую диагональ AB^1 , то, очевидно, раздвоение и ход лучей в кристалле надо представлять себе так, как это изображено на рис. 16. Один луч проходит через кристалл

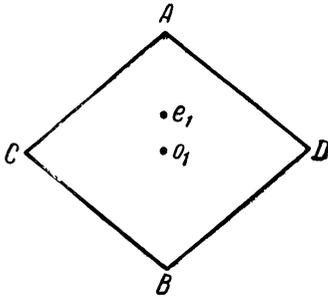


Рис. 15. Вид точки через спайный обломок кристалла исландского шпата

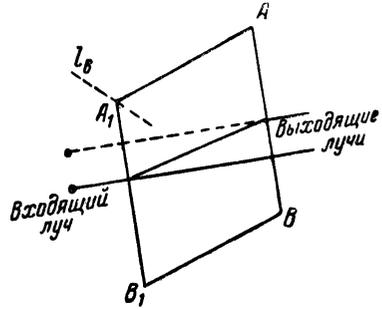


Рис. 16. Ход лучей света в спайном обломке исландского шпата

без преломления, а другой преломляется, отклоняясь в сторону кристалла, но оставаясь в то же время в плоскости малой диагонали.

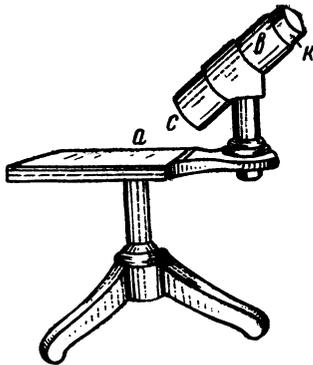


Рис. 17. Прибор для получения поляризованного света при помощи отражения

В описанном выше опыте мы пользовались обыкновенным светом. Повторим все буквально, но применяя вместо обыкновенного поляризованный свет. Очень удобен для этой цели специальный прибор, где поляризатором служит темное зеркало a (рис. 17). К нему под углом полной поляризации (тангенс этого угла, как известно, равен показателю преломления стекла зеркала) прикреплена полая трубка b , в которую вставлены: со стороны зеркала — ширмочка с отверстием c , а с противоположной — исландский шпат в оправе, вращающийся в трубке k . При наблюдении отверстия в ширмочке через исландский шпат и при вращении этого

последнего, явления, описанные выше, повторяются, но с той разницей, что изображения отверстия, имевшие в первом

¹ Собственно, через параллель малой диагонали, но так как в кристалле все параллельные направления тождественны, то это оправдывает выражение „через малую диагональ“.

опыте одинаковую и постоянную интенсивность, теперь приобретают неодинаковую и переменную яркость.

При отражении от зеркала лучи поляризуются, как известно, в перпендикулярной к зеркалу плоскости их падения. Колебания их, перпендикулярные к плоскости падения, скользят, таким образом, по зеркалу, в противоположность нормальным к ним бьющим колебаниям тех лучей, которые поляризуются путем преломления. Вращая исландский шпат, приведем его в такое положение, чтобы длинная диагональ пары ромбических площадок, через которую мы производим наблюдение, была направлена параллельно колебаниям лучей, поступающих от зеркала. Оказывается, что тогда мы будем видеть через исландский шпат только одно изображение, а именно центральное, а другое, краевое (вращающееся вместе с кристаллом), будет находиться в положении затемнения. Будем поворачивать исландский шпат на постепенно возрастающие углы вправо (или влево). Одновременно с этим появляется и второе, краевое, изображение, сначала еще темное, а потом, вместе с увеличением углов поворота, все более яркое, за счет одновременного убывания яркости центрального изображения. При угле в 45° степени яркости обоих изображений выравниваются, и каждая из них равна половинной яркости входящего луча. При дальнейшем увеличении углов поворота яркость краевого изображения все возрастает, а центрального—убывает, пока, наконец, при 90° , когда колебания входящего луча становятся параллельны малой диагонали, остается одно только краевое изображение, а центральное совершенно темнеет.

Все описанные явления получают надлежащее объяснение, если мы допустим, что в условиях данного опыта мы и в исландском шпате имеем дело с лучами поляризованными, причем луч, дающий центральное изображение отверстия, поляризован в плоскости малой диагонали и совершает свои колебания по большой диагонали кристалла, а луч, дающий краевое изображение, наоборот, поляризован в плоскости большой диагонали и колеблется по малой. Те колебания, поступающие от зеркала, которые не параллельны ни той, ни другой диагонали, должны разлагаться по правилу параллелограмма по диагоналям; получающиеся при этом амплитуды определяют относительную яркость лучей. Луч с колебаниями по длинной диагонали мы называем обыкновенным поляризованным и обозначаем его через *o*, а луч с колебаниями по короткой диагонали — необыкновенным поляризованным лучом и обозначаем его буквой *e*.

Естественно возникает вопрос: каковы же были те лучи, которые мы получали в исландском шпате в первом опыте, при употреблении обыкновенного света; были ли они также поляризованы по диагоналям или же подобной поляризации

там не было? Ответ на этот вопрос, и ответ положительный,— что луч обыкновенного света также распадается в исландском шпате на два луча o и e , поляризованные взаимноперпендикулярно, по диагоналям, мы получаем на основании третьего опыта, когда на пути лучей от ширмочки к нашему глазу

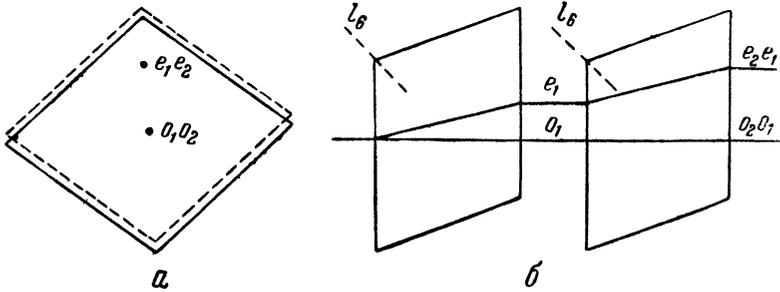


Рис. 18. Вид точки через два спайных обломка исландского шпата в параллельном положении и ход лучей в них

мы устанавливаем не один, а два, последовательно один за другим, одинаковых ромбоэдра исландского шпата.

Будем вращать один кристалл вокруг луча, а другой оставим неподвижным.

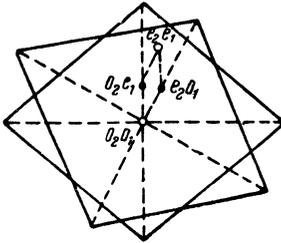


Рис. 19. Вид точки через два равных спайных обломка исландского шпата, один из которых повернут по отношению к другому на некоторый угол

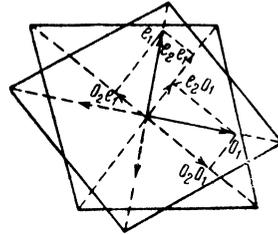


Рис. 20. Направления колебаний и амплитуды их для четырех изображений, получаемых при рассмотрении точки через два равных спайных обломка исландского шпата, один из которых повернут по отношению к другому на некоторый угол

Положение первое: полная взаимная параллельность и диагоналей и l_0 обоих кристаллов. Два изображения: o_2o_1 и e_2e_1 одинаковой яркости (рис. 18, а) и на двойном расстоянии одно от другого по сравнению с опытом первым (рис. 15, а). Вспомогательный рисунок (рис. 18, б) показывает, что в данном случае мы как бы удвоили толщину слоя, через который проходят световые лучи.

Положение второе: второй ромбоэдр исландского шпата повернут относительно первого на угол меньше 45° . Четыре изображения: два более ярких — o_2o_1 и e_2e_1 и два более темных — e_2o_1 и o_2e_1 (рис. 19). Изображения расположены по углам ромба, стороны которого параллельны диагоналям обоих ромбоэдров; длина этих сторон равна расстоянию между изображениями одного ромбоэдра (рис. 15). По аналогии с опытом вторым, единственно логичное объяснение в этом случае состоит в том, что в первом ромбоэдре исландского шпата возникают два поляризованных луча с колебаниями по длинной (o) и по короткой (e) диагоналям. Во втором каждый из лучей должен разложиться на два новых луча, с колебаниями по его (второго ромбоэдра исландского шпата) диагоналям.

На рис. 20 изображены колебания и амплитуды этих лучей:

- 1) o_2o_1 — обыкновенного луча второго ромбоэдра исландского шпата, происшедшего из обыкновенного первого;
- 2) e_2o_1 — необыкновенного луча второго ромбоэдра исландского шпата, происшедшего из обыкновенного первого;
- 3) o_2e_1 — обыкновенного луча второго ромбоэдра исландского шпата, происшедшего из необыкновенного первого;
- 4) e_2e_1 — необыкновенного луча второго ромбоэдра исландского шпата, происшедшего из необыкновенного первого.

Так как амплитуды колебаний лучей o_2o_1 и e_2e_1 больше амплитуд колебаний e_2o_1 и o_2e_1 , то яркость изображений, которые дает первая пара, больше, чем яркость изображений от последней пары.

Топография изображений o_2o_1 и o_2e_1 на рис. 19 совпадает с топографией двух изображений на рис. 15. Изображения e_2o_1 и e_2e_1 отклонены от них в направлении малой диагонали второго ромбоэдра исландского шпата.

Положение третье: второй ромбоэдр исландского шпата повернут на угол 45° . Амплитуды обеих пар лучей выравниваются: $o_2o_1 = e_2o_1 = e_2e_1 = o_2e_1$. Четыре изображения одинаковой яркости.

Положение четвертое: угол поворота больше 45 и меньше 90° . Амплитуды и яркости: $e_2o_1 > e_2e_1$ и $o_2e_1 > o_2o_1$.

Положение пятое: угол поворота 90° . Амплитуды и яркости o_2o_1 и e_2e_1 становятся равными нулю. Остаются только два луча и два изображения — e_2o_1 и o_2e_1 (рис. 21).

Положение шестое: угол поворота 180° . Одно изображение, соответственно обратному расположению l_6 в обоих индивидах, как представлено в разрезе по направлению лучей на вспомогательном рисунке 22.

Еще один вопрос: как объяснить, что два поляризованных луча, возникающих в исландском шпате из одного луча обыкновенного света, обладают одинаковой и постоянной яркостью? Ответ простой. Так как согласно определению,

приведенному выше, плоскость колебаний луча обыкновенного света все время меняется (как бы вращаясь вокруг луча), то в сущности и оба поляризованных луча, происходящие из него, должны получать все время переменные амплитуды и обладать переменной яркостью, сменяющейся постоянно и поочередно от максимума до нуля. Так как, однако, эта смена происходит весьма быстро, то на-глаз и получается впечатление постоянной и средней яркости обоих лучей, обоих изображений.

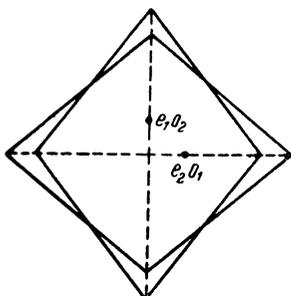


Рис. 21. Вид точки через два равных спайных обломка исландского шпата при повороте одного из них по отношению к другому на угол в 90°

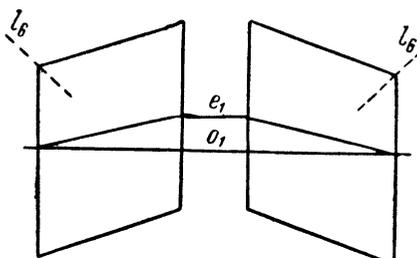


Рис. 22. Ход лучей в двух равных спайных обломках кристалла исландского шпата, один из которых повернут на 180° по отношению к другому

Прежде чем идти дальше, сделаем замечание о плоскостях колебаний тех двух поляризованных лучей, которые возникали в исландском шпате в условиях наших опытов. Плоскости эти определяются каждая направлением луча и соответственной диагональю ромба. Но, как следует из симметрии кристалла, плоскость колебаний необыкновенного луча должна заключать в себе наряду с малой диагональю также и главную кристаллическую ось l_6 , и таким образом она должна совпадать с одним из главных сечений исландского шпата. Следовательно, мы можем сказать и так: *луч необыкновенный колеблется в главном сечении, а луч обыкновенный — в плоскости, перпендикулярной к главному сечению кристалла.*

Поставим теперь следующий ряд опытов. Будем выпиливать на ромбоэдре исландского шпата пары искусственных площадок, параллельных между собой. Пусть расстояния между площадками в каждой паре равны толщине спайного ромбоэдра исландского шпата предыдущих опытов, углы же наклона к l_6 для каждой пары различны. Рассмотрим пары, выпиленные: 1) под такими же углами, как $(10\bar{1}1)$, 2) под иными углами, чем $(10\bar{1}1)$, 3) параллельно l_6 и 4) перпендикулярно к l_6 . Через эти пары будем рассматривать отверстие в ширмочке.

В первом случае повторяются буквально все те же явления, что и при наблюдении отверстия через спайный кусок исланд-

ского шпата. Появляются два изображения отверстия, и на прежнем расстоянии друг от друга. Линия, соединяющая их, опять лежит в плоскости, проходящей через луч и через l_6 . Все такие плоскости, очевидно, представляют собой не что иное, как оптические главные сечения кристалла. Оптическая симметрия оказывается, таким образом, выше симметрии пространственной решетки исландского шпата. Вместо l_6 геометрической мы имеем здесь L_∞ оптическую. Будем называть эту L_∞ оптической осью.

Во всех случаях второго рода опять повторяются те же явления. Разница по сравнению с первым случаем заключается, однако, в том, что углы расхождения между обыкновенным и необыкновенным лучами и, соответственно с этим, расстояния между изображениями o и e не остаются здесь прежними, а изменяются в зависимости от угла наклона, под которым пластинка выпиlena по отношению к l_6 .

В третьем и четвертом случаях нет видимого дупреломления; наблюдается только одно изображение отверстия ширмочки.

Поверхность показателей преломления. Для того чтобы разбраться во всех описанных явлениях, необходимо обратиться к рефрактометру. Лучше всего использовать при этом пластинку, отшлифованную и отполированную по какой-нибудь плоскости, параллельной l_6 , т. е. по произвольному главному сечению исландского шпата.

Будем вращать вокруг вертикальной оси полушарие рефрактометра вместе с наклеенной на него пластинкой и одновременно регистрировать показатели преломления пластинки.

1. l_6 минерала лежит в плоскости падения. Предельный луч совпадает в своем направлении в кристалле с этой осью¹. Получается один предельный угол полного внутреннего отражения, соответствующий $N = 1,66$.

2. l_6 повернута от плоскости падения и, следовательно, от направления предельного луча в пластинке на некоторый угол α . Возникают два предельных угла, соответствующих $N = 1,66$ и $N_1 < 1,66$.

3. Когда α изменяется в пределах от 0 до 90° , N остается постоянным, а N_1 изменяется: чем больше α , тем меньше N_1 . При $\alpha = 90^\circ$ мы имеем наименьшее значение $N_1 = 1,48$. Продолжая вращение полушария, мы наблюдаем правильное повторение явлений: N не изменяется, N_1 изменяется. В пределах углов между 90 и 180° он возрастает от 1,48 до 1,66; между 180 и 270° он уменьшается от 1,66 до 1,48; между 270 и 360° вновь возрастает от 1,48 до 1,66.

¹ Точнее, совпадал бы, располагаясь точно на границе кристалла с полушарием, если бы действительно проникал в кристалл, чему препятствует полное внутреннее отражение.

Если, исходя из какой-нибудь точки, нанести на бумагу полученные значения в виде векторов и соединить концы векторов непрерывными кривыми, то оказывается, что кривая, соответствующая N , будет кругом радиуса 1,66, а кривая, относящаяся к N_1 , — эллипсом, построенным на полуосях 1,48 и 1,66. Круг и эллипс касаются друг друга в двух точках, лежащих на направлении оси l_6 (рис. 23)¹.

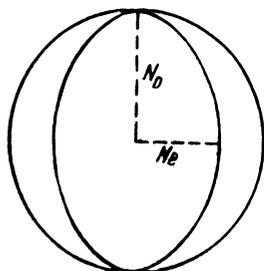


Рис. 23. Поверхность показателей преломления исландского шпата в разрезе, параллельном оптической оси

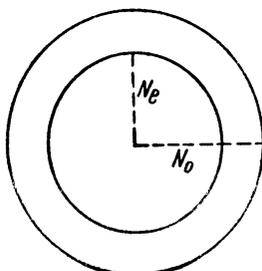


Рис. 24. Поверхность показателей преломления исландского шпата для разреза, перпендикулярного к оптической оси

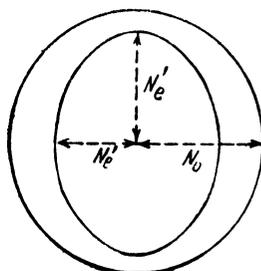


Рис. 25. Поверхность показателей преломления исландского шпата для разреза, параллельного грани спайного ромбоэдра

В соответствии с тем, что мы уже знаем об исландском шпате, вторая кривая должна принадлежать необыкновенным поляризованным лучам, совершающим свои колебания в главном сечении (т. е. в плоскости полушария) и изменяющим свой показатель преломления вместе с направлением луча относительно оптической оси, а первая — обыкновенным поляризованным лучам с колебаниями, направленными перпендикулярно к главному сечению (плоскости полушария) и с постоянным показателем преломления.

Будем обозначать в дальнейшем N через N_0 , а N_1 — через N'_e , причем наибольшее значение последнего при $\alpha = 0$ и 180° равно N_0 , а наименьшее при $\alpha = 90$ и 270° — просто N_e .

Опыт показывает, что все главные сечения исландского шпата оптически тождественны между собой; для любого из них имеют место описанные кривые показателей преломления. Из их совокупности мы получаем соответственную пространственную фигуру — двойную поверхность показателей преломления: эллипсоид вращения с полуосями $N_0 = 1,66$ и $N_e = 1,48$ и описанный вокруг него шар с радиусом $N_0 = 1,66$. Общий их диаметр, направленный по l_6 , совпадает с оптической осью кристалла.

¹ Для большей ясности картины здесь, как и везде дальше, отношение осей эллипса сильно преувеличено на чертеже по сравнению с действительностью.

На рис. 24 и 25 представлены кривые показателей преломления исландского шпата для разрезов, перпендикулярных к оптической оси, и разрезов, наклонных к ней по плоскости $(10\bar{1}1)$. Их направление можно было предсказать и теоретически, исходя из полученной нами двойной поверхности показателей преломления; в таком именно виде они регистрируются нами и на рефрактометре.

Положительные и отрицательные кристаллы. Поверхности показателей преломления, подобные той, которую мы только что вывели для исландского шпата, получаются также для всех других кристаллов, обладающих одной осью высшего наименования: L_3, L_4, L_6, l_4 или l_6 . С этой осью совпадает их оптическая ось. При этом, однако, наблюдаются две категории таких кристаллов: для одних, как для исландского шпата, $N_o > N_e$, и двойная поверхность показателей преломления представляет собой эллипсоид, вписанный в шар; для других, $N_o < N_e$, и двойная рефракционная поверхность представляет собой шар, вписанный в эллипсоид. Первые называются оптически отрицательными, вторые — оптически положительными кристаллами. Примером положительных кристаллов может служить кварц: $N_o = 1,54$ и $N_e = 1,55$.

Построение Гюйгенса для исландского шпата. Построим для случая исландского шпата шар радиуса $o = \frac{1}{N_o}$ и опишем вокруг него эллипсоид вращения с полуосями $o = \frac{1}{N_o}$ и $e = \frac{1}{N_e}$.

По аналогии с изотропными телами, это будут поверхности волны обыкновенных и необыкновенных лучей в исландском шпате. Ими мы можем воспользоваться для построения, по правилу Гюйгенса, лучей, проходящих через исландский шпат во всевозможных направлениях в условиях, описанных выше.

На рис. 26 такая операция выполнена для лучей aa — параллельных оптической оси AA_1 , bb — перпендикулярных к ней и cc — перпендикулярных к плоскости $(10\bar{1}1)$.

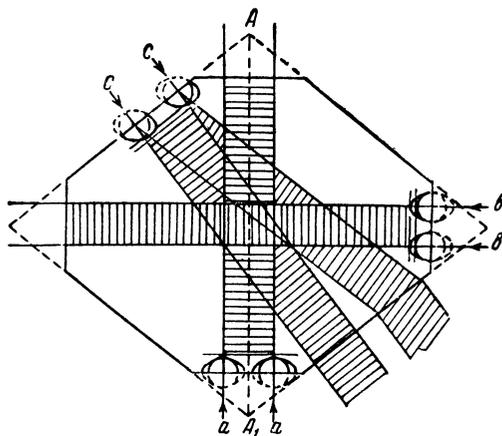


Рис. 26. Построение Гюйгенса для лучей различных направлений в кристалле исландского шпата

Из рис. 26 непосредственно следует, что в первом случае совсем не возникает двух лучей в исландском шпате. Во втором случае два таких луча с различными скоростями образуются, но направление их одинаковое, и на-глаз опять-таки получается впечатление одного луча (одно изображение отверстия ширмочки). И только в третьем случае, когда (как ясно видно на рисунке) направляющая плоскость необыкновенного луча не перпендикулярна к этому последнему, происходит действительное отклонение его от направления обыкновенного луча — отклонение в главном сечении и в сторону оптической оси. Третий случай, в соответствии с опытами, описанными выше, является, очевидно, общим для исландского шпата, для лучей, падающих перпендикулярно на любую пару параллельных площадок, наклоненных к оптической оси под углом, отличным от 0 до 90°.

§ 4. ТЕОРИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛЫ

Световой луч и волновая нормаль. Рис. 26, удовлетворительно объясняющий явления двойного лучепреломления в исландском шпате, одновременно показывает некоторые особенности необыкновенной волны, возникающей в этом минерале, по сравнению с волной обыкновенной. В то время как для последней нет различия между скоростью луча и скоростью волны, так как и та и другая изображаются одинаково круговым радиусом, в случае волны необыкновенной эти скорости отнюдь

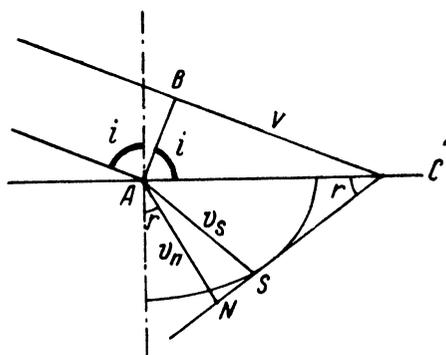


Рис. 27. Преломление необыкновенного луча на границе воздуха и кристалла

AC—граница кристалла; AS—преломленный луч; AN—волновая нормаль; AB—фронт падающего луча; NS—фронт преломленного необыкновенного луча

$$\frac{v}{v_n} = \frac{\sin i}{\sin r} = Ne'$$

не совпадают: скорость луча изображается радиусом-вектором эллипса в точке касания его с направляющей плоскостью, а скорость волны выражается нормалью из средней точки эллипса на направляющую плоскость, так называемой волновой нормалью.

Установив это обстоятельство, вполне естественно задаться вопросом: какая же из двух названных скоростей — скорость луча v_s или скорость волновой нормали v_n — находится в отношении обратной пропорциональности с соответственным показателем пре-

ломления Ne ? Ответ дает рис. 27, из которого непосредственно следует:

$$\frac{v}{v_n} = \frac{\sin i}{\sin r} = Ne',$$

или, если $v = 1$,

$$\frac{1}{v_n} = Ne'.$$

Поверхность нормалей. Приведенное выше равенство указывает на большую теоретическую важность волновых нормалей. Каждая волновая нормаль сопряжена со своим лучом; подобно тому как существует поверхность лучей, должна существовать и поверхность нормалей. На рис. 28 показано построение одного из главных сечений этой поверхности. Лучи, которые служат для этого построения, обозначены здесь простыми цифрами, а сопряженные с ними нормали—цифрами со значком'. Эллипсу лучей (сплошная кривая на рисунке) соответствует, таким образом, овал нормалей (пунктирная кривая), построенный на тех же полуосях, что и эллипс. Поворачивая эллипс и овал на 360° вокруг оптической оси, получаем эллипсоид вращения лучей и оваллоид вращения волновых нормалей для исландского шпата.

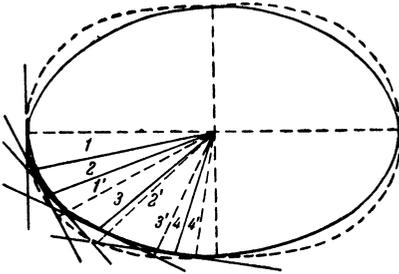


Рис. 28. Эллипс лучей и овал нормалей

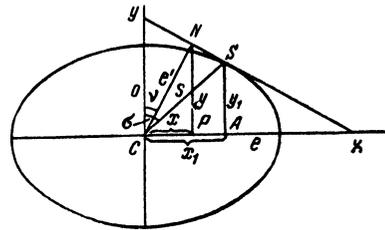


Рис. 29. Определение углового расхождения луча и волновой нормали

Соотношения между лучом, волновой нормалью и светопреломлением необыкновенной волны, только что намеченные нами, могут быть уточнены посредством следующей математической обработки.

Предположим, что на рис. 29 мы имеем некоторое главное сечение эллипсоидальной волны. Его уравнение имеет вид:

$$\frac{x^2}{e^2} + \frac{y^2}{o^2} = 1.$$

Уравнение касательной к этому эллипсу в точке $S(x_1, y_1)$:

$$\frac{x_1 x}{e^2} + \frac{y_1 y}{o^2} = 1.$$

В точке пересечения касательной с осью иксов, когда $y = 0$, а $x = CX$, получаем:

$$\frac{x_1 \cdot CX}{e^2} = 1,$$

или

$$x_1 = \frac{e^2}{CX}.$$

Точно так же в точке пересечения ее с осью игреков, когда $x = 0$, а $y = CY$, имеем:

$$1 = \frac{o^2}{CY}.$$

Из треугольника CNX следует, что $CX = \frac{e'}{\sin \nu}$, и подобным же образом из треугольника CNY получается, что $CY = \frac{e'}{\cos \nu}$. Производим соответственную подстановку:

$$x_1 = \frac{e^2 \sin \nu}{e'}; \quad y_1 = \frac{o^2 \cos \nu}{e'}.$$

$\sin \nu$ и $\cos \nu$ мы можем, далее, заменить их значениями в треугольнике CNP : $\sin \nu = \frac{x}{e'}$, а $\cos \nu = \frac{y}{e'}$. Таким образом

$$x_1 = \frac{e^2 x}{e'^2}; \quad y_1 = \frac{o^2 y}{e'^2}.$$

Но x_1 и y_1 являются координатами эллипса в точке S . Следовательно, мы можем подставить их в уравнение этого эллипса со следующим результатом:

$$\frac{e^2 x^2}{e'^4} + \frac{o^2 y^2}{e'^4} = 1,$$

или, так как $e'^2 = x^2 + y^2$, то

$$\frac{e^2 x^2}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{o^2 y^2}{(x^2 + y^2)^2} = 1,$$

т. е. получается уравнение овала волновых нормалей (уравнение 4-й степени и, следовательно, овал есть кривая 4-го порядка).

В полярных координатах, ввиду того что $x^2 + y^2 = e'^2$, $x = e' \sin \nu$, $y = e' \cos \nu$, то же уравнение переписывается в следующем виде:

$$\frac{e^2 \sin^2 \nu}{e'^2} + \frac{o^2 \cos^2 \nu}{e'^2} = 1.$$

Представляет большой интерес величина $\pm (\sigma - \nu)$ — угловое расхождение луча и волновой нормали в кристаллах.

Из рис. 29 непосредственно следует:

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{x}{y}; \quad \operatorname{tg} \sigma = \frac{x_1}{y_1} = \frac{e^2}{o^2} \cdot \frac{x}{y} = \frac{e^2}{o^2} \cdot \operatorname{tg} \nu;$$

$$\operatorname{tg} (\sigma - \nu) = \frac{\operatorname{tg} \sigma - \operatorname{tg} \nu}{1 + \operatorname{tg} \sigma \cdot \operatorname{tg} \nu} = \frac{\operatorname{tg} \nu (e^2 - o^2)}{o^2 + e^2 \operatorname{tg}^2 \nu}.$$

Определим максимально возможное значение $\sigma - \nu$. Для этого предположим прежде всего, что $\text{tg } \nu_{max} = x$. Тогда

$$\text{tg } (\sigma - \nu)_{max} = \frac{x(e^2 - o^2)}{o^2 + e^2x^2}.$$

Дифференцируем по dx и приравниваем первую производную нулю:

$$\frac{d \text{tg } (\sigma - \nu)_{max}}{dx} = \frac{(o^2 + e^2x^2)(e^2 - o^2) - 2e^2x^2(e^2 - o^2)}{(o^2 + e^2x^2)^2} = 0;$$

$$o^2 = e^2x^2; x = \text{tg } \nu_{max} = \pm \frac{o}{e} = \pm \frac{Ne}{No};$$

$$\text{tg } \sigma_{max} = \pm \frac{o}{e} \cdot \frac{e^2}{o^2} = \pm \frac{e}{o} = \pm \frac{No}{Ne}.$$

Отсюда следует, что $\sigma_{max} + \nu_{max} = 90^\circ$. Для кальцита, пользуясь его $No = 1,6584$ и $Ne = 1,4864$, получаем:

$$\sigma_{max} = 48^\circ 8'; \nu_{max} = 41^\circ 52'; +(\sigma - \nu)_{max} = 6^\circ 16'.$$

Угловое расхождение луча и волновой нормали $(\sigma - \nu)$ определяет в каждом случае видимое расхождение лучей при двупреломлении. Для кальцита эта величина в случае луча, падающего на грань спайного ромбоэдра, приобретает значение, близкое к максимальному: $+(\sigma - \nu) = 6^\circ 14'$.

Кальцит принадлежит к сильно двупреломляющим телам. Для слабодвупреломляющего кварца с $No = 1,5442$ и $Ne = 1,5533$, $-(\sigma - \nu)_{max}$ достигает всего только $0^\circ 20'$. Еще слабее двупреломляет лед: $-(\sigma - \nu)_{max} = 0^\circ 4'$. Совершенно естественно, что ни для льда, ни для кварца, несмотря на то, что они дают прекрасные крупные кристаллы, идеально прозрачные и бесцветные, мы не можем наблюдать двойное лучепреломление непосредственно как для исландского шпата.

От полярного уравнения овала $e^2 \sin^2 \nu + o^2 \cos^2 \nu = e^2$ легко перейти и к показателям преломления. В самом деле, как мы уже знаем, для любого данного направления они определяются как величины, обратные волновым нормалям, т. е.

$$e' = \frac{1}{Ne'}, \quad e = \frac{1}{Ne} \quad \text{и} \quad o = \frac{1}{No}.$$

После соответственной подстановки в полярное уравнение овала, получаем:

$$\frac{Ne'^2 \sin^2 \nu}{Ne^2} + \frac{Ne'^2 \cos^2 \nu}{No^2} = 1.$$

Предположим, что $Ne' \sin \nu = \xi$ и $Ne' \cos \nu = \eta$. Тогда

$$\frac{\xi^2}{Ne^2} + \frac{\eta^2}{No^2} = 1.$$

Но это — не что иное, как уравнение эллипса, т. е. эллипса главного сечения поверхности необыкновенных показателей преломления. Последнюю получаем, повертывая эллипс на 360° вокруг оптической оси.

Двойные поверхности оптически положительных и оптически отрицательных кристаллов. На рис. 30 и 31 показано относительное расположение и размеры главных сечений всех трех двойных оптических поверхностей: на рис. 30 — для положительных, а на рис. 31 — для отрицательных кристаллов.

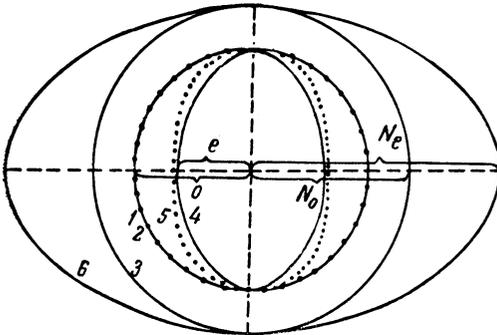


Рис. 30. Относительное расположение и размеры главных сечений всех трех двойных оптических поверхностей для положительных одноосных кристаллов

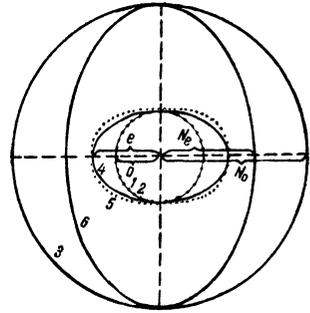


Рис. 31. Относительное расположение и размеры главных сечений всех трех двойных оптических поверхностей для отрицательных одноосных кристаллов

1 и 2 — шар радиуса o , поверхность лучей (нормалей обыкновенной волны); 3 — шар радиуса $No = \frac{1}{o}$, поверхность обыкновенных показателей преломления; 4 — эллипсоид необыкновенных лучей (полуоси o и e); 5 — овалонд нормалей необыкновенной волны (полуоси o и e'), 6 — эллипсоид необыкновенных показателей преломления (полуоси $No = \frac{1}{o}$ и $Ne = \frac{1}{e}$).

Двойная поверхность и индикатриса. Двойные световые поверхности, только что перечисленные нами, на практике весьма часто заменяются соответствующими им поверхностями одинарными. Любое сечение одинарной поверхности заключает в себе два взаимно перпендикулярных вектора, которые определяют обе световые величины — обыкновенную и необыкновенную — в направлении, нормальном к этому сечению. Одинарная поверхность, повторяя геометрический тип необыкновенной части двойной поверхности, строится на тех же полуосях, что и эта последняя, но только означенные полуоси меняются здесь местами: оптическая ось превращается в радиус кругового сечения, а радиус кругового сечения — в оптическую ось. На рис. 32 изображены для отрицательного кристалла главное сечение двойной поверхности лучей сплошными линиями, а главное сечение соответствующей ей одинарной лучевой поверхности — так называемого эллипсоида Френеля — пунктиром. Имея только одну одинарную поверхность, мы можем на основании ее определить любые элементы двойной, напри-

мер, лучевые скорости S_e и S_o в любом направлении S . Эти скорости равны именно полуосям сечения, перпендикулярного к S : одна из полуосей — S_e (пунктир) — лежит в плоскости бумаги, а другая, равная S_o , перпендикулярна к бумаге в точке c .

На рис. 33 аналогичным образом представлены двойная поверхность волны (сплошные линии) и одинарный волновой оваллоид (пунктир).

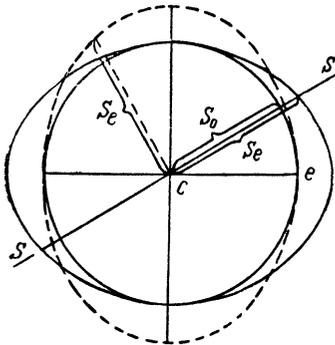


Рис. 32. Построение индикатрисы (пунктир) из двойной оптической поверхности (сплошные линии) для положительных кристаллов

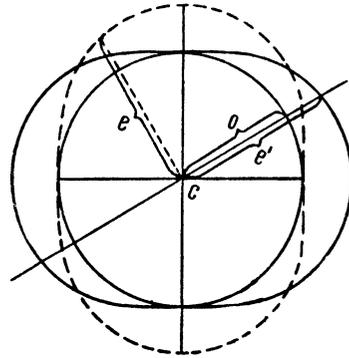


Рис. 33. Двойная поверхность волны (сплошные линии) и одинарный волновой оваллоид (пунктир)

На рис. 34 сплошные линии относятся к двойной поверхности показателей преломления, а пунктир — к одинарной их поверхности, так называемой индикатрисе.

Ввиду того что все оптические поверхности кристалла — и двойные и одинарные — связаны между собой и легко выводятся одна из других, для оптической его характеристики достаточно какой-нибудь одной из этих поверхностей. Удобнее всего для этой цели индикатриса, так как она одинарная и относится к величинам, непосредственно измеряемым в приборах.

В случае кристаллов отрицательных, типа исландского шпата, индикатриса, как мы только что видели, представляет собой эллипсоид сплюснутого вида. В случае положительных кристаллов, вроде кварца, индикатриса, наоборот, вытянута по оптической оси.

Кристаллы одноосные и двуосные. Индикатрисы, рассматривавшиеся нами до сих пор, представляют собой эллипсоиды

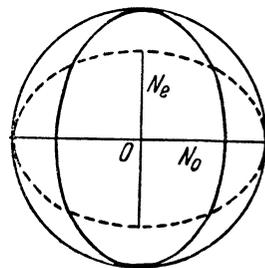


Рис. 34. Двойная поверхность показателей преломления и индикатриса отрицательных одноосных кристаллов

вращения, каждый с одной оптической осью. Кристаллы с такого рода индикатрисой мы называем одноосными. Их оптическая ось является единственным направлением, по которому в них не происходит двойного лучепреломления, и она совпадает с осью вращения индикатрисы, т. е. перпендикулярно к ней расположено круговое сечение индикатрисы. От одноосных кристаллов мы отличаем кристаллы двуосные, с двумя оптическими осями. Индикатрисой двуосных кристаллов является трехосный эллипсоид с тремя различными по длине главными осями. Их оптические оси не совпадают с этими последними. Они представляют собой перпендикуляры к двум круговым сечениям этого эллипсоида и занимают в каждой кристаллической модификации вещества свое особенное положение, в зависимости от относительных размеров главных осей ее индикатрисы.

Одноосная индикатриса, как мы уже говорили, характеризует оптику кристаллов, обладающих одной главной осью симметрии: квадратных и гексагональных. Двуосными называются кристаллы, которые не обладают ни одной главной осью симметрии, т. е. ромбические, моноклинические и триклинические.

Оптическая индикатриса двуосных кристаллов. Представление о характере поверхности показателей преломления двуосных кристаллов мы могли бы получить экспериментальным путем, при помощи какого-нибудь подходящего кристалла и рефрактометра — так, как мы делали это в случае одноосного исландского шпата. Проще, однако, построить ее теоретически, исходя из трехосной индикатрисы. Необходимо лишь предварительно несколько детальнее рассмотреть самую индикатрису.

Обозначим три главных показателя преломления двуосного кристалла, или, что то же, три главные оси его индикатрисы через N_g , N_m и N_p в порядке убывания этих величин, так что N_g будет наибольшая из них, N_m — средняя и N_p — наименьшая. Сечения индикатрисы, проходящие через главные ее оси, будут также главными. В то время как в одноосных кристаллах таких сечений было бесконечное количество, ибо каждое сечение, проходящее через оптическую ось, было главным, здесь мы имеем только три главных сечения: N_g-N_p (рис. 35, а), N_g-N_m (рис. 35, б) и N_m-N_p (рис. 35, в). Наибольший интерес представляет для нас сечение N_g-N_p ; в нем содержатся оси N_g и N_p , а N_m располагается к нему перпендикулярно. Через N_m мы можем провести бесчисленное множество сечений; два из них, с осями N_g-N_m и N_p-N_m , — главные, а остальные — промежуточные, с осями $N_g'-N_m$ и $N_p'-N_m$. Подобно главным сечениям все промежуточные — эллиптические, за исключением, однако, двух круговых,

получающихся в том случае, когда $N_{g'}$ выравнивается с $N_{p'}$ и становится одновременно равным N_m . Векторы AA_2 , перпендикулярные к этим круговым сечениям, и представляют собой не что иное, как оптические оси. Главное сечение N_g-N_p , заключающее в себе оптические оси, называют в кристаллооптике плоскостью оптических осей. Главная ось, делящая пополам острый угол между оптическими осями, получила название острой биссектрисы; при уменьшении этого угла до нуля оптические оси сливаются с биссектрисой,

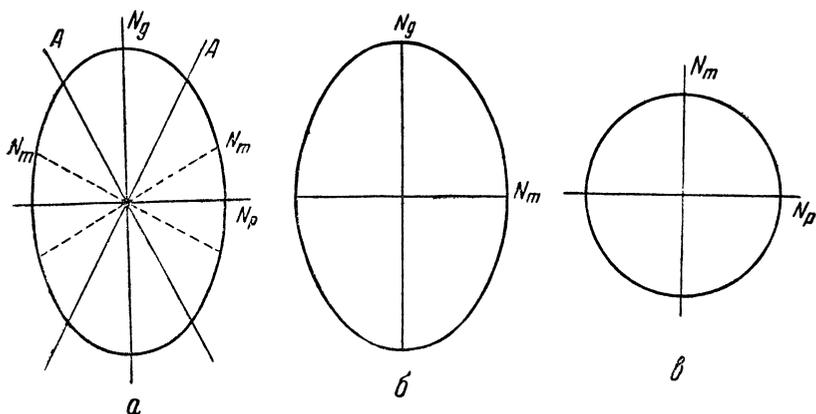


Рис. 35. Главные сечения трехосного эллипсоида — оптической индикатрисы двuosных кристаллов

a—сечение по плоскости оптических осей (перпендикулярное к N_m); *b*—сечение, перпендикулярное к N_p ; *v*—сечение, перпендикулярное к N_g

а двuosный кристалл превращается в одноосный. Тупая биссектриса делит пополам тупой угол между оптическими осями. Ось N_m , как нормальная к плоскости оптических осей, носит наименование оптической нормали.

Положительная и отрицательная индикатриса. Угол оптических осей. Назовем N_g положительной, а N_p —отрицательной биссектрисами. Знак всей индикатрисы, или, как говорят, всего кристалла, определяется знаком острой биссектрисы. Если острой биссектрисой является N_g , как на рис. 35, *a*, то индикатриса и кристалл положительны, а если N_p , то отрицательны¹. Величина угла оптических осей, обозначаемая обычно через $2V$, не одинакова для различных веществ.

¹ Как и в случае одноосных веществ, положительный или отрицательный знак индикатрисы и здесь может быть определен по относительным величинам осей индикатрисы, поскольку последними определяются форма ее и положение оптических осей. N_g будет тогда острой биссектрисой, когда $N_g-N_m > N_m-N_p$ (кристалл положительный), а если $N_g-N_m < N_m-N_p$, то острой биссектрисой будет N_p (кристалл отрицательный).

Подобно показателям преломления, она является индивидуальной константой вещества¹, и может служить для его оптической характеристики. В тех или иных пределах она изменяется вместе с длиной волны применяемого света. Происходящая вследствие этого — в случае применения белого света — его дисперсия называется дисперсией оптических осей². Величина $2V$ является также функцией температуры³.

Поверхность показателей преломления двuosных кристаллов. Общий вид поверхности показателей преломления определяется тремя главными сечениями индикатрисы. Построение ее ведется способом, обратным тому, который мы применяли для получения индикатрисы. В каждом направлении откладываем перпендикулярные к нему величины показателей преломления. Возьмем для примера вертикальное направление (рис. 35, а). В нем расположено N_g , а перпендикулярно к нему — в плоскости чертежа находится N_p и перпендикулярно к чертежу (в трех-

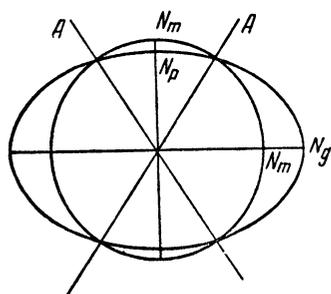


Рис. 36. Сечение в плоскости оптических осей поверхности показателей преломления двuosного кристалла (поверхности Френеля)

осном эллипсоиде, сечением которого является этот рисунок) — N_m . Отложим величины N_p и N_m в том же вертикальном направлении (рис. 36). В горизонтальном направлении (рис. 35, а) расположена ось N_p , а перпендикулярно к ней, по предыдущему, — N_g и N_m , которые и отложены по горизонтали на рис. 36. В направлении A оба перпендикуляра к нему — и в плоскости чертежа, и в плоскости, перпендикулярной к чертежу, — равны N_m , что и отображено на рис. 36. Сделав такое построение по всем направлениям для всех трех сечений оптической индикатрисы, по-

лучим три сечения поверхности показателей преломления.

¹ Точнее, данной кристаллической модификации вещества, так как одно и то же вещество может появляться в различных кристаллах, т. е. в различных пространственных решетках.

² Для большинства веществ она небольшая. Например $2V$ минерала барита ($BaSO_4$) равняется $37^\circ 2'$ в красных лучах (линия C), $37^\circ 20'$ — в желтых (D), $37^\circ 46'$ — в зеленых (E). Некоторые тела, наоборот, обладают сильнейшей дисперсией оптических осей, например минерал брукит (TiO_2), где, следуя от одного конца спектра к другому, мы получаем сначала уменьшение $2V$ до нуля, а потом новое его увеличение — с переходом плоскости осей в другое главное сечение индикатрисы.

³ В случае барита $2V$ растет с температурой: в желтых лучах при 100° он достигает величины $40^\circ 15'$, при 200° — $44^\circ 18'$. Очень чувствителен к температуре $2V$ гипса; он падает от 62° при обыкновенной температуре до 0° при 116° (в красных лучах).

1. Сечению $N_g - N_p$ на рис. 35, a соответствует сечение поверхности показателей преломления на рис. 36. Мы видим здесь две кривые: круг радиуса N_m и эллипс с полуосями N_g и N_p . Они пересекаются между собой в четырех точках, соединяемых попарно оптическими осями. Оси эти, как мы только что видели, являются единственными направлениями, перпендикулярно к которым располагаются в индикатрисе сечения — круги. Перпендикулярно к любому другому направлению получается в индикатрисе эллипс с полуосями: N_m и N_p' — для направлений, находящихся в углу между A и N_g индикатрисы, и N_m и N_g' — для направлений, промежуточных между A и N_p индикатрисы (N_m — перпендикулярно к бумаге, N_g' и N_p' — в плоскости бумаги). Соответственно этому и на рис. 36 показатели преломления будут N_m и N_p' — для первых, N_m и N_g' — для вторых направлений.

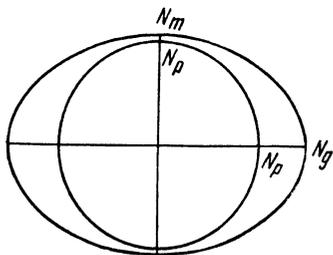


Рис. 37. Сечение поверхностей показателей преломления двусных кристаллов (поверхности Френеля) в плоскости $N_m - N_g$ индикатрисы

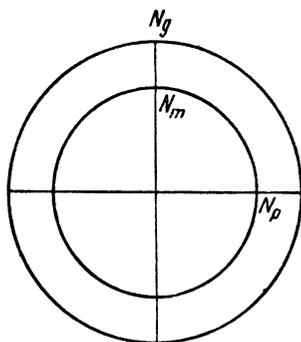


Рис. 38. Сечение поверхности показателей преломления двусных кристаллов (поверхности Френеля) в плоскости $N_m - N_p$ индикатрисы

2. Если исходить из сечения $N_g - N_m$ индикатрисы, то, очевидно, перпендикулярно к любому направлению его будет располагаться в нем эллипс с полуосями N_p (перпендикулярно к бумаге) и N_g' (промежуточный между N_m и N_g , в плоскости бумаги). Нанесение определяемых такими эллипсами показателей преломления дает в результате: круг радиуса N_p и эллипс с полуосями N_g и N_m (рис. 37).

3. Подобным образом для случая $N_m - N_p$ индикатрисы мы получаем соответствующее ему сечение поверхности показателей преломления: круг радиуса N_g и эллипс с полуосями N_m и N_p (рис. 38).

Вычерченные нами три главных сечения поверхности показателей преломления образуют в своей совокупности род скелета этой последней. Получаемая путем интерполяции

между кривыми этого скелета самая поверхность показателей преломления имеет довольно сложный вид, с четырьмя воронкообразными углублениями в местах выходов оптических осей (поверхность Френеля; см. рис. 39).

Подобные сложные поверхности производятся аналогичным образом: от трехосного эллипсоида—для лучей и от волнового овалоида—для волновых нормалей. На рис. 40 представлены главные сечения всех этих поверхностей по плоскости оптических осей для отрицательного кристалла.

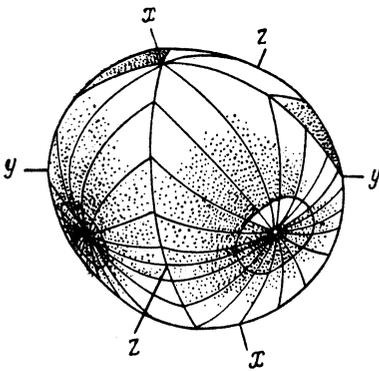


Рис. 39. Общий вид поверхности Френеля (поверхности показателей преломления двуосного кристалла)

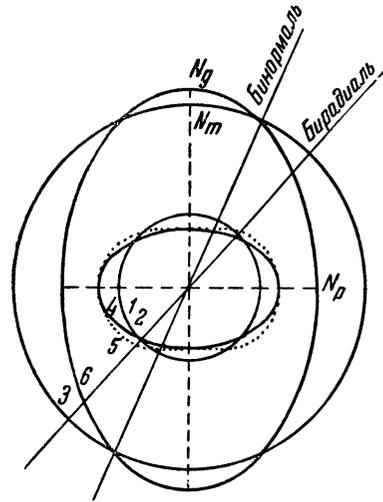


Рис. 40. Относительное расположение и размеры всех трех двойных оптических поверхностей для двуосных кристаллов. Сечение—в плоскости оптических осей

1 и 2 — круг радиуса $b = \frac{1}{Nm}$; 3 — круг радиуса Nm ; 4 — эллипс лучей с полуосями $a = \frac{1}{Np}$ и $c = \frac{1}{Ng}$; 5 — овал нормалей с теми же полуосями a ; 6 — эллипс показателей преломления с полуосями Ng и Np

Внутренняя и внешняя коническая рефракция. Круговые сечения волнового овалоида двуосных кристаллов не совпадают с круговыми сечениями эллипсоида Френеля. Не совпадают поэтому, как видно из рис. 40, и перпендикулярны к ним: 1) оптические оси, называемые иначе бисормальми, или первичными оптическими осями, и 2) лучевые оси, называемые иначе бирадиальми, или вторичными оптическими осями.

Первичные оптические оси называют иногда еще осями внутренней конической рефракции, ввиду того что пучок параллельных лучей, падающий на двуосный кристалл параллельно первой оптической оси (Np и N_{1n_1} , рис. 41), превращается в нем, внутри кристалла, согласно принципу

Гюйенса, в конус лучей (NC и N_1C , рис. 41). Лучевые или вторичные оптические оси называют, наоборот, осями внешней конической рефракции: луч, распространяющийся внутри кристалла по такой оси (CU , рис. 41), распадается, опять-таки согласно построению Гюйенса, в конус лучей (US и US_1) при выходе из кристалла в воздух (в наружную среду).

На рис. 41 все эти лучи вместе с их направляющими плоскостями изображены в разрезе лучевой поверхности по плоскости оптических осей: $\tau\tau$ — касательная к кругу в точке U , $\tau'\tau'$ — касательная к эллипсу в той же точке, $\tau''\tau''$ — плоскость, перпендикулярная к волновой нормали CU ; она является касательной к кругу в точке N и к эллипсу в точке N_1 . Углы конусов наружной (φ_e) и внутренней (φ_i) конической рефракции обычно небольшие, но в случае веществ сильно двупреломляющих они достигают тем не менее целого числа градусов. Например, для серы, где $N_g=2,2483$, $N_m=2,0401$, $N_p=1,9598$ и $2V=69^\circ 5'$, мы имеем: $\varphi_e=7^\circ 20'$ и $\varphi_i=6^\circ 56'$ (все в натриевом свете).

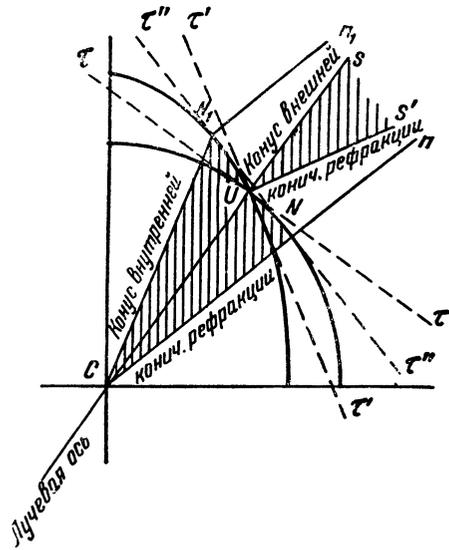


Рис. 41. Внутренняя и внешняя коническая рефракция

Двуосная индикатриса в кристаллах низшей симметрии. Двуосными в оптическом отношении, как было сказано выше, являются кристаллы ромбической, моноклинической и триклинической систем. Различная степень симметрии всех этих кристаллов отражается весьма существенно и на их оптике. В ромбических кристаллах с прямоугольной системой кристаллографических осей эти последние служат также главными осями их оптической индикатрисы. Как и в случае одноосных кристаллов, оси эти не диспергированы. Они сохраняют свое постоянное положение независимо от длины волны применяемого света. Диспергированы только — в пределах своей плоскости и симметрично относительно биссектрис — оптические оси.

В моноклинических кристаллах, как известно, только одна кристаллическая ось b перпендикулярна к двум другим — a и c , а эти последние пересекаются между собой под углами,

Оптические свойства кристаллов

Геометрические свойства				Оптическая характеристика				
Система	Симметрия	Отношения осей	Углы между осями	Оптический характер	Форма оптич. индикатрисы	Ориентировка индикатрисы	Дисперсия	Возможные константы
Кубическая	Большая ось одной осей высшего порядка	$a = b = c$	90°	Изотропны	Шар	—	Показателя преломления	N
Квадратная	Одна ось высшего порядка	$a = b \neq c$	90°	Одноосны	Эллипсоид вращения	Оптическая ось совпадает с осью высшего наименования	Показателей преломления и двуупреломления	$N_o, N_e,$ двуупреломление, оптический знак
Гексагональная	То же	$a = b = c$ $\neq k \neq c$	90° и 120°	То же	То же	То же	То же	То же
Тригональная	" "	То же	То же	" "	" "	" "	" "	" "
Ромбическая	Три оси второго порядка	$a \neq b \neq c$	90°	Двуосны	Трехосный эллипсоид	Все оси индикатрисы совпадают с кристаллографическими осями	То же и величины угла оптических осей	$N_g, N_m, N_p,$ двуупреломление, знак, угол оптических осей
Моноклиническая	Одна ось второго порядка	То же	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$ $\gamma = 90^\circ$	То же	То же	Только одна какая-либо ось индикатрисы совпадает с кристаллографическими осями	То же и положения двух осей индикатрисы	То же и угол косоугольного погасания (по отношению к двум осям индикатрисы)
Триклиническая	Нет ни осей, ни плоскостей	" "	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$ $\neq 90^\circ$	" "	" "	Оси индикатрисы не совпадают с кристаллографическими осями	То же и положения осей оптической индикатрисы	То же и угол косоугольного погасания (во всех разрезах)

отличными от прямого. Соответственно с этим и одна только какая-нибудь главная ось индикатрисы совпадает с осью b , а две другие хотя и лежат в плоскости ac , однако они не совмещаются ни с a , ни с c . В каждом веществе они занимают свое особенное положение, причем наряду с оптическими осями обе они диспергированы. На рис. 42 изображено сечение моноклинического кристалла по плоскости ac ; ось b перпендикулярна к чертежу; с ней совпадает ось N_m индикатрисы; N_g и N_p находятся в плоскости ac .

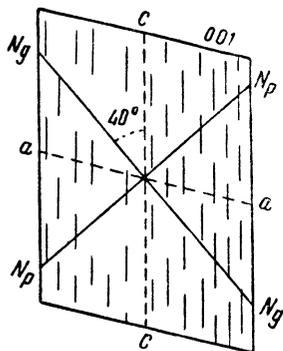


Рис. 42. Положение оптической индикатрисы в моноклиническом кристалле (авгите)

Все оптические свойства кристаллов приведены в табл. 2.

§ 5. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Характер оптической индикатрисы, ее форма и размеры, ее соотношение с геометрической симметрией кристалла — все это, конечно, можно изучать с тем или иным успехом на рефрактометре. Отдавая должное этому прекрасному и точному оптическому инструменту, мы должны тем не менее признать, что по своей популярности и по значению для практических целей он значительно уступает другому кристаллооптическому прибору — поляризационному микроскопу.

Преимущества поляризационного микроскопа заключаются, с одной стороны, в том, что при его помощи оптически исследуют микроскопически малые кристаллики и зерна кристаллов, а с другой, — в том, что исследование это производится не только в простом, но и в поляризованном свете, вследствие чего значительно расширяются его рамки.

Призма Николя. Для поляризации света в нашем микроскопе служат так называемые призмы Николя, или просто николи.

Призма Николя изготавливается из спайного куска исландского шпата, выбитого с таким расчетом, чтобы длина его была в 3,5 раза больше его поперечника. Серединная плоскость этого куска-призмы, проходящая через короткие диагонали его

верхней и нижней ромбических площадок, рассекает кристалл по параллелограмму с углами в 71 и 109° . Параллелограмм и площадки перпендикулярны друг к другу. Не нарушая этой перпендикулярности, подшлифовывают площадки таким образом, чтобы параллелограмм получил углы в 68 и 112° . Затем распиливают призму пополам по плоскости, перпендикулярной и к параллелограмму и к новым площадкам. Половинки по распилу снова склеивают канадским бальзамом¹ и заделывают регенерированную таким образом призму в оправу. На рис. 43 представлено сечение призмы Николя по вышеупомянутому параллелограмму, который является, как видно из предыдущего, также главным сечением призмы и, следовательно, плоскостью колебаний необыкновенного луча.

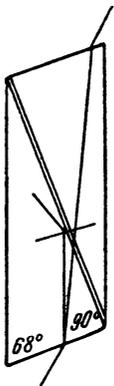


Рис. 43. Устройство призмы Николя и ход лучей в ней

Ход лучей в призме Николя. Через нижнюю площадку призмы Николя будем пропускать в эту последнюю луч обыкновенного света. В нижней части призмы он распадается на два поляризованных луча: необыкновенный, колеблющийся в главном сечении и обладающий в данном случае $n_e' = 1,52$, и обыкновенный, колеблющийся перпендикулярно к главному сечению, с $n_o = 1,66$.

Так как для канадского бальзама показатель преломления $N = 1,53 - 1,54$, то луч необыкновенный, хотя и падает на слой бальзама под очень большим углом, проходит через него и через верхнюю половинку призмы беспрепятственно. Что же касается обыкновенного луча, то при высоком для него светопреломлении исландского шпата, заметно превышающем светопреломление канадского бальзама, угол, под которым он падает на бальзам, оказывается больше предельного. Вследствие этого обыкновенный луч не может проникнуть в бальзам и полностью отражается от него, а затем поглощается черной оправой николя.

В результате, пропуская через призму Николя луч обыкновенного света, по выходе из нее получаем луч поляризованный, необыкновенный, о колебаниях в плоскости главного сечения призмы.

Устройство поляризационного микроскопа. На оси поляризационного микроскопа (рис. 44) помещаются обычно два николя²: один под столиком микроскопа, другой—над столи-

¹ Канадский бальзам — лишенная эфирных масел смола некоторых видов пихты; по внешнему виду напоминает канифоль. Сейчас чаще используется смола сибирской пихты, так называемый „пихтовый бальзам“.

² Собственно призма Николя в описанном выше первоначальном ее виде в современных микроскопах почти не употребляется. Она требует слишком много дорогостоящего исландского шпата. Кроме того, расположенные косо по отношению к входящему и выходящему лучам нижняя и верхняя площад-

ком, между объективом и окуляром (*б* и *м* на рис. 45, изображающем микроскоп в вертикальном разрезе). Первый называется просто поляризатором, а второй — анализатором. Последний устраивается подвижным в горизонтальном направлении, так что его можно отодвигать в сторону от оси микроскопа. В большинстве микроскопов, по крайней мере

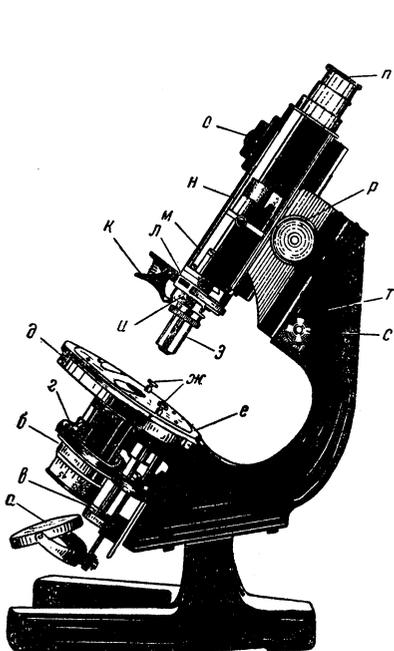


Рис. 44. Внешний вид большого лабораторного поляризационного микроскопа (производства завода „Русские самоцветы“ в Ленинграде)

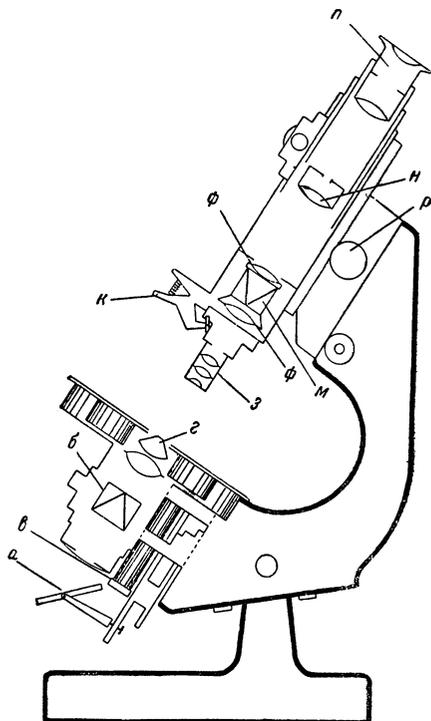


Рис. 45. Схема устройства поляризационного микроскопа

а—осветительное зеркало; *б*—конденсор с поляризующей призмой; *в*—рычаг для выдвигания конденсора. *г*—рычаг для введения линзы Лазо; *д*—вращающийся столик; *е*—нониус; *ж*—лапки, придерживающие шлиф; *з*—объектив; *и*—левый центрировочный винт; *к*—щипцы крепления объектива; *л*—прорезь для компенсаторов; *м*—анализатор; *н*—линза Бертрана; *о*—винт для фокусировки линзы Бертрана; *п*—окуляр; *р*—аппарат для грубой наводки; *с*—винт для микрометрического передвижения, *т*—нониус для отсчета микрометрического движения, *ф*—коррекционные линзы

в более простых моделях, главные сечения николей устанавливаются взаимно перпендикулярно, и такое „скрещенное“, как его называют, положение николей остается здесь постоян-

но несколько сдвигают поле зрения, что создает значительные неудобства в работе. Употребляемые в настоящее время призмы основаны на том же принципе, но более экономичны. Это достигается благодаря применению другого склеивающего вещества (льняное масло и др.), а также благодаря иной ориентировке призмы в кристалле исландского шпата. Тем не менее старое название „николь“ сохраняется для всех этих призм.

ным. Если необходимо параллельное или какое-нибудь иное взаимное положение николей (т. е. их главных сечений), то либо вращают в оправе нижний николю, либо пользуются добавочным третьим николем, заменяющим второй и надеваемым на окуляр, на котором он свободно вращается вокруг оси микроскопа. В более совершенных и новых моделях микроскопов могут вращаться вокруг оси микроскопа также два первых николя, совместно или порознь.

Вид поля зрения при скрещенных николях. Предположим, что николи скрещены между собой. Тогда, несмотря на то, что микроскоп снизу, посредством зеркала, освещен, наверх — в окуляр мы совершенно не получим света. Это объясняется тем, что необыкновенные колебания, прошедшие через поляризатор, становятся обыкновенными в анализаторе и таким образом нацело гасятся (отбрасываются прослойкой канадского бальзама) в этом последнем. При параллельных николях, наоборот, весь свет, поступающий из поляризатора, свободно пропускается и анализатором: поле зрения представляется светлым. На практике обычно пользуются только скрещенными и лишь в некоторых специальных случаях прибегают к параллельным николям.

Крест нитей. Две паутинные нити, натянутые в окуляре микроскопа и расположенные одна параллельно наблюдателю, а другая перпендикулярно к первой, проектируют главные сечения скрещенных николей (плоскости колебаний, пропускаемых николями).

Измерение углов в препарате. Столик микроскопа, куда помещают исследуемые препараты, вращается вокруг оси микроскопа. Углы поворота отсчитываются на градусных делениях, нанесенных по краю столика, при помощи неподвижного нониуса, прилегающего к столику. Последний является, таким образом, угломерным инструментом. Например, если требуется измерить угол aOb между какими-либо двумя направлениями Oa и Ob в препарате (рис. 46), то вершину угла совмещают с центром нитяного креста, а затем, вращая столик, приводят в совпадение с какой-нибудь из окулярных нитей сначала одно, а потом другое направление и отсчитывают при этом оба раза градусные деления круга. Разность отсчетов равняется величине угла aOb .

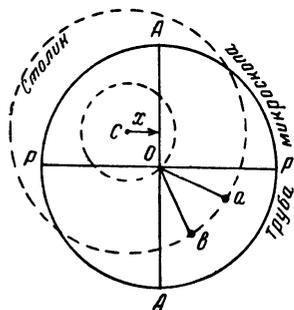


Рис. 46. Схема центрирования микроскопа

Центрирование микроскопа. Для точности измерения необходимо, чтобы ось вращения столика совпала с оптической осью трубы микроскопа, проектирующейся в центре

нитяного креста. Когда этого совпадения нет, если, например, ось столика выходит в точку C , то при вращении его вершина угла O уходит из нитяного центра и движется по окружности радиуса OC . Операция совмещения точки C с нитяным центром, так называемое центрирование микроскопа, осуществляется путем последовательного горизонтального передвижения столика или тубуса по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

В некоторых моделях микроскопов это передвижение совершается в направлениях, параллельных кресту нитей (AA и PP), на расстояние Sx и Ox (рис. 46); в других моделях оно производится под углами в 45° к этим направлениям.

В микроскопах старых систем центрировочное приспособление находится в нижней части трубы микроскопа и в виде двух винтов выходит наружу. При каждой смене объективов приходится повторять операцию центрирования. В более новых конструкциях центрировочное приспособление перенесено на объектив, и центрирование производится при помощи специальных ключей. Это более удобно, так как при смене объективов не нарушается центровка микроскопа.

Сходящийся свет. В поляризационном микроскопе имеется приспособление для перехода от параллельных лучей к так называемому сходящемуся, коническому свету. Достигается это путем вдвигания под препарат особой линзочки, которая называется линзой Лазо. Световые лучи, поступающие от линзочки, сходятся точно в препарате и отсюда вновь расходятся по направлению к объективу. В обычное время линза Лазо находится в скрытом виде в коробке столика, и отсюда она извлекается при помощи специального подвижного рычажка, на конце которого она укреплена неподвижно (z на рис. 44). Для наблюдения препарата в сходящемся свете, получаемом с линзой Лазо, необходимо сильное увеличение микроскопа. Самое наблюдение производится без окуляра или если этот последний употребляется, то со вдвиганием еще одной линзочки, на этот раз в трубу микроскопа, на полпути между анализатором и окуляром (линза Бертрана — n на рис. 44).

Там, где нет специальной оговорки, предполагается, что исследование производится в параллельном свете.

Петрографические шлифы. Кристаллики, подлежащие исследованию, можно непосредственно помещать на столике микроскопа. Но лучше, в особенности, когда мы имеем дело с так называемыми „камнями“ (горными породами, шлаками и т. д.), представляющими собой сложные образования из большого количества отдельных кристаллов, готовить из этих камней путем шлифования специальные препараты. Кусок камня подшлифовывается с одной стороны и наклеивается

этой стороной при помощи предварительно прокипяченного расплавленного канадского бальзама на предметное стекло. При кипячении канадский бальзам теряет содержащиеся в нем эфирные масла и после этого твердеет при обыкновенной температуре. Подклеенный таким бальзамом камешек можно подшлифовать, держась за предметное стекло, и с противоположной стороны. В результате получается тончайшая плоско-параллельная пластинка, так называемый шлиф. Затем его заливают сверху канадским бальзамом и накрывают покровным стеклом. Толщина шлифов, употребляемых в петрографической практике при микроскопическом изучении горных пород, обычно не превышает 0,02—0,03 мм.

§ 6. ДВУПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ КРИСТАЛЛЫ МЕЖДУ СКРЕЩЕННЫМИ НИКОЛЯМИ МИКРОСКОПА

Кристаллы при скрещенных николях. Предположим, что препарат изготовлен и находится на столике микроскопа. Освещение — обычным белым светом. Вдвигая верхний николю, скрещенный с нижним, затемняем поле зрения микроскопа. Очевидно, при этом станут темными все однопреломляющие части препарата. Что касается двоякопреломляющих кристалликов, то они, вообще говоря, останутся светлыми. Возьмем один из таких кристалликов, например, исландский шпат, вырезанный по плоскости ромбоэдра, и исследуем его подробнее при скрещенных николях микроскопа.

Погасание кристаллов. Будем вращать столик. При этом окажется, что исландский шпат не все время будет светлым: при повороте на 360° он четыре раза потемнеет — через каждые 90° , — каждый раз тогда, когда диагонали ромба, по которым совершаются световые колебания в исландском шпате, установятся параллельно главным сечениям николей (нитям окуляра). Из всего того, что мы узнали до сих пор, это понятно само собой. Но почему кристаллик представляется нам светлым во всех остальных положениях относительно николей?

Интерференционная окраска и ее причины. На рис. 47 представлен такой общий случай, когда именно направления колебаний в кристалле, или, что то же, оси эллиптического сечения его индикатрисы, совпадающего с плоскостью препарата, повернуты относительно николей PP и AA на угол α .

Луч, поступающий в кристалл из поляризатора, с колебаниями по PP с амплитудой a , разлагается в нем по правилу параллелограмма на два луча с колебаниями по No и Ne' индикатрисы и с амплитудами $o = a \cos \alpha$ и $e' = a \sin \alpha$. В нижней части анализатора оба эти луча в свою очередь разлагаются на два новых луча каждый, с колебаниями по PP и по AA . Лучи с колебаниями по PP , играющие роль обыкновенных в

анализаторе, гасятся этим последним, а лучи с колебаниями по AA как необыкновенные пропускаются им. Амплитуды этих лучей $e''e' = a \sin \alpha \cdot \cos \alpha$ и $e''o = a \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ равны между собой, причем максимальное значение они приобретают при $\alpha = 45^\circ$.

Колебания лучей, пропускаемых анализатором, как мы только что видели, сводятся им в одну плоскость. Они могут, таким образом, интерферировать между собой. Результат интерференции определяется разностью их хода, получаемой ими во время прохождения через кристаллическую пластинку (скорость лучей разная). Здесь, однако, должна быть введена поправка на $\frac{\lambda}{2}$, так как в описанном выше процессе разложения единого поляризованного луча на два в скрещенных николях один луч повернулся по отношению к другому на 180° ($90^\circ + 90^\circ$) из колебаний по направлению PP в колебания по направлению AA (рис. 47). В результате разность фаз, с которой лучи выходят из анализатора, оказывается прямо противоположной той, с которой они вышли из кристалла. Таким образом, лучи, которые получили в кристалле разность хода $n\lambda + \frac{\lambda}{2}$, не гасят, но максимально усиливают друг друга; гасят же друг друга лучи с разностью хода $n\lambda$.

Если николи не скрещены, но установлены на параллельное положение, лучи, пропускаемые анализатором, как легко сообразить при рассмотрении рис. 47, не меняют своих фаз, и тогда поправки на $\frac{\lambda}{2}$ не приходится делать. Легко видеть также, что световая энергия, пропускаемая параллельным анализатором, является дополнительной к той, которая пропускается анализатором скрещенным.

Как указывалось выше, при интерференции двух лучей, имеющих одинаковую длину волны, в зависимости от их раз-

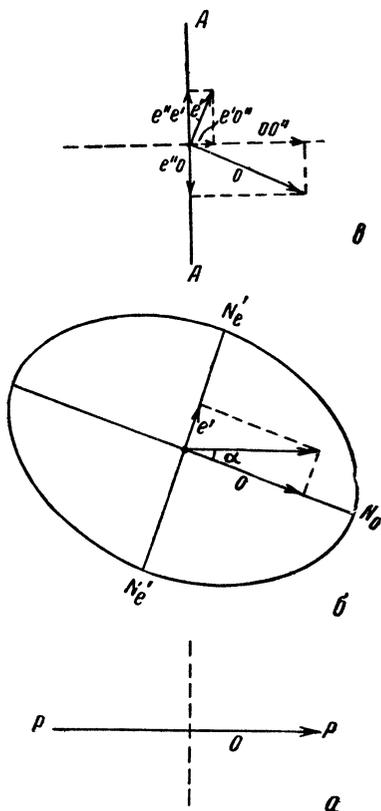


Рис. 47. Направления колебаний света
 a —в плоскости поляризатора; b —в плоскости препарата, лежащего на столике микроскопа, e —в нижней части анализатора

ности фаз, изменяется амплитуда волны от нуля до суммы амплитуд обеих волн. Таким образом если мы работаем с монохроматическим светом, то и в случае двоякопреломляющих тел можно получить при скрещенных николях полную темноту, не нарушаемую вращением столика микроскопа. Для этого нужно только, чтобы в исследуемой кристаллической пластинке создавалась разность хода лучей, равная $n\lambda$ примененного света.

При наблюдении в белом свете, наоборот, такой картины быть не может. Какой бы разностью хода лучей в кристаллике мы ни задавались, она может быть равна $n\lambda$ лишь для отдельных лучей спектра, и только они и будут погашены, а все остальные, для которых данная разность хода равняется $n\lambda + x$ (где $x \ll \frac{\lambda}{2}$), будут лишь в той или иной мере ослаблены, в зависимости от значения x , а не погашены вовсе. В результате кристалл сохраняет свое освещение и лишь приобретает ту или иную окраску в зависимости от разности хода, определяемой в свою очередь: 1) величиной двупреломления кристалла вообще [(Ng—Nr) в случае его двуосности и \pm (No—Ne) в случае одноосности его] и в каждом данном разрезе в частности [(Ng'—Nr') или \pm (No—Ne')] и 2) при прочих равных условиях, толщиной слоя, проходимого лучами в пластинке.

Чтобы объяснить появление тех или иных интерференционных цветов в исследуемой пластинке в зависимости от создаваемой в ней разности хода лучей, возьмем, например, следующий частный случай, когда эта разность хода $\Delta = 530\text{ м}\mu$. Она равна приблизительно $\frac{2}{3}\lambda$ красного цвета, λ зеленого и $\frac{3}{2}\lambda$ фиолетового. Таким образом, результат интерференции при скрещенных николях благоприятен для крайних лучей спектра и неблагоприятен для средних. Так как в то же время в составе белого цвета красные и желтые лучи чувствуются глазом гораздо лучше, чем фиолетовые, то кристалл при $\Delta = 530 \text{ м}\mu$ покажется нам окрашенным в яркокрасный цвет малинового оттенка. При параллельных николях, как следует из сказанного выше, должна появиться дополнительная к красной яркозеленая окраска.

При возрастании разности хода лучей интерференционная окраска меняется определенным образом, как говорят, повышается, как представлено на рис. 48. Отдельные цвета через известные промежутки в величине разности хода повторяются, и таким образом шкала интерференционных цветов делится на порядки. Наиболее резко оттенки цветов выражены в первом порядке. Они постепенно бледнеют в последующих порядках и, наконец, при очень больших разностях хода пропадают почти совершенно и замещаются общей

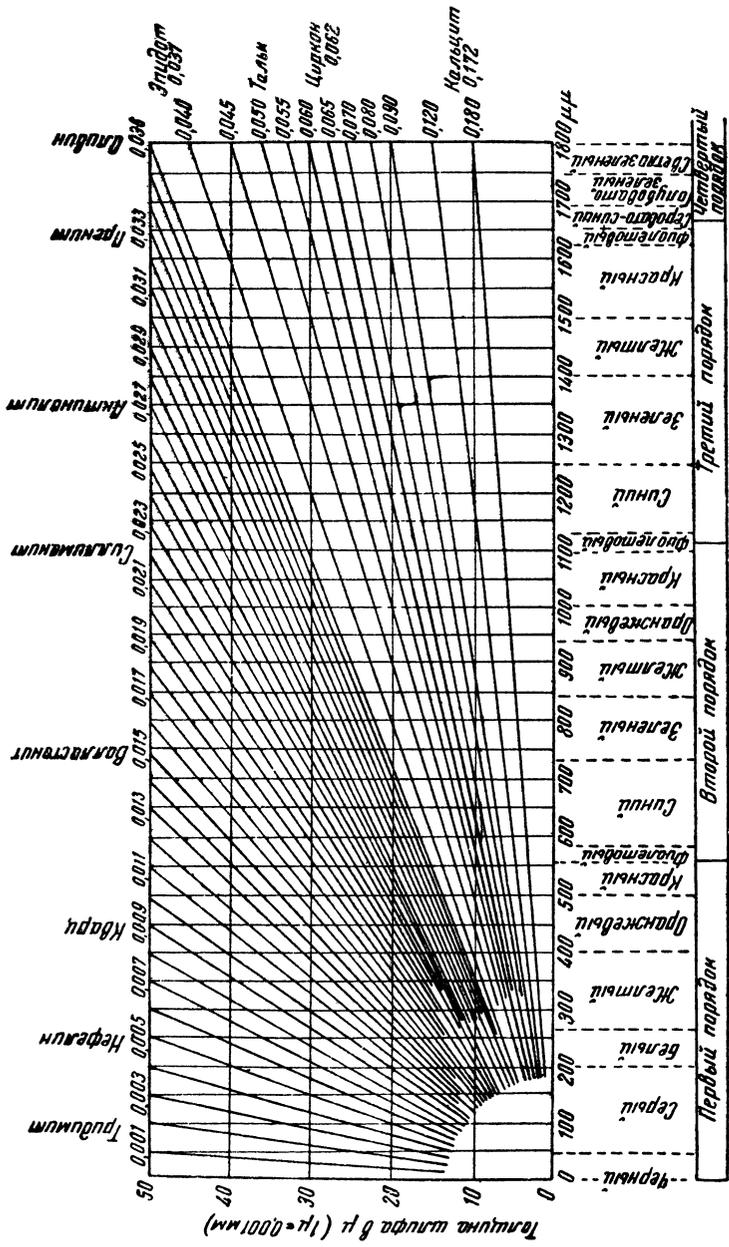


Рис. 48. Таблица Мишель-Леви. Зависимость между разностью хода, толщиной штифа и двупреломлением

светлосерой окраской, так называемым белым цветом высшего порядка.

Происходит это от того, что большие разности хода соответствуют целому числу волн не одного, а двух, трех и даже ряда лучей спектра — ряда, тем большего, чем больше данная разность хода. Все эти лучи гасятся, а промежуточные между ними, для которых данная разность хода равна нечетному числу полуволн, обладают максимальной интенсивностью. Возникающая вследствие смещения их окраска содержит разные цвета спектра, и она тем больше приближается к белой, чем более дробно разбит интерференцией первоначальный белый свет на гаснущие и максимально интенсивные лучи. В качестве примера разности хода, дающей типичный белый цвет высшего порядка, возьмем $\Delta = 11475 \text{ м}\mu$. Эта величина равняется: $15 \times 765 \text{ м}\mu$; $16 \times 717 \text{ м}\mu$; $17 \times 676 \text{ м}\mu$; $18 \times 637 \text{ м}\mu$; $19 \times 604 \text{ м}\mu$; $20 \times 574 \text{ м}\mu$; $21 \times 547 \text{ м}\mu$; $22 \times 522 \text{ м}\mu$; $23 \times 499 \text{ м}\mu$; $24 \times 478 \text{ м}\mu$; $25 \times 459 \text{ м}\mu$; $26 \times 441 \text{ м}\mu$; $27 \times 425 \text{ м}\mu$; $28 \times 410 \text{ м}\mu$; $29 \times 395 \text{ м}\mu$. В этом списке в смеси 15 погашенных лучей есть все характерные цвета спектра. Точно так же все они (только других оттенков) должны содержаться и в смеси тех промежуточных лучей, для которых данная разность хода равна нечетному числу полуволн. Очевидно, эта смесь должна производить на наш глаз такое же впечатление белого света, какое производила бы при параллельных николях указанная погасшая смесь.

Кварцевый клин. Смена интерференционных цветов первых трех порядков наблюдается в микроскопе при употреблении кварцевого клина, который представляет собой длинно-вытянутую пластинку из кварца, вырезанную параллельно его оптической оси и постепенно утолщающуюся от одного конца к другому (рис. 49). Оптическая ось располагается обычно по короткой стороне пластинки. Кварцевый клин помещается на столике микроскопа или вставляется в трубу, в специальную прорезь под анализатором. Длинная его

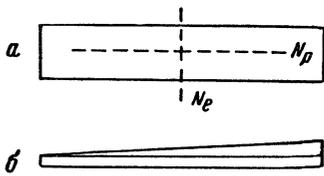


Рис. 49. Кварцевый клин
а—вид сверху; б—вид сбоку (толщина преувеличена)

сторона находится при этом ровно под углом 45° к главным сечениям николей. Передвигая клин по направлению его длинной стороны, от тонкого конца до толстого, мы и получаем указанную смену интерференционных цветов.

Разрезы анизотропных веществ, перпендикулярные к оптической оси. Освещение и интерференционная окраска при скрещенных николях служат, как сказано выше, для отличия двоякопреломляющих тел от однопреломляющих, к которым принадлежат, кроме аморфных веществ, кристаллы

кубической системы. Следует, однако, иметь в виду, что и в двоякопреломляющих кристаллах могут изредка встречаться изотропные однопреломляющие разрезы. Таковы в особенности разрезы, перпендикулярные к оптической оси одноосных кристаллов. Чтобы отличить такие случаи от случая кубических кристаллов, следует приподнять за один край сомнительный в указанном отношении препарат. Повертывая таким образом оптическую ось одноосного кристалла и выводя ее из положения, параллельного оптической оси микроскопа, мы должны создать условия для возникновения в таком кристалле двойного лучепреломления и просветления его. Ничего подобного не будет, конечно, если испытуемый кристаллик принадлежит к кубической системе.

Что касается разрезов, перпендикулярных к той или иной оптической оси двuosных кристаллов, то они ведут себя подобно одноосным только в том случае, если двупреломление их относительно слабо или если пластинки их достаточно тонки. Если же эти условия не выполнены, если двойное лучепреломление двuosного кристалла значительно или пластинка, приготовленная из него перпендикулярно к какой-нибудь оптической оси, обладает большой толщиной, тогда начинает сказываться влияние внутренней конической рефракции: возникает двойное лучепреломление, кристаллик кажется освещенным и совершенно не гаснет при вращении столика микроскопа.

Прямое и косое погасание. Установив при скрещенных николях двупреломляющий характер не кубического кристалла,



Рис. 50. Сечение пироксена в плоскости осей b и c . (Видна хорошая призматическая спайность)

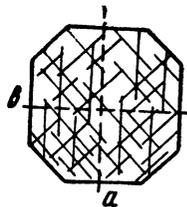


Рис. 51. Сечение пироксена, перпендикулярное к оси c . Видна пересекающаяся под углом 87° спайность. Кристаллографические оси параллельны наиболее развитым граням

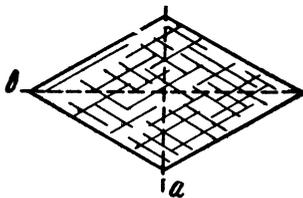


Рис. 52. Сечение роговой обманки, перпендикулярное к оси c . Кристаллографические оси являются биссектрисами угла между гранями призмы и призматической спайностью

можно сделать некоторые более детальные заключения о его симметрии. Для этой цели служат явления так называемого прямого или косого погасания кристаллических пластинок.

Прямым, или параллельным, или симметричным погасание называется тогда, когда оно происходит при установке следов кристаллических осей в данном сечении кристалла параллельно главным сечениям николей. О следах кристаллических осей в данном сечении судят по форме его, по расположению в нем трещинок спайности и т. п., как это представлено на рис. 50—53. Так как в момент погасания кристалла главным сечениям николей параллельны также и оси индикатрисы сечения, то, очевидно, прямое погасание (рис. 53), означает совпадение кристаллографических осей и осей индикатрисы в данном разрезе кристалла.

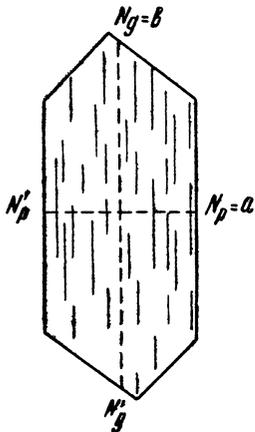


Рис. 53. Сечение оливина, параллельное плоскости оптических осей. Совпадение осей индикатрисы и кристаллографических осей. Прямое погасание кристалла по отношению к спайности

и совершенной спайности по (010), диагонально к (110). На рис. 52 в поперечном разрезе амфибола погасание диагонально к (110) — к контурам и трещинкам спайности разрезов.

Косое погасание (рис. 42), наступающее тогда, когда следы кристаллических осей в данном сечении повернуты на тот или иной угол относительно главных сечений николей, означает, в противоположность прямому, несовпадение означенных осей с осями индикатрисы, и оно характерно, во-первых, для любых сечений триклинических кристаллов и, во-вторых, для всех тех сечений моноклинических, которые не параллельны оси b .

На основании сказанного выше можно вывести следующее правило для суждения о симметрии кристаллов по их погасанию. Если, исследуя ряд разрезов данной кристаллической формы, мы находим в них сплошь прямое погасание, то эта форма принадлежит к одноосной или ромбической симметрии. Если, наоборот, наблюдается всегда только косое погасание, то данная форма триклиническая. Если, наконец, наряду с господствующим косым погасанием встречаются также и не-

которые разрезы с прямым погасанием, то мы имеем дело с моноклинической симметрией.

Величина угла погасания для одной и той же кристаллической формы зависит от направления разреза. В моноклинических кристаллах она достигает максимального значения в разрезах, перпендикулярных к оси b . На рис. 42, изображающем такой разрез моноклинического пироксена, угол погасания $cNg = 40^\circ$.

В одном и том же разрезе углы погасания различны для лучей различной длины волны. Обычно эта разница очень мала, но иногда она достигает настолько значительных размеров, что в белом свете кристалл не гаснет, а только меняет свою окраску от красновато-коричневой до синевато-серой и т. п. Это — результат так называемой дисперсии биссектрис или главных направлений световых колебаний, о чем было сказано выше (стр. 41).

Углы погасания меняются в зависимости от вещества, и если данное вещество кристаллизуется больше, чем в одной моноклинической или триклинической форме, то каждая из них опять-таки характеризуется особыми углами погасания.

Углы погасания кристаллов — изоморфных смесей. Для кристаллических веществ сложного химического состава, так называемых изоморфных смешанных кристаллов, углы погасания закономерно изменяются с изменением их состава. На рис. 54 представлена

кривая углов погасания плагиоклазов в разрезах, перпендикулярных одновременно к обеим главным спайностям — по P (001) и M (010), в зависимости от состава их из чистых компонентов: альбита (Ab) — $NaAlSi_3O_8$ и анортита (An) — $CaAl_2Si_2O_8$. Пересекаясь между собой, следы названных спайностей образуют в таких разрезах параллелограммы с острым углом $87-88^\circ$ и тупым углом $92-93^\circ$. Углы погасания отсчитываются от следа спайности по M (010); ближайшей к нему осью индикатрисы является всегда Np' . Углы считаются положительными, если погасание наблюдается в остром углу между (001) и (010), и отрицательными, если в

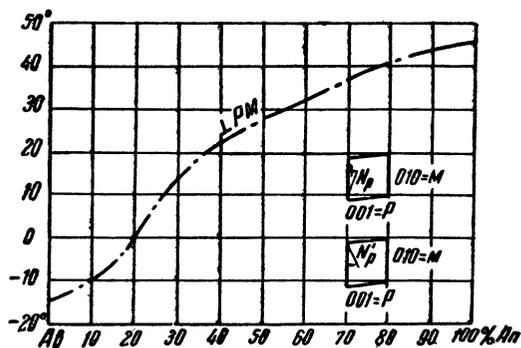


Рис. 54. Зависимость угла погасания плагиоклазов в разрезе, перпендикулярном к PM [перпендикулярном одновременно к (001) и к (010)]

остром углу между (001) и (010), и отрицательными, если в

тупом. Углы погасания: чистого альбита — 15° , чистого анортита $+44^\circ$, смесей — промежуточные между этими величинами.

Двойники под микроскопом. Описанные нами в предыдущем явлении: просветление при скрещенных николях микро-

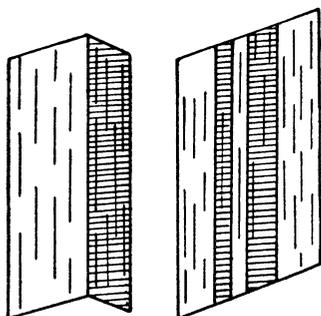


Рис. 55. Вид двойников под микроскопом

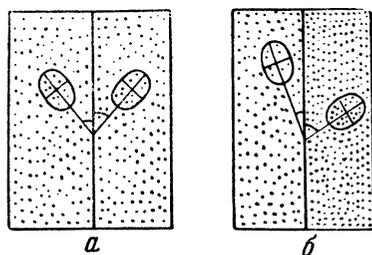


Рис. 56. Двойники:

а — в положении симметрического погасания;
б — в положении асимметрического погасания

скопа, тот или иной характер интерференционной окраски, прямое или косое погасание — все это бросается в глаза непосредственно при наблюдении двойкопреломляющих кристалликов под микроскопом. К тому же

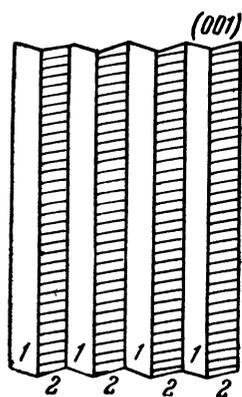


Рис. 57. Полисинтетический двойник под микроскопом

ряду явлений, непосредственно воспринимаемых при скрещенных николях, относится двойниковое строение кристаллов. Двойниковые кристаллы характеризуются, как известно, морфологически присутствием во внешнем их ограничении входящих двугранных углов. Однако признак этот более или менее случайный. Кристаллы, подлежащие микроскопическому исследованию, представляются на практике сплошь и рядом не в виде многогранников, а в виде зерен, лишенных сколько-нибудь правильной геометрической формы. Тем не менее при скрещенных николях под микроскопом любые двойниковые сростания обнаруживаются очень легко: индивиды, слагающие их, в подавляющем

большинстве случаев обладают каждой своей собственной оптической ориентировкой, и они погасают поэтому не одновременно, а каждый самостоятельно, под своим собственным углом относительно двойникового шва (рис. 55). В том случае, когда двойниковая плоскость располагается перпендикулярно к плоскости шлифа, оба неделимых погасают под одинаковыми углами к двойниковому шву, и самое пога-

сание называется тогда симметрическим (рис. 56, а). Когда же означенной перпендикулярности нет, получается неодинаковое у обоих индивидов, так называемое асимметрическое погасание относительно двойникового шва (рис. 56, б). Полисинтетические двойниковые образования, где мы имеем две самостоятельные оптические ориентировки, для нечетных и для четных неделимых, принимают при скрещенных николях микроскопа красивый полосчатый вид (рис. 57). Если вращать столик микроскопа, то когда нечетные пластинки темнеют, четные остаются светлыми, а когда темнеют последние, наоборот, нечетные освещены.

Общая окраска, абсорбция и плеохроизм. При описании оптики двупреломляющих кристаллов мы не касались до сих пор естественной окраски их в проходящем свете. Так как, однако, общий характер ее определяется в поляризованном свете столь же непосредственно и легко, как и явления, только что описанные, то из соображений практического характера мы сделаем именно здесь небольшую вставку по этому вопросу.

Окраска тел в проходящем свете происходит от неодинакового поглощения в теле лучей различной длины волны. Например, тело кажется нам красным, когда из всех лучей видимого спектра оно меньше всего задерживает красные лучи. В телах аморфных и в кристаллах кубической системы характер поглощения и окраски не зависит от направления. В кристаллах остальных систем он изменяется с направлением по закону эллипсоида: эллипсоида вращения — для одноосных кристаллов и трехосного эллипсоида — для кристаллов двуосных.

В результате неодинакового общего поглощения, или абсорбции, всех вообще лучей спектра в зависимости от направления получается неодинаковая яркость в общей окраске кристалла по различным направлениям. При описании минералов абсорбция дается обычно в виде формулы: $N_g > N_m > N_r$ или $N_g = N_m > N_r$ и т. д. В результате частной, или избирательной, абсорбции, или, что то же, изменения указанной выше зависимости вместе с длиной волны возникает изменение в самом характере окраски по различным осям (причем, таким образом, для лучей каждой волны получается свой эллипсоид поглощения со своим частным отношением осей). Например, в случае обыкновенной роговой обманки эта окраска изменяется от сине-зеленой по N_g до буро-зеленой по N_m и светложелтой по N_r . Это явление называется плеохроизмом (многоцветностью).

Абсорбция и плеохроизм наблюдаются под микроскопом при одном нижнем николе. Если при этом испытываемая пластинка рассекает эллипсоид поглощения по кругу, т. е. она перпендикулярна к оптической оси, то при вращении столика окраска ее (т. е. интенсивность и характер этой окраски)

не меняется. Если же пластинка плеохроичного кристалла рассекает поверхность поглощения по эллипсу, то, вращая столик с препаратом, мы наблюдаем постепенную смену окраски пластинок. Чистые цвета, соответствующие осям эллипса сечения, получаются тогда, когда та или иная ось приведена в главное сечение поляризатора. В промежуточных положениях луч, идущий из поляризатора, разлагается в кристалле на два луча с колебаниями по осям эллипса; действуя одновременно на глаз, оба эти луча дадут впечатление смешанной окраски.

Рельеф, шагреновая поверхность, псевдоабсорбция. Поверхность шлифа никогда не бывает абсолютно гладкой: на ней всегда имеются следы шлифования — мелкие углубления или выступы. Если светопреломление минерала близко к светопреломлению вмещающего канадского бальзама, то свет свободно проходит из бальзама в минерал и обратно, и под микроскопом границы между ними не видно. Если же светопреломление минерала отлично от светопреломления бальзама, то на границе минерал — бальзам часть лучей, падающих на неровности минерала, отражается, и пограничный рельеф становится видным — тем более резко, чем больше различие в показателях. Возникает так называемая „шагреновая поверхность“.

Рельеф дает возможность качественно судить о величине показателя преломления изучаемого минерала: чем резче рельеф, тем больше различие в показателях.

Если минерал сильно двупреломляет и один показатель его в данном разрезе приближается к светопреломлению канадского бальзама, а другой резко от него отличается, то возникает явление так называемой псевдоабсорбции. Тогда колебания по одному направлению проходят без отражения и не давая рельефа, а по другому, перпендикулярному к первому, возникает резкий рельеф, сопровождающийся некоторым потемнением минерала. Псевдоабсорбция такого рода наблюдается, в частности, у некоторых карбонатов.

§ 7. ОПТИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР КРИСТАЛЛОВ. ВЕЛИЧИНА ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ

Знак главной зоны кристалла. Вернемся вновь к оптической индикатрисе, к исследованию ее при скрещенных николях микроскопа. При этом возникает очередной вопрос — об оптическом знаке данного разреза кристаллика, т. е. об относительном расположении присутствующих в нем осей индикатрисы. Когда разрез, исследуемый нами, имеет длинно-вытянутую форму, условимся называть его длинный размер главной зоной кристалла и будем считать эту главную зону положительной, если большая ось индикатрисы

(Ng) является ближайшей к оси зоны (при косом погасании) или совпадает с ней (в случае прямого погасания). В случае отрицательной главной зоны должно наблюдаться обратное положение осей: Np параллельно или близко к удлинению.

Определение расположения осей. Принцип компенсации. Если поляризованный свет, после того как он прошел через одну кристаллическую пластинку и там приобрел некоторую разность хода, пропустить через вторую кристаллическую пластинку, ориентированную параллельно первой, то разность хода увеличивается — суммируется, так как тот же луч, который отставал в первой пластинке, будет отставать и во второй.

Если же вторая пластинка наложена так, что с большей осью индикатрисы первой совпадает меньшая второй и наоборот, то произойдет вычитание разностей хода: луч, отставший в первой пластинке, нагоняет в какой-то мере это отставание во второй. В частном случае равенства разностей хода обеих пластинок результирующая разность хода станет равной нулю, наступит темнота. Явление сложения и вычитания разностей хода в двух наложенных одна на другую кристаллических пластинках носит название компенсации, а добавочные кристаллические пластинки с заведомо известной ориентировкой оптической индикатрисы носят название компенсаторов, или компенсационных пластинок (кварцевый клин, гипсовая и слюдяная пластинки).

Для определения оптического знака главной зоны кристалла удобно пользоваться вышеописанным кварцевым клином. Хотя клин этот приготовлен из положительного одноосного кристалла, но так как оптическая ось в нем расположена по короткой стороне, то самый кварцевый клин в указанном выше смысле должен считаться отрицательным — пластинкой с отрицательной главной зоной.

Установив при скрещенных николях кристаллик на темноту, т. е. в положение, при котором оси его индикатрисы параллельны главным сечениям николей, поворачиваем столик микроскопа на 45° так, чтобы оси индикатрисы заняли диагональное положение относительно николей. Затем в диагональную прорезь в тубусе микроскопадвигаем кварцевый клин и по мере продвижения его вперед наблюдаем получающийся общий интерференционный эффект обеих пластинок, кварцевого клина и испытуемого кристалла.

Случай первый: главная зона кристалла отрицательна. Двигая кварцевый клин таким образом, чтобы длинная его сторона была направлена по оси индикатрисы кристалла, ближайшей к оси зоны, получаем однозначное расположение обеих индикатрис, как представлено на рис. 58, а. Луч с колебаниями по Ng' отстает от луча с колебаниями по Np' во время прохождения через испытуемую пластинку на некоторое расстояние Δ_1 . Когда он проходит затем по кварцевому

клину, то здесь он совершает свои колебания по оси N_e , которая больше, чем N_o , и, следовательно, опять отстает от луча с колебаниями по N_o , предположим, на Δ_2 . Два отставания, две одноименные разности хода складываются в суммарную разность $\Delta_1 + \Delta_2$ и с нею интерferируют далее после известной обработки их верхним никодем. Величина Δ_1 ос-

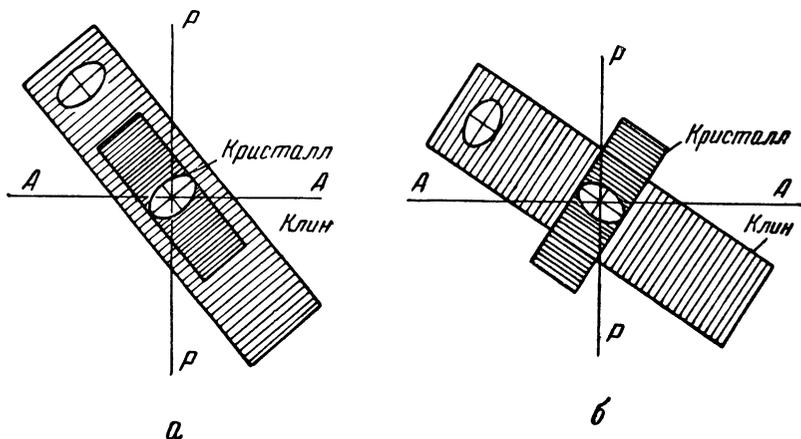


Рис. 58. Положение кристалла с отрицательным удлинением и компенсационной пластинки

а—при повышении; б—при понижении интерференционной окраски

тается постоянной, а Δ_2 все время растет вместе с проталкиванием кварцевого клина, и, таким образом, все время растет $\Delta_1 + \Delta_2$, и повышается интерференционная окраска.

По окончании этих наблюдений поворачиваем столик микроскопа на 90° (рис. 58, б). Таким образом, мы приводим обе индикатрисы во взаимно перпендикулярное положение: N_g становится параллельно N_o , а $N_{p'}$ — параллельно N_e . Луч, отстающий в пластинке, становится обгоняющим в кварцевом клине, и, наоборот, Δ_1 и Δ_2 приобретают противоположные знаки, и, вдвигая кварцевый клин, мы в результате не повышаем разность хода и интерференционную окраску, а, наоборот, понижаем их. Это продолжается, впрочем, только до тех пор, пока величина Δ_2 не станет равной Δ_1 . Тогда $\Delta_1 - \Delta_2 = 0$, обгон и отставание парализуют друг друга, получается полное затемнение пластинки. При дальнейшем вдвигании клина $\Delta_2 - \Delta_1$ становится больше нуля, растет, и соответственно с этим повышается нормально интерференционная окраска.

Случай второй: знак главной зоны кристалла положительный. Получаются явления, обратные только что описанным (рис. 59). При вдвигании кварцевого клина длиной стороной параллельно оси индикатрисы, ближайшей к оси глав-

ной зоны пластинки, обе индикатрисы оказываются в скрещенном положении, суммарная разность хода равна $\Delta_1 - \Delta_2$. Интерференционная окраска вначале понижается. Когда $\Delta_1 - \Delta_2 = 0$, освещение уничтожается вовсе; затем происходит нормальное повышение интерференционной окраски. При повороте столика на 90° (рис. 59, б) восстанавливается параллельное расположение однозначных осей обеих индикатрис: $\Delta_1 + \Delta_2$; все время при продвижении клина повышается интерференционная окраска.

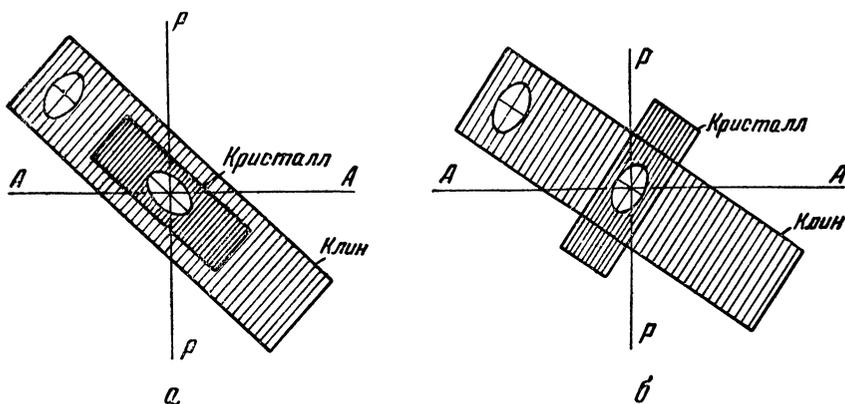


Рис. 59. Положение кристалла с положительным удлинением и компенсационной пластинки
а—при понижении; б—при повышении интерференционной окраски

Когда величина Δ_1 в исследуемой пластинке очень мала (не выше $200 \text{ m}\mu$) и соответственно с этим пластинка при скрещенных николях окрашена в белый или серый цвет первого порядка, вместо кварцевого клина для определения оптического знака главной зоны можно употреблять более простую и дешевую плоско-параллельную гипсовую пластинку с постоянной величиной $\Delta_2 = 530 \text{ m}\mu$ и с интерференционным цветом красным первого порядка. При параллельном расположении однозначных осей индикатрис обеих пластинок—испытываемой и гипсовой ($\Delta_1 + \Delta_2$)—красный цвет последней переходит в синий, а при скрещенном положении однозначных осей ($\Delta_1 - \Delta_2$)—в желтый (см. по шкале интерференционных цветов, рис. 48).

Знак главной зоны и знак кристалла. В каком отношении находится знак главной зоны кристалла к знаку кристалла в целом?

Здесь следует различать одноосные и двуосные кристаллы. В одноосных мы имеем в любом эллиптическом разрезе индикатрисы одну ось No , а другую Ne' , и относительные их размеры определяют и знак главной зоны, и знак кристалла.

Если кристалл призматического габитуса (рис. 60, *a*), то N_e совпадает с осью призмы, и в любом разрезе N_e' совпадает с осью главной зоны: знак главной зоны призматического кристалла, таким образом, является и знаком кристалла. Если же кристалл табличатый (рис. 60, *б*), N_e располагается перпендикулярно к табличке и в поперечных длинно-вытянутых разрезах приходится по их короткой оси. В результате знак главной зоны табличатого кристалла и знак самого кристалла противоположны друг другу.

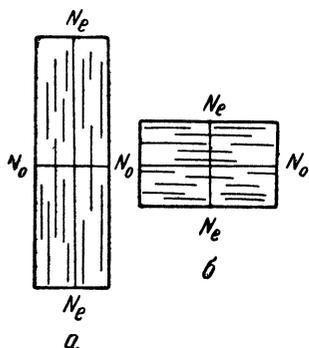


Рис. 60. Удлинение в призматических (*a*) и пластинчатых (*б*) кристаллах

В двусосных кристаллах, где бисектриса характеризуется относительными размерами не двух, а трех главных осей, взаимная зависимость знака главной зоны и знака кристалла намного сложнее. Оптический знак двусосного кристалла целесообразнее и проще определять не в параллельном, а в сходящемся поляризованном свете.

Величина двупреломления. При определении оптического знака кристаллической пластинки мы оцениваем относительные размеры ее индикатрисы только в самом общем виде, не характеризуя их числами. Однако мы можем получить и эти числа, иначе говоря, определить величину двупреломления пластинки, если воспользуемся для этой цели зависимостью, которая существует между двупреломлением и толщиной пластинки, с одной стороны, и между разностью хода двух возникающих в ней лучей, — с другой.

Пусть Ng' и Np' — показатели преломления этих лучей, v , vg' и vp' — соответственно скорости лучей в воздухе и в кристалле; при этом, очевидно, $vg' < vp'$; tg' и tp' — времена, употребляемые лучами на прохождение через пластинку, причем $tg' > tp'$; Δ — разность хода, приобретаемая ими; e — толщина пластинки.

$$\Delta = (tg' - tp') v = \left(\frac{e}{vg'} - \frac{e}{vp'} \right) v = e(Ng' - Np'),$$

или

$$Ng' - Np' = \frac{\Delta}{e}.$$

Итак, для нахождения $Ng' - Np'$ нам нужно знать величины Δ и e .

Определение двупреломления при помощи кварцевого клина. Когда не требуется особенно большая точность, мы можем удовлетвориться той величиной $\Delta_1 = \Delta_2$, которую пока-

зывает при определении оптического знака пластинки обыкновенный кварцевый клин, скрещенный с нею и компенсирующий ее так, что наступает полное затемнение пластинки. Необходимо только означенную величину Δ выразить в миллиметрах (или миллимикронах) в соответствии с интерференционной окраской пластинки.

О толщине шлифа мы часто получаем так называемые косвенные указания. Например, при исследовании очень многих горных пород мы можем судить о ней по интерференционной окраске или по величине Δ , которую дает какой-нибудь присутствующий в шлифе минерал с заранее известным двупреломлением: кварц, полевой шпат, нефелин и т. п.

На рис. 48 ординаты изображают толщину шлифа, абсциссы—величину Δ и соответственную интерференционную окраску, прямые, исходящие из начала координат,—двупреломление. Пусть в нашем шлифе требуется определить двупреломление минерала, окрашенного в интерференционный цвет красный второго порядка (Δ равна около 1050 $\text{m}\mu$). Пусть в том же шлифе есть зерна кварца, дающие максимальную интерференционную окраску желтую первого порядка (Δ равна около 350 $\text{m}\mu$). Откладываем по абсциссе 350 $\text{m}\mu$ и отсюда следуем по ординате до пересечения с прямой Ne—No кварца, т. е. 0,009. Ордината точки пересечения—0,039 *мм* соответствует толщине шлифа. Откладываем по абсциссе 1050 $\text{m}\mu$, а отсюда следуем по ординате до высоты 0,039. Прямая двупреломления, проходящая здесь, (0,027) и будет определять двупреломление нашего минерала.

Для более точного (чем с обыкновенным кварцевым клином) определения $\Delta_1 = \Delta_2$ употребляется кварцевый клин с делениями. Чтобы прочесть эти деления, необходимо, по удалении анализатора, вдвинуть в трубу микроскопа линзу Бертрана и несколько приподнять окуляр.

Цена деления кварцевого клина определяется раз навсегда следующим образом. Если кварцевый клин осветить монохроматическим светом, то в тех местах, где вызываемая им разность хода равна целому числу волн, появится темная полоса, так как оба интерферирующих луча друг друга уничтожат (если применен натриевый свет, то центр первой темной полосы будет соответствовать разности хода $\Delta = 589 \text{ m}\mu$, второй $\Delta = 1178 \text{ m}\mu$ и т. д.). Зная длину волны примененного света, можно, отсчитав число делений клина между двумя соседними темными полосами и разделив первую величину на вторую, получить цену деления в миллимикронах разности хода¹.

¹ При отсутствии источника монохроматического света можно пользоваться установкой клина на чувствительный фиолетовый цвет первого порядка ($\Delta = 575 \text{ m}\mu$) и на чувствительный фиолетовый второго порядка ($\Delta = 1130 \text{ m}\mu$). Установочную разность 555 $\text{m}\mu$ делим на число пройденных между обеими установками делений клина.

Компенсатор Берекы. Для более точного, чем при помощи кварцевого клина, определения разностей хода служат специальные компенсаторы. Наибольшее распространение имеет в настоящее время компенсатор Берекы, представляющий собой видоизменение вращающегося компенсатора, предложенного впервые Е. С. Федоровым и В. В. Никитиным (рис. 61). Компенсатор состоит из тонкой пластинки исландского шпата *a*, вырезанной перпендикулярно к оптической оси и поворачиваемой при помощи системы шестерен на некоторый, точно отсчитываемый при помощи нониуса *б*, угол. На ком-

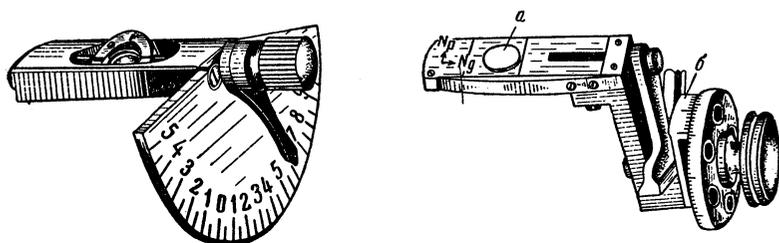


Рис. 61. Вращающийся компенсатор
Слева — Никитина, справа — Берекы

пенсаторе имеются деления от 0 до 60° с нулевой точкой при 30° . При работе компенсатор вдвигается в прорезь внизу трубы микроскопа (необходимо следить, чтобы при вдвигании компенсатора нониус стоял на нулевом положении, т. е. на 30°).

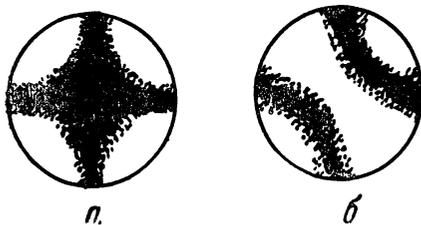


Рис. 62. Вид поля зрения в компенсаторе Берекы:

а — в нулевом положении; *б* — при введении в него слабодвупреломляющей кристаллической пластинки

Если осветить компенсатор белым светом в нулевом положении (деление 30°), то свет будет проходить по оптической оси, и в поле зрения будет виден темный крест, изображенный на рис. 62. При повороте компенсатора на некоторый угол луч будет проходить уже косо по отношению к оптической оси, и возникнет двупреломление. Выходящая в поле зрения интерференционная окраска будет тем выше, чем больше угол поворота компенсатора. Зная этот поворот, толщину пластинки и показатели преломления ее вещества, можно в каждом данном случае вычислить полученное двупреломление. Конечная формула для такого вычисления достаточно сложна, так как, кроме сказанного, она должна учиты-

вать еще и преломление лучей на границе кристалл—воздух. Пользоваться ею было бы весьма затруднительно, но ее можно привести в более удобный для практики вид, если учесть, что часть членов этой формулы зависит от угла поворота пластинки компенсатора, а другие — от ее толщины, которая практически не может быть строго стандартной. В результате разность хода изображается в виде произведения $\Delta = f_i \cdot C$.

Величина f_i (функция компенсации) зависит здесь только от угла поворота. Она одинакова для всех компенсаторов этого типа, изготовленных из исландского шпата, и может быть вычислена заранее (табл. 3). C — константа каждого данного компенсатора; она зависит от толщины его пластинки и должна определяться для каждого компенсатора отдельно; обычно она дается фирмой, но может быть определена и при работе.

Константа компенсатора определяется подобно цене деления кварцевого клина. В монохроматическом свете (без кристалла на столике микроскопа) вращают компенсатор до совмещения первой темной полосы с пересечением окулярных нитей. Во избежание ошибки такой отсчет повторяют дважды, вправо (a) и влево (b), и берут полуразность обоих отсчетов: $i = \frac{a-b}{2}$. По таблице функций компенсации берется соответствующая полученному углу цифра и для получения искомой константы на нее делится длина волны: $C = \lambda : f_i$ ¹.

Для определения разности хода при помощи компенсатора исследуемое зерно ставят, по предыдущему, на погасание, поворачивают на 45° и затем вставляют компенсатор. Последний вращают до компенсации вправо и влево (если вместо компенсации получается повышение интерференционной окраски, что говорит о совпадении осей индикатрисы, кристалл следует повернуть на 90° и продолжать работу). Для полученных двух отсчетов (a и b) берут полуразность; эта последняя и является углом i , функция которого (табл. 3), умноженная на определенную ранее константу, дает разность хода.

Точность работы с компенсатором Берека для средних и малых разностей хода значительно выше, чем при применении кварцевого клина.

Все вычисления при работе с компенсатором Берека можно заменить отсчетом по графику. Довольно удобен логарифмический график, изображенный на рис. 63. Константа каждого

¹ Вследствие дисперсии вещества исландского шпата константа компенсатора несколько различна для разных длин волн. Для белого света она получается путем установки компенсатора на чувствительно-фиолетовый свет (граница между первым и вторым порядками), а за длину волны берется 555 мμ (средняя линия дневного света).

Таблица 3

Функции компенсации для компенсатора Берка

Угол в град.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,00	0,03	0,12	0,27	0,49	0,76	1,1	1,5	1,9	2,5
1	3,0	3,7	4,4	5,1	6,0	6,9	7,8	8,8	9,9	11,0
2	12,2	13,4	14,7	16,1	17,5	19,0	20,6	22,2	23,9	25,6
3	27,4	29,3	31,2	33,2	35,2	37,3	39,5	41,7	44,0	46,3
4	48,4	51,2	53,7	56,3	58,9	61,6	64,4	67,2	70,1	73,1
5	76,1	79,1	82,3	85,5	88,7	92,0	95,4	98,8	102,3	105,9
6	109,5	113,2	116,9	120,7	124,6	128,5	132,5	136,5	140,6	144,8
7	149,0	153,3	157,6	162,0	166,5	171,0	175,6	180,2	184,9	189,6
8	194,5	199,3	204,3	209,3	214,4	219,5	224,5	229,9	235,2	240,5
9	245,9	251,4	257,0	262,6	268,2	273,9	279,7	285,5	291,4	297,4
10	303,4	309,5	315,6	321,8	328,1	334,4	340,7	347,2	353,7	360,2
11	366,8	373,5	380,2	387,0	393,8	400,8	407,7	414,7	421,8	428,9
12	436,1	443,4	450,7	458,1	465,5	473,0	480,6	488,2	495,8	503,5
13	511	519	527	535	543	551	559	567	576	584
14	592	601	609	618	626	635	644	653	661	670
15	679	688	697	706	716	725	734	743	753	762
16	772	781	791	801	810	820	830	840	850	860
17	870	880	890	901	911	921	932	942	953	963
18	974	985	996	1006	1017	1028	1039	1050	1061	1072
19	1084	1095	1106	1118	1129	1141	1152	1164	1175	1187
20	1199	1211	1222	1234	1246	1258	1270	1283	1295	1307
21	1319	1332	1344	1357	1369	1382	1394	1407	1420	1432
22	1445	1458	1471	1484	1497	1510	1523	1537	1550	1563
23	1577	1590	1603	1617	1631	1644	1658	1672	1685	1699
24	1713	1727	1741	1755	1769	1783	1797	1812	1826	1840
25	1855	1869	1884	1898	1913	1927	1942	1957	1972	1987
26	2001	2016	2032	2046	2062	2077	2092	2107	2123	2138
27	2153	2169	2184	2200	2215	2231	2247	2262	2278	2294
28	2310	2326	2342	2358	2374	2390	2407	2422	2439	2455
29	2471	2488	2504	2521	2537	2554	2570	2587	2604	2620
30	2637	2654	2671	2688	2705	2722	2739	2756	2773	2791

Двупреломление

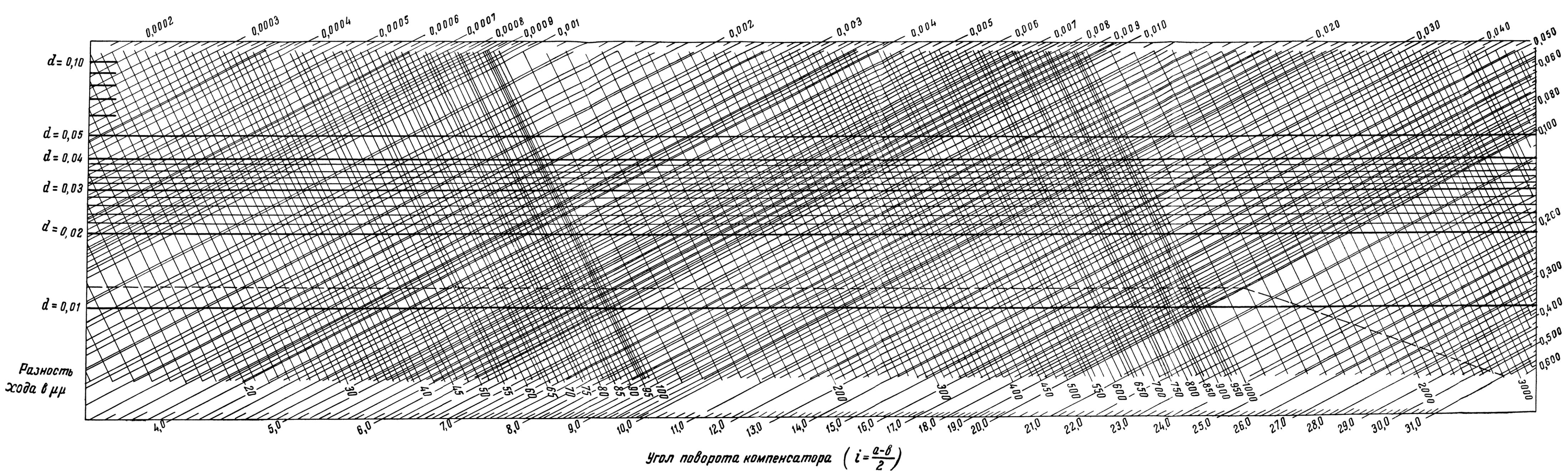


Рис. 63. График для определения разности хода при помощи компенсатора Берке

данного компенсатора изображается „основной линией“ компенсатора, которая на рис. 63 дана пунктиром для константы 4,000. Для компенсатора с другой константой должна быть нанесена новая „основная линия“, которую удобнее всего получить экспериментально. Таким же путем, как и при определении константы, получаются углы поворота, соответствующие какой-либо темной полосе в монохроматическом свете, и наносятся на график. Пересечение прямой угла поворота и прямой, со-

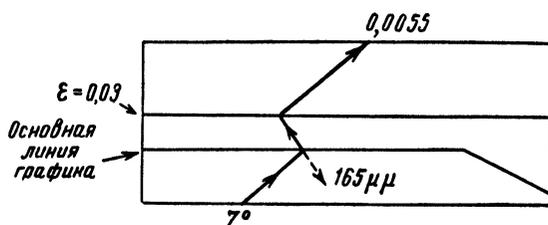


Рис. 63а. Схема определения двупреломления по графику

$$\text{Дано: } i = \frac{37^\circ - 23^\circ}{2} = 7^\circ; \quad d = 0,03.$$

ответствующей разности хода темной полосы, дает точку, лежащую на „основной линии“ для данного компенсатора; вся же „основная линия“ наносится через эту точку параллельно линии для константы 4,000.

Для определения двупреломления или разности хода какой-либо кристаллической пластинки, по предыдущему, определяются угол поворота компенсатора в момент компенсации и толщина пластинки в долях миллиметра.

Определение двупреломления по графику ведется следующим образом (рис. 63а). Угол поворота находят на нижней шкале графика. Далее, следуя параллельно линиям, соответствующим равным углам наклона (направо—вверх), получаем точку пересечения с „основной линией графика“. Точка эта определяет разность хода. По линиям равной разности хода отсюда следуют (влево—вверх) вплоть до пересечения с прямой, соответствующей толщине шлифа. Точка пересечения определит двупреломление минерала. Прочтеть его можно на верхней шкале, следуя линиям равного двупреломления (вправо—вверх, параллельно линиям равных углов наклона, рис. 63а).

Если нужно прочтеть разность хода, создаваемую минеральной пластинкой, точку пересечения угла поворота и „основной линии графика“ проектируют вправо вниз на среднюю шкалу, где и прочитывают разность хода в миллимикронах (пунктир на схеме).

Определение толщины шлифа. Для измерения толщины кристаллической пластинки под микроскопом на практике употребляется весьма часто метод де Шона, или метод пылинок. Он требует сильного увеличения микроскопа и состоит в следующем. При помощи микрометрического винта попеременно приподнимают и опускают тубус микроскопа так, чтобы ясно были видны пылинки то на верхней, то на нижней поверхности шлифа. Разность отсчетов по шкале микрометрического винта и дает толщину препарата, конечно, с поправкой на показатель преломления минерала. В самом деле, как видно из рис. 64,

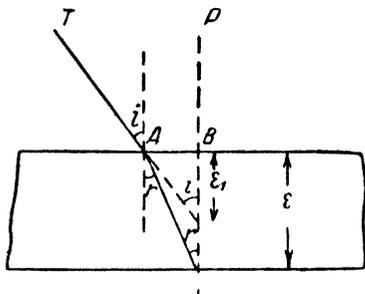


Рис. 64. Зависимость между истинной и измеряемой толщиной шлифа

$$AB = \epsilon \operatorname{tg} r = \epsilon_1 \operatorname{tg} i,$$

где

ϵ_1 — разность отсчетов, а
 ϵ — истинная толщина пластинки.

$$\epsilon = \epsilon_1 \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

Но так как i и r малы, то тангенсы можно заменить синусами:

$$\epsilon = \epsilon_1 \frac{\sin i}{\sin r} = \epsilon_1 N.$$

Если употребляется иммерсионный объектив, где вместо воздуха между шлифом и объективом находится иммерсионная жидкость, то

$$\epsilon = \epsilon_1 \cdot \frac{N}{n},$$

где

n — показатель преломления иммерсионной жидкости.

Двупреломление в различных разрезах. Двупреломление $N_{g'} - N_{r'}$, определенное в произвольном сечении кристалла, имеет, конечно, более или менее случайную величину. Между тем для характеристики индикатрисы необходимы не такого рода случайные результаты, а величины двупреломления в совершенно определенных разрезах индикатрисы, по главным осям этой последней, а именно: $\pm(N_e - N_o)$ одноосных кристаллов и $N_g - N_r$, $N_g - N_m$ и $N_m - N_r$ — двуосных. Когда исследованию подлежит шлиф из горной породы, где присутствуют в большом количестве различные сечения данного минерала, то сечения, заключающие в себе N_e и N_o или N_g и N_r , узнаются как дающие наибольшую величину Δ . Для контроля служат наблюдения в сходящемся свете. В сходящемся же свете распознаются и сечения $N_g - N_m$ и $N_m - N_r$.

Иммерсионный метод в приложении к двупреломляющим веществам. Подобно двупреломлению, во всех означенных разрезах можно исследовать и самые показатели преломления, но, конечно, самое исследование несколько более громоздко. Оно производится по иммерсионному методу или в шлифах, отмытых ксилолом от канадского бальзама, или просто в порошке данного препарата. Предположим, что мы имеем разрез двусосного кристаллика по плоскости оптических осей, т. е. заключающий в себе оси Ng и Nr. При скрещенных николях устанавливаем Ng в главное сечение поляризатора и, вынув анализатор, сравниваем светопреломление луча, колеблющегося по Ng, со светопреломлением данной иммерсионной жидкости. Затем, повернув столик микроскопа на 90°, поступаем точно так же с Nr. Как увидим ниже, во многих случаях выгоднее определять по иммерсионному методу только Nm в разрезах, перпендикулярных к оптической оси, а Ng и Nr — находить косвенно — путем вычисления из известных Nm, Ng — Nr и $2V$, т. е. угла оптических осей кристалла.

§ 8. ИЗУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ СВЕТЕ

Сходящийся свет, его возможности и получение. После того как мы использовали параллельный поляризованный свет, дальнейшие возможности в области исследования оптической индикатрисы открываются перед нами при употреблении сходящегося света так называемого коноскопа. Отличие его от параллельного пучка заключается в том, что здесь вдоль оптической оси микроскопа идет только один центральный луч. Остальные лучи наклонены к оси микроскопа и проходят через препарат под различными углами, которые тем больше, чем дальше от центра поля зрения выходит этот луч. Сходящийся свет получают при помощи чрезвычайно короткофокусного конденсора, называемого линзой Лазо (рис. 45). После прохождения через кристалл, в котором находится фокус освещающего пучка, сходящийся пучок света превращается в расходящийся конус. Для того чтобы получить возможно больший угол конуса, последний захватывается короткофокусным объективом. Лучшие объективы, применяемые для этой цели, захватывают конус с направляющим углом более 100°. Пучок лучей рассматривается не в плоскости препарата, а в задней фокальной плоскости объектива или непосредственно без окуляра или — в значительно увеличенном виде — с окуляром и дополнительной линзой Бертрана, находящейся в верхней части трубы микроскопа (рис. 44).

В сходящемся свете мы получаем интерференционные явления, позволяющие 1) отличать одноосный кристалл от дву-

осного, 2) распознавать те или иные разрезы индикатрисы и 3) определять ее оптический знак.

Одноосные кристаллы (разрез, перпендикулярный к оптической оси) в сходящемся поляризованном свете. В случае одноосного кристалла весьма характерная интерференционная картина возникает в разрезе его, перпендикулярном к оптической оси: здесь наблюдается темный крест, ветви которого лежат на нитях окуляра, проектирующих главные сечения николей. Крест пересекают концентрические кольца темные в монохроматическом свете и цветные, радужные — в белом (рис. 65). При вращении столика микроскопа указанная интерференционная фигура не испытывает никаких изменений и остается неподвижной.

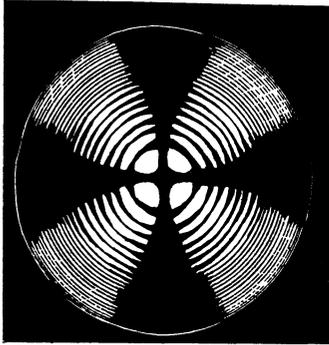


Рис. 65. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Появление ее становится понятным из следующих рассуждений. Из конического пучка лучей, падающих на пластинку, вырезанную перпендикулярно к оптической оси, по этой последней распространяется только центральный луч. Все остальные наклонены к оптической оси, и тем больше, чем дальше от оси микроскопа они пересекают поверхность шлифа. Каждый из них, вообще говоря, разложится в кристалле на два луча: необыкновенный, с колебаниями по Ne' в главном

сечении, пересекающем шлиф по диаметру, проходящему через точку пересечения луча со шлифом, и обыкновенный, с колебаниями по No в плоскости пластинки и перпендикулярно к предыдущему диаметру.

Все это приложимо ко всем лучам, проходящим через любое главное сечение пластинки. Исключение составляют только два главных сечения кристалла, параллельные главным сечениям николей. Какой бы луч, выходящий в любой точке обоих этих сечений, мы ни взяли, он поступает сюда из поляризатора с колебаниями только по PP ; сохраняя их в кристалле, он гасится затем анализатором. Отсюда понятно появление темного креста с ветвями по главным сечениям николей.

Лучи o и e' , получающиеся в других сечениях после обработки их анализатором, интерферируют между собой с результатом, соответствующим разности их хода, определяемой в свою очередь при прочих равных условиях, наклоном лучей к оптической оси. Когда разность хода последовательно будет принимать значения λ , 2λ , 3λ и т. д. для данного цвета, то результат будет тот, что интерферирующие лучи погасят друг

друга, и таким образом получится ряд темных точек на диаметре.

Так как, затем, одинаково наклоненные к оси лучи пересекают шлиф по кругам, то и темные точки, полученные выше для одного сечения, для всей совокупности сечений сольются в концентрические окружности. Расстояния между окружностями обратно пропорциональны: 1) силе двупреломления кристалла ($\pm N_e - N_o$), 2) толщине препарата и 3) расстоянию колец от центра коноскопической фигуры. Чем сильнее двупреломление, чем толще препарат и чем дальше от центра рассматриваемые места пересечения луча с поверхностью шлифа, тем меньшей разницы в наклоне лучей достаточно, чтобы разность хода изменилась на одну волну. В случае кристаллов со слабым двупреломлением и в тонких препаратах уже первое кольцо оказывается за пределами поля зрения, и в последнем наблюдается один только темный крест.

Темные кольца, как указано выше, получают только при монохроматическом освещении препарата. В белом свете они представляются нам спектрально окрашенными. Причина заключается в несовпадении темных колец для лучей различной длины волны, наиболее широких для красного цвета и наиболее сближенных для фиолетового.

Разрезы одноосного кристалла под углом к оптической оси. В разрезах одноосных кристаллов наклонно к оптической оси при вращении столика вместо цельного креста появляются поочередно концы ветвей креста (рис. 66). Передвигаясь при вращении столика, они сохраняют параллельность нитям окуляра.

Разрезы одноосного кристалла, параллельные оптической оси. В разрезах, параллельных оптической оси, наблюдаются мало характерные фигуры. Когда N_e и N_o такого разреза устанавливаются параллельно главным сечениям николей, получается очень широкий размытый темный крест. При вращении столика он быстро раскрывается в темносерую, мало отчетливую гиперболическую кривую.

Определение оптического знака одноосного кристалла. Оптический знак одноосного кристалла в сходящемся свете хорошо определяется в разрезах, либо перпендикулярных к оптической оси, либо слабо наклоненных к ней — настолько,

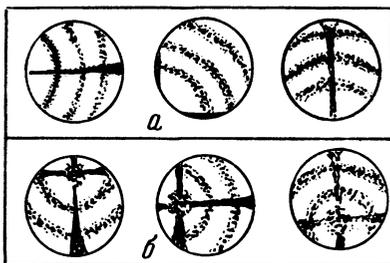


Рис. 66. Коноскопическая картина одноосного кристалла в разрезе, направленном несколько косо к оптической оси

a—оптическая ось не выходит в поле зрения; *b*—оптическая ось выходит на краю поля зрения

что при вращении столика улавливается положение каждого квадранта интерференционного креста. Как следует из рис. 67, при вдвигании компенсационной пластинки (гипсовой или кварцевого клина) в диагональную прорезь трубы микроскопа, в квадрантах, расположенных по длине пластинки, получается вычитание разностей хода (кристалл и компенсационной пластинки), т. е. $\Delta_1 - \Delta_2$, в случае положительного кристалла (где $N_e' > N_o$ и следовательно $v_e' < v_o$) и суммирование их, т. е. $\Delta_1 + \Delta_2$, в случае отрицательного кристалла (где $N_e' < N_o$ и, следовательно, $v_e' > v_o$). В квадрантах, расположенных по ши-

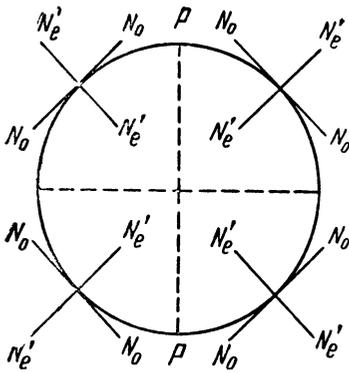


Рис. 67. Направление колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

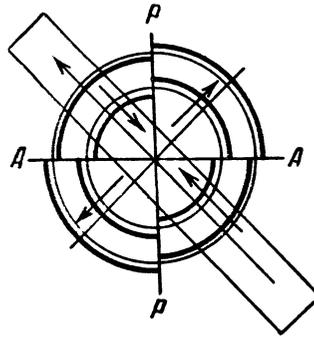


Рис. 68. Определение знака одноосного кристалла при помощи кварцевого клина. Движение колец при вдвигании клина в случае отрицательного кристалла

рине компенсационной пластинки, имеют место обратные явления: $\Delta_1 + \Delta_2$ в случае положительного и $\Delta_1 - \Delta_2$ — в случае отрицательного кристалла. При употреблении гипсовой пластинки суммирование или вычитание разностей хода узнается по изменению красной окраски гипса в пределах первого кольца квадрантов: она переходит в синюю в случае $\Delta_1 + \Delta_2$ и в желтую — в случае $\Delta_1 - \Delta_2$. При вдвигании кварцевого клина цветные кольца в квадрантах с $\Delta_1 + \Delta_2$ суживаются, сближаются между собой; они как бы бегут по направлению к центру креста, к выходу оптической оси кристалла. В квадрантах с $\Delta_1 - \Delta_2$ наблюдается обратная картина: расширение, раздвигание колец, убегание их от центра, от выхода оптической оси (рис. 68).

Двуосные кристаллы в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе. Двуосные кристаллы дают в коноскопе весьма характерную интерференционную фигуру в разрезах,

перпендикулярных к острой биссектрисе. Когда оси индикатрисы такого разреза установлены параллельно главным сечениям николей, наблюдается темный крест (рис. 69). Балка этого креста, параллельная тупой биссектрисе, длиннее и уже, чем перпендикулярная к ней балка, параллельная оптической нормали. На первой из этих двух балок, на равных рассто-



Рис. 69. Коноскопическая фигура двуосного кристалла (с малым углом оптических осей) в разрезе, перпендикулярном к оптической оси. Плоскость оптических осей совпадает с направлением колебаний поляризатора

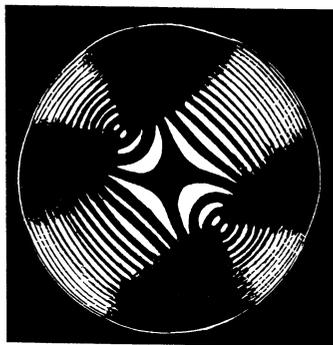


Рис. 70. Коноскопическая фигура двуосного кристалла (с малым углом оптических осей) в разрезе, перпендикулярном к оптической оси. Плоскость оптических осей находится под углом 45° к плоскости колебания поляризатора

яниях от центра креста, намечаются две точки, окруженные кольцами, темными при монохроматическом освещении и спектрально окрашенными в белом свете. Точки эти представляют собой не что иное, как места выходов оптических осей, а кольца, их окружающие, по своему происхождению и по свойствам вполне аналогичны тем кольцам, которые мы имели вокруг выхода оптической оси в интерференционной фигуре одноосных кристаллов. Но в соответствии с меньшей симметрией поверхности волны двуосных кристаллов они не круговые, а имеют форму кривых, называемых лемнискатами. Ближе к оптическим осям лемнискаты расположены вокруг каждой оси, а при удалении от них сливаются в общие для обеих осей кривые.

При вращении столика микроскопа лемнискаты сохраняют свою форму ненарушенной. Вращаясь вместе с выходами оптических осей, они изменяют только свое расположение относительно николей (рис. 70). Наоборот, форма темного креста при вращении столика резко нарушается: он раскрывается в гиперболу, вершины ветвей которой совпадают с выходами

оптических осей и асимптотами которой служат нити окуляра (главные сечения николей).

Гипербола интерференционной фигуры. Гипербола, подобно кресту, представляет собой геометрическое место таких точек, направления колебаний которых совпадают с главными сечениями николей.

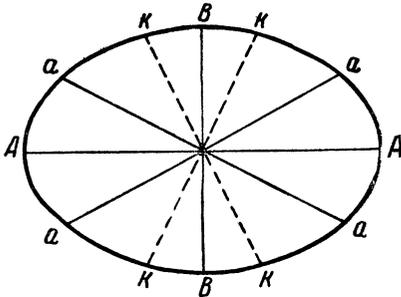


Рис. 71. Положение круговых сечений в индикатрисе

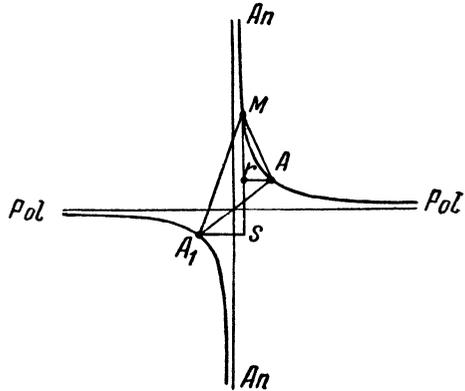


Рис. 72. Гипербола—геометрическое место погасаний в коноскопической фигуре двуосного кристалла

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим следующую теорему Френеля: *направления колебаний в любом разрезе кристалла являются биссектрисами углов между прямыми, проходящими через нормаль к разрезу и через выходы в нем оптических осей.*

Пусть данный разрез пересекает индикатрису по эллипсу $ABAB$ (рис. 71) и пусть KK представляет собой линию пересечения с плоскостью этого эллипса кругового сечения индикатрисы. Тогда вследствие симметрии эллипса, очевидно, здесь будет также и другая линия KK как след другого кругового сечения индикатрисы, причем оси эллипса AA и BB , или, что то же, направления колебаний в данном разрезе будут биссектрисами углов между обеими линиями KK . Но то, что сказано о линии KK , относится и к прямым aa , перпендикулярным к KK и представляющим собой следы тех плоскостей, в которых лежат оптические оси. В этом — доказательство вышеприведенной теоремы.

Применяя эту теорему к интерференционной фигуре двуосного кристалла, мы получаем направление колебаний в любом пункте этой фигуры путем соединения этого пункта с выходами оптических осей и деления углов между полученными таким образом прямыми пополам. Условия, в которых производится эта операция, конечно, не вполне подходят к условиям френелевской теоремы, ибо колебания луча, выходящего в данном пункте, не параллельны плоскости интерференционной фигуры. Так как, однако, свет, употребляемый нами при наблюдении интерференционных фигур, в сущности не очень сильно сходящийся, то и указанное отклонение от параллельности, по крайней мере для более центральных частей фигуры, столь незначительно, что им можно пренебречь. Результат же операции получается такой: когда столик из своего первоначального положения (параллельность осей индикатрисы главным сечениям николей) повернут на некоторый угол, точки с колебаниями по главным сечениям николей оказываются расположенными на кривых гиперболического вида. Что кривые эти являются действительно ветвями гиперболы, легко усмотреть из рис. 72,

где A и A_1 — выходы оптических осей с координатами a и b , а M — данная точка с координатами x и y . Колебания точки M параллельны анализатору (An) и поляризатору (Pol). Из треугольника MrA следует:

$$\frac{Mr}{rA} = \operatorname{tg} A,$$

а из треугольника MSA_1 :

$$\frac{MS}{SA_1} = \operatorname{tg} A_1.$$

Так как углы A и A_1 равны между собой согласно Френелю пишем далее:

$$Mr \cdot SA_1 = rA \cdot MS,$$

причем

$$Mr = y - b; \quad SA_1 = x + a; \quad rA = a - x; \quad MS = y + b.$$

Таким образом, получается, что

$$(y - b)(x + a) = (a - x)(y + b),$$

или

$$xy - bx + ay - ab = ay - xy + ab - xb,$$

или

$$xy = ab.$$

А это есть не что иное, как уравнение гиперболы, отнесенное к ее асимптотам как координатным осям.

Темный крест, раскрывающийся при вращении столика в гиперболу, наблюдается в коноскопе в разрезах, перпендикулярных к острой биссектрисе, всегда. Лемнискаты же, наоборот, подобно цветным кругам одноосных кристаллов, — вследствие ли недостаточной толщины препаратов или вследствие недостаточно высокого двупреломления наблюдаемых кристаллов, — часто отсутствуют.

Выходы оптических осей и при отсутствии лемнискат фиксируются при диагональном расположении плоскости оптических осей относительно николей: они находятся точно в вершинах ветвей гиперболы. Необходимо, однако, заметить, что обе оптические оси далеко не всегда выходят в поле зрения препарата. Для этого необходимо, чтобы угол между ними не превосходил определенной величины, зависящей от данной коноскопической системы.

Угол оптических осей в минерале и в воздухе. Угол оптических осей, который мы видим в коноскопе ($2E$), не соответствует действительному $2V$, но весьма значительно превосходит его, как следует из соотношения $\sin E = \sin V \cdot Nm$, где Nm — средняя ось и радиус кругового сечения индикатрисы (рис. 73).

Предельная величина $2E$, при которой оптические оси еще выходят в поле зрения коноскопа, обычно едва достигает 80° . Таким образом, если предположить, например, что для данного кристалла $Nm = 1,6$ и произвести расчет по вышеприведенной формуле, то оказывается, что уже при $2V =$

$\approx 45-50^\circ$ мы не должны видеть выходы оптических осей этого кристалла в поле зрения микроскопа.

Видимый и истинный углы оптических осей можно сблизить между собой, если производить наблюдение не в воздухе, а в какой-нибудь жидкой иммерсионной среде, например, в кедровом масле с показателем преломления $N=1,5$. Тогда, очевидно, будет иметь место следующее соотношение:

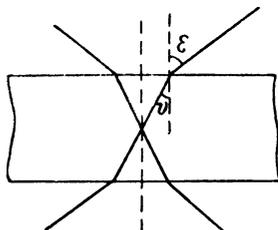


Рис. 73. Угол оптических осей в минерале ($2V$) и в воздухе ($2E$)

$$\frac{\sin V}{N} = \frac{\sin E}{Nm},$$

и если предположить, как выше, что $Nm=1,6$ и предельное значение $2E=70-80^\circ$, то соответствующий этому углу предельный угол $2V$ будет уже не $45-50^\circ$, а $65-70^\circ$.

Измерение угла оптических осей в коноскопе. Угол оптических осей не измеряют под микроскопом без специальных приспособлений. Но можно непосредственно, при помощи лишь окуляра с делениями, измерить линейное расстояние между выходами оптических осей в интерференционной фигуре и отсюда $2E$ можно вычислить по формуле:

$$D = K \cdot \sin E,$$

где

D — число делений микрометра,

K — постоянная, устанавливаемая для данного коноскопа раз навсегда путем измерения в каком-нибудь препарате с известной величиной $2E$.

Так как в современных микроскопах все части достаточно стандартны, то колебания константы в различных приборах одного типа не превышают ошибок при обычной работе. Поэтому, если известна система микроскопа, то по прилагаемому графику (рис. 74) можно определить численно примерную величину угла оптических осей.

Дисперсия оптических осей. Из общей характеристики двuosных кристаллов нам известно, что величина $2E$ зависит от длины волны применяемого света: она непрерывно растет или непрерывно убывает вместе с длиной волны. В белом свете происходит так называемая дисперсия оптических осей. Когда дисперсия значительна, на интерференционной фигуре ветви гиперболы приобретают цветное окаймление, имеющее противоположные оттенки с выпуклой и вогнутой их стороны. Если слабо преломляющие лучи имеют больший угол $2E$, чем сильно преломляющие, — что изображается символом $r > v$, то на выпуклой стороне окаймление

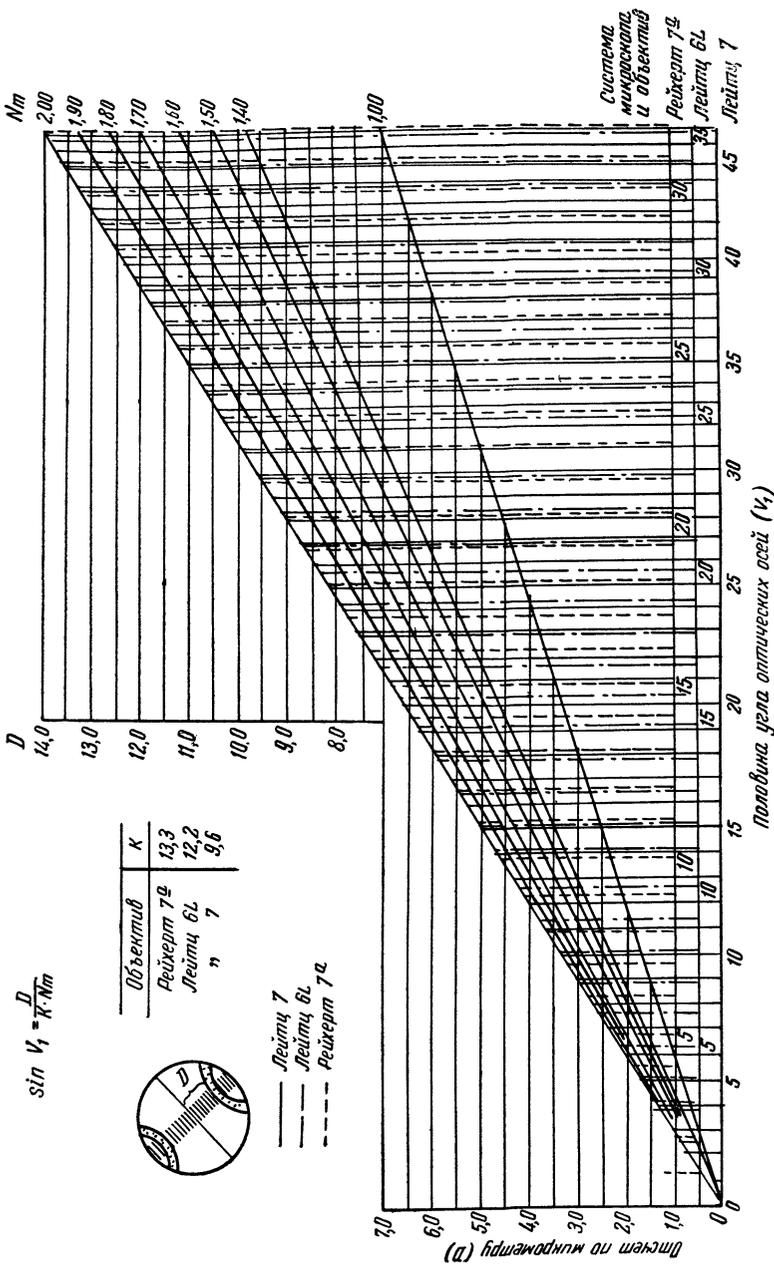


Рис. 74. График для определения угла оптических осей в конускопе

красное, а на вогнутой — синее; если же имеет место обратное отношение углов $2E$, т. е. $r < v$, то соответственно меняются своими местами и цветные каемки. На лемнискатах дисперсия оптических осей также сказывается: в пределах одного и того же кольца по ту и другую стороны от оптической оси получается разная окраска. На рис. 75 выходы оптических осей для красных лучей обозначены через r , а для синих — через v , лемнискаты красных лучей — сплошные, синих лучей — пунктирные; дисперсия $r < v$, т. е. каемки с выпуклой стороны гиперболы синие, и т. д.

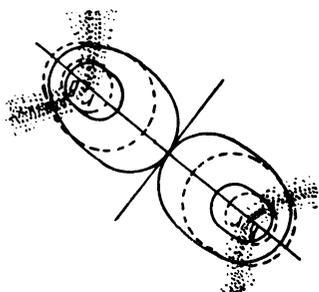


Рис. 75. Дисперсия угла оптических осей

Интерференционная фигура двусосного кристалла, осложненная одной только дисперсией оптических осей, как это имеет место в случае ромбической симметрии, остается еще симметричной как в отношении биссектрис, так и в отношении оптической нормали. В моноклинических и особенно триклинических кристаллах, где к дисперсии оптических осей присоединяется также дисперсия главных осей индикатрисы, интерференционные фигуры в отношении их окраски гораздо менее симметричны. В моноклинических кристаллах, в зависимости от того, какая из трех главных осей совпадает с L_2 и остается вследствие этого недиспергированной, различают три вида дисперсии главных осей и соответственно три типа интерференционных фигур.

диняется также дисперсия главных осей индикатрисы, интерференционные фигуры в отношении их окраски гораздо менее симметричны. В моноклинических кристаллах, в зависимости от того, какая из трех главных осей совпадает с L_2 и остается вследствие этого недиспергированной, различают три вида дисперсии главных осей и соответственно три типа интерференционных фигур.

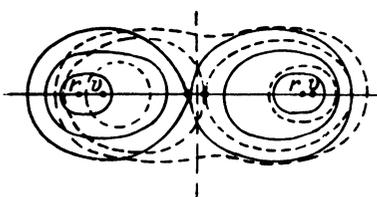


Рис. 76. Наклонная дисперсия

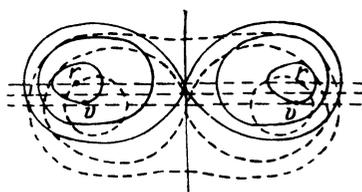


Рис. 77. Горизонтальная дисперсия

1. L_2 — оптическая нормаль. Дисперсия — наклонная (рис. 76). Пример — гипс.

2. L_2 — тупая биссектриса. Дисперсия — горизонтальная (рис. 77). Пример — ортоклаз.

3. L_2 — острая биссектриса. Дисперсия — перекрещенная (рис. 78). Пример — бура.

В триклинических кристаллах постоянно диспергированы все три главные оси: возникает четвертый, асимметрический тип дисперсии главных осей индикатрисы (рис. 79).

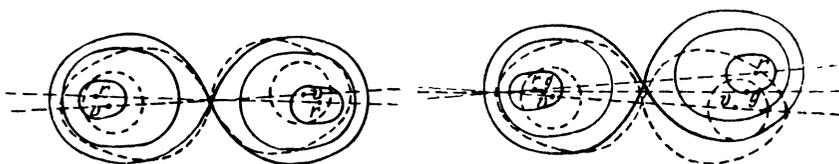


Рис. 78. Перекрещенная дисперсия Рис. 79. Асимметрическая дисперсия

Разрезы, перпендикулярные к тупой биссектрисе и оптической нормали. Все коноскопические картины, описанные выше, относятся к разрезам, перпендикулярным к острой биссектрисе. В разрезах, перпендикулярных к тупой биссектрисе, как и в перпендикулярных к острой, также наблюдается темный крест, расходящийся при вращении столика в гиперболу, но, понятно, всегда без выходов оптических осей. Разрезы, перпендикулярные к оптической нормали, не отличаются от разрезов одноосных кристаллов, параллельных оптической оси: тот же размытый черный крест и та же неясная серая гипербола.

Сечения, перпендикулярные к одной оптической оси. В сечении, перпендикулярном к какой-нибудь одной из двух оптических осей, появляется центральный выход этой оси, окруженный кольцами или без них и пересеченный темной балкой, изгибающейся при вращении столика в гиперболическую кривую, так называемую *изогиру*. Качественно величина угла оптических осей может быть определена по кривизне изогиры и на выходе одной оси. Если стороны изогиры согнуты под углом, близким к 90° , угол оптических осей кристалла мал; при заметной кривизне изогиры он лежит в пределах средних величин и, наконец, если она образует почти прямую линию, угол приближается к 90° .

Сечение, направленное косо к оптической оси. Описанные выше вращение и изгибание темных балок — частей креста, переходящих в гиперболу, повторяется также и в других, более произвольных сечениях двuosных кристаллов. Они служат прекрасным средством для отличия этих кристаллов от одноосных, где аналогичные балки, как мы видели, передвигаются при вращении столика, все время оставаясь параллельными самим себе и нитям окуляра.

Определение знака двuosного кристалла. Для определения оптического знака двuosного кристалла в коноскопе применимы все разрезы, дающие выход хотя бы одной оптической оси — причем желательно, но отнюдь не необходимо, чтобы оптиче,

ская ось выходила, по возможности, в середине поля зрения коноскопа. В параллельных лучах такие разрезы узнаются по относительно слабому двупреломлению их. Получив такой разрез, устанавливаем его в сходящемся свете таким образом, чтобы след плоскости оптических осей был направлен диагонально между главными сечениями николей и параллельно длинной стороне вдвигаемой в тубус компенсационной пластинки. Выход оптической оси расположится тогда точно на этой диагонали, а гиперболическая балка, проходящая через него, займет поперечное диагонали положение (рис. 80). Выпуклой стороной гиперболическая балка обращена в сторону острой, а вогнутой — в сторону тупой биссектрисы. Пусть кристалл, исследуемый нами, отрицательный. Тогда по следу

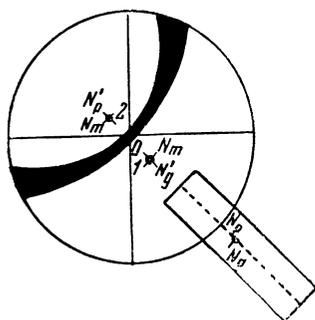


Рис. 80. Определение знака двuosного кристалла при помощи компенсационной пластинки

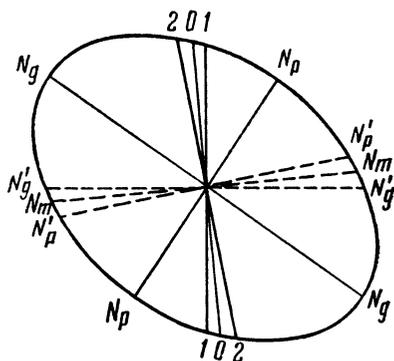


Рис. 81. Схема определения знака двuosного кристалла

плоскости оптических осей с выпуклой стороны балки обнаружатся явления взаимодействия компенсационной пластинки и кристалла, соответствующие случаю $\Delta_1 - \Delta_2$ (желтые пятна при употреблении гипса и уход колец лемнискаты от оптической оси в сторону острой биссектрисы при употреблении кварцевого клина), а с вогнутой стороны — те же явления, соответствующие случаю $\Delta_1 + \Delta_2$ (синие пятна при употреблении гипса, сгущение колец по направлению от тупой биссектрисы к оптической оси при применении кварцевого клина).

Чтобы понять эту картину, возьмем на рис. 80 две точки: одну на выпуклой (1), а другую — на вогнутой стороне балки (2). Пользуемся также вспомогательным разрезом отрицательной индикатрисы по плоскости оптических осей, изображенным на рис. 81: N_g и N_p — биссектрисы, O — оптическая ось (вторая оптическая ось не нанесена, чтобы не затемнять чертеж), N_m — перпендикулярный к ней след кругового сечения индикатрисы, 1 и 2 — лучи (или, точнее, волновые нормали), относящиеся к точкам 1 и 2 рис. 80, N_g' и N_p' — следы перпенди-

кулярных к ним эллиптических сечений. Из сопоставления рис. 80 и 81 непосредственно следует, что в точке 1 мы имеем скрещенное, а в точке 2 — однозначное расположение индикатрис компенсационной пластинки и кристалла. Но первому расположению соответствует $\Delta_1 - \Delta_2$, а второму $\Delta_1 + \Delta_2$.

В случае положительного кристалла результат взаимодействия кристалла и компенсационной пластинки принимает обратный вид: $\Delta_1 + \Delta_2$ на выпуклой и $\Delta_1 - \Delta_2$ — на вогнутой стороне гиперболической балки.

Во избежание путаницы при определении оптического знака двuosных кристаллов в коноскопе необходимо обратить внимание на то, что явления, происходящие при вдвигании компенсационной пластинки на вогнутой стороне гиперболической балки, со стороны тупой биссектрисы, вполне аналогичны явлениям в квадрантах по длине компенсационной пластинки в случае одноосных кристаллов: $\Delta_1 + \Delta_2$ в случае отрицательного и $\Delta_1 - \Delta_2$ в случае положительного их знака.

§ 9. ОПТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ. ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Двупреломление при напряжениях. Оптическая анизотропность и двойное лучепреломление, являющиеся источником всех тех интерференционных явлений, которые описаны нами для одноосных и двuosных кристаллов, образуют нормальное, естественное их свойство, связанное с их внутренней структурой. Свойством этим обычно не обладают сами по себе, в силу своего внутреннего строения, ни аморфные тела, ни кристаллы кубической системы. Тем не менее оно появляется иногда и в этих нормально изотропных веществах и может быть вызвано в них искусственно, путем воздействия на них внешних сил, механических, тепловых или электрических, изменяющих соответственным векториальным образом их внутреннюю структуру. Легче и проще всего удастся это сделать механическим путем. Вырежем, например, из обыкновенного оконного или негативного стекла, отмытого от желатины, полоску шириной в 1—2 см и, держа концы ее руками, поставим ее длинным ребром на столик микроскопа при скрещенных николях и диагонально к главным сечениям этих последних. Свободными большими пальцами обеих рук слегка надавим на середину стекла. Тогда, несмотря на ничтожность произведенной нами таким образом механической деформации, в стекле немедленно обнаружится двойное лучепреломление: стекло посветлеет, а если нажим будет сильнее, оно также получит яркую интерференционную окраску. При исследовании полученного двупреломления с компенсационной пластинкой оказывается, что оно имеет отрицательный характер

в тех частях стекла, которые подвергались сжатию, и положительный в тех его частях, которые растянулись при деформации. Средняя зона, не испытывавшая ни сжатия, ни растяжения, остается оптически изотропной, однопреломляющей. На рис. 82 деформация, произведенная нами, представлена, понятно, в чрезвычайно преувеличенном виде.

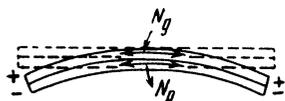


Рис. 82. Двупреломление в результате изгиба стеклянной пластинки. В верхней части пластинки, где имеет место растяжение, по оси пластинки располагается N_g , а в нижней, где происходит сжатие, в этом же направлении располагается N_p ; в центре — нейтральная изотропная полоса

Вместо изгибания стеклянную пластинку можно также непосредственно растягивать и сдавливать, держа концы ее руками, но тогда для воспроизведения даже очень слабого двойного преломления требуются усилия, довольно значительные.

Двупреломление при нагревании и закалке. Аналогично указанным выше механическим деформациям действует на оптику стекла неравномерное его нагревание. Если стекло, сильно нагретое и ставшее вследствие этого двоякопреломляющим, быстро затем охладить, как

говорят, „закалить“, двоякопреломляющая способность удерживается в нем на неопределенно долгое время и после охлаждения.

Влияние механических деформаций на оптику кристаллов. Действие механических и подобных им деформаций на кристаллы по существу не отличается от действия их на стекло. В однопреломляющих кубических кристаллах возникает двойное преломление. В двоякопреломляющих претерпевает те или иные изменения нормальная их индикатриса: одноосная превращается в двуосную, в двуосной изменяется угол оптических осей и т. д. Не следует думать, что все это может быть вызвано в кристаллах только искусственно, по нашему желанию. Наоборот, в очень многих кристаллах, как искусственных, так и природных, такую нарушенную оптику мы находим в готовом виде: сплошь и рядом она возникает в самом процессе кристаллизации вещества. Причиной этого служат механические натяжения в растущих кристаллах под влиянием примесей, включений, соседних кристалликов и т. д. Так, кристаллы квасцов, если они состоят из чистой соли, оказываются однопреломляющими, а если в них содержится изоморфная примесь, они обнаруживают явления двупреломления. В кристаллах кварца, выросших свободно в полостях жеод, мы наблюдаем нормальную одноосную кристаллизацию этого минерала, и в тех же жеодах, у их основания, где происходит стесненный рост вещества из многих центров кристаллизации одновременно, вместо нормального кварца мы находим халцедон—двуосный кварц с углом $2V$ до 40° . В пороодообразующих

минералах к натяжениям при кристаллизации присоединяются часто позднейшие механические деформации от тектонических причин. В результате оптические аномалии в этих минералах представляют собой явление довольно обычное. Тот же кварц в гранитах и подобных породах обнаруживает часто облачное погасание: интерференционный крест его в коноскопе в той или иной мере расходуется при вращении столика в гиперболу и т. д.

Двупреломляющие жидкости. Связывая двойное лучепреломление, обнаруживаемое в том или ином теле, с анизотропной внутренней его структурой, мы тем самым как бы предполагаем, что все двоякопреломляющие тела должны быть обязательно твердыми. В действительности, однако, это не так: нам известны, хотя и в самом ограниченном количестве, также и двоякопреломляющие жидкости. Некоторые вещества, из класса сложных органических соединений, обладают двойной точкой плавления: при некоторой определенной температуре они плавятся в мутную, оптически анизотропную жидкость, а эта последняя при более высокой и тоже определенной температуре вновь „плавится“, т. е. переходит на этот раз уже в нормальную прозрачную и вполне изотропную жидкость. Примером таких веществ могут служить, с одной стороны, бензойнокислый холестерил, мутная фаза которого обладает еще значительной вязкостью, а с другой—азоксифенетол: анизотропная фаза последнего жидка и текуча, как вода. В табл. 4 приведены точки плавления и относительная вязкость обоих веществ.

Таблица 4

Точки плавления и относительная вязкость бензойнокислого холестерила и азоксифенетола

Название веществ	1-я точка плавления град.	2-я точка плавления град.	Вязкость в сантипуазах	
			анизотропной жидкости	изотропной жидкости
Бензойнокислый холестерил	145	179	890—620	420—218
Р-азоксифенетол	137	168	79—66	95—75
Вода	0	—	—	100

В отношении оптики анизотропные жидкости часто напоминают сферолиты, т. е. те шарики радиально-лучистой структуры, в виде которых кристаллизуется стекло в случае отжига его при температурах, не достигающих точки его размягчения. Каждый луч сферолита является тончайшим зачаточным кристалликом со своей собственной индикатрисой. В параллельном

свете при скрещенных николях микроскопа сферолиты дают постоянный темный крест, не изменяющий своего положения при вращении столика (рис. 83). Подобный темный крест мы находим в аналогичных условиях и в капельках анизотропной жидкости. Имеет ли здесь место также действительное структурное подобие со сферолитами, остается невыясненным. Рентгеновские исследования не обнаружили, во всяком случае до сих пор, в анизотропных жидкостях сколько-нибудь ощутительных следов кристаллической структуры. Удивительно высокого значения достигает двупреломление в случае анизотропных жидкостей; например, для пара-азоксибензола оно равняется 0,37, т. е. вдвое выше, чем для исландского шпата.

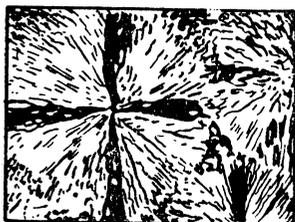


Рис. 83. Сферолиты искусственного холестерина

Весьма подходящим веществом для наблюдения анизотропии в жидкой среде под микроскопом является искусственный холестерин. Расплавляем небольшое количество этого вещества на предметном стекле и наблюдаем полученный препарат в процессе его охлаждения при скрещенных николях микроскопа. Сначала имеет место полная темнота. Внезапно на одном из краев появляется ярко поляризующий тонкоагрегатный сегмент. Он быстро растет, и через несколько мгновений сплошная двоякопреломляющая масса заполняет все поле зрения микроскопа. Она состоит из явственных сферолитов, несколько эксцентричных, с центральной точкой, выдвинутой немного вперед, так что получается впечатление как бы полужающих сахарных головок. Вершины головок устремлены по движению потока; они несутся сомкнутым строем, пожирая на своем пути изотропное вещество. Затем в двоякопреломляющей массе постепенно наступают изменения. Сферолиты рассыпаются на отдельные пластинки и волокна, вся масса принимает более хаотический вид. Отдельные ее участки переливаются, текут, изменяют свою топографию и внешнюю форму. Пока все это жидкие кристаллы. Но сейчас же начинается кристаллизация и твердой фазы. Среди хаоса возникают отдельные центры этой кристаллизации, и они постепенно разрастаются в крупные, то лохматые, то более гладкие, твердые сферолиты. После своего образования эти сферолиты уже совершенно не обладают подвижностью. Чем дальше, тем больше появляется новых центров и новых сферолитов. Самые сферолиты все больше мельчают и пожирают все быстрее анизотропное жидкое вещество.

Анизотропные жидкости обычно называют кристаллическими жидкостями или жидкими кристаллами.

Вращение плоскости поляризации. На основании поведения тех или иных тел по отношению к поляризованному свету мы до сих пор делили их на две большие группы—однопреломляющих и двоякопреломляющих тел. Более детальное исследование двупреломляющих тел показывает, что из них мы должны еще выделить небольшую специальную подгруппу тел, как твердых, так и жидких, которые ведут себя крайне своеобразно при скрещенных николях микроскопа. В то время как обыкновенные двупреломляющие тела, просветляясь при скрещенных николях, тем не менее гаснут четыре раза при полном обороте столика микроскопа, тела означенной группы все время действуют на поляризованный свет. Они не только не гаснут, но и совершенно не изменяют ни интенсивности своего освещения, ни своей интерференционной окраски, насколько бы градусов мы ни поворачивали столик микроскопа. Тем не менее мы можем погасить и эти тела в поляризованном свете, но только в том случае, если, с одной стороны, применим для их освещения монохроматический свет, а с другой,— будем вращать не столик микроскопа, а анализатор.

В веществе, таким образом, происходит как бы вращение на некоторый угол—на угол погасания плоскости колебаний и, следовательно, плоскости поляризации поступающих в него из поляризатора лучей. Детальное исследование этого явления показывает, что одни вещества вращают плоскость поляризации вправо, а другие—влево. Что касается угла вращения, то он зависит 1) от вещества, 2) от толщины его слоя, проходимого лучами, и 3) от длины волны применяемого света. В случае одного и того же вещества угол вращения тем больше, чем толще препарат, и тем меньше, чем длиннее волна лучей, применяемых для освещения препарата. В случае пластинки из кварца, вырезанной перпендикулярно к оптической оси, толщиной в 1 мм, получаются следующие значения углов:

для крайнего красного	17,5°
„ среднего „	19,0°
„ оранжевого	21,4°
„ желтого	24,0°
„ зеленого	27,8°
„ синего	32,3°
„ среднего индигового	36,1°
„ „ фиолетового	40,8°
„ крайнего „	44,1°

На рис. 84 пунктирными линиями изображены, при скрещенных николях микроскопа, направления колебаний лучей различной длины волны для случая правовращающей кварцевой пластинки толщиной в 3 мм.

Из рассмотрения рис. 84 можно сделать вывод, что если осветить препарат белым светом, то без разложения пройдут

через анализатор только те колебания, которые повернуты в кварце ровно на 90° относительно колебаний поляризатора PP_1 и направлены, таким образом, ровно по главному сечению анализатора AA_1 . Приблизительно это колебания зеленых лучей. Все остальные колебания, повернутые на угол больше или меньше 90° , должны разложиться в анализаторе на колебания, направленные по PP_1 и AA_1 , причем этим последним

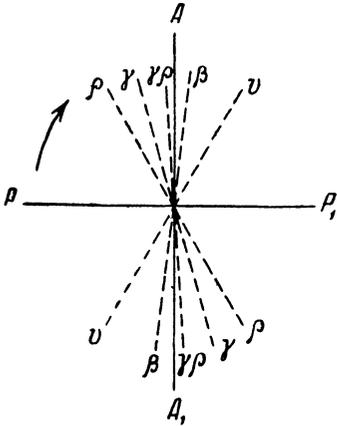


Рис. 84. Направления колебаний лучей различной длины волны для правовращающих кварцевых пластинок толщиной в 3 мм

PP_1 —поляризатор; AA_1 —анализатор;
 pp —колебания красных лучей,
 yy —желтых, yr —зеленых,
 bb —синих, vv —фиолетовых

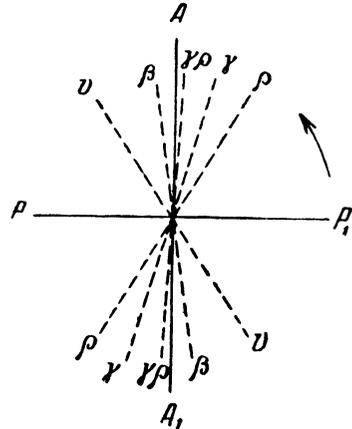


Рис. 85. Направления колебаний лучей различной длины волны для левовращающих кварцевых пластинок толщиной в 3 мм

PP_1 —поляризатор; AA_1 —анализатор;
 pp —колебания красных лучей,
 yy —желтых, yr —зеленых,
 bb —синих, vv —фиолетовых

будет пропущена только та часть их, которая параллельна AA_1 . Она, очевидно, тем меньше, чем больше угол между данными колебаниями и между AA_1 . В результате все лучи, кроме зеленых, потеряют часть своей интенсивности. Получится смесь с преобладанием зеленого цвета, и пластинка покажется нам под микроскопом зеленой. Будем теперь вращать анализатор. Очевидно, препарат не погаснет, но все время будет менять свою интерференционную окраску. Пусть анализатор вращается вправо. Когда он будет повернут на такой угол, при котором главное его сечение AA_1 совпадет с bb , то в той или иной мере будут ослаблены все лучи, кроме синих, и пластинка окрасится в синий цвет. Когда при дальнейшем вращении AA_1 совпадет с vv , получится фиолетовая окраска, и т. д. Интерференционные цвета меняются в порядке спектра. Легко видеть, что если анализатор будет вращаться не вправо, то смена цветов будет обратная, против спектра: зеленый,

желтый, красный и т. д. Легко также сообразить, что в случае левовращающего кварца отношения должны слагаться аналогичным образом: смена интерференционной окраски в порядке спектра при вращении анализатора влево и против спектра при вращении его вправо (рис. 85). Получается следующее общее правило для распознавания право- и левовращающих препаратов: данный препарат вращает плоскость поляризации в ту же сторону, при вращении в которую интерференционные цвета меняются в порядке спектра.

Вращательная способность. Назовем угол, на который слой данного вещества толщиной в 1 мм вращает плоскость поляризации, вращательной его способностью. Для большинства веществ она ниже, чем для кварца, а для некоторых выше; для киновари она в 15 раз выше, чем для кварца. Удивительно высоких значений, в сотни раз больше, чем для кварца, достигает вращательная способность некоторых анизотропных жидкостей и жидких кристаллов. Из жидкостей изотропных вращают плоскость поляризации нефти, скипидар, раствор сахара и многие другие.

Причина вращения плоскости поляризации. Для объяснения явления вращения плоскости поляризации Френелем было высказано предположение о возникновении в соответствующих средах круговых световых колебаний.

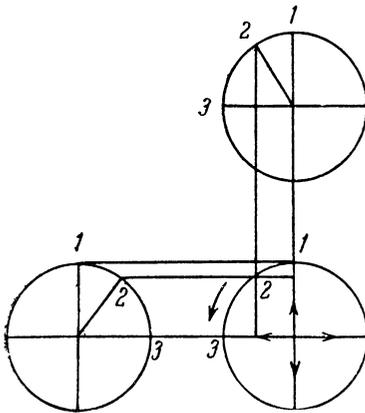


Рис. 86. Левое круговое колебательное движение, суммирующееся из двух прямолинейных, с разностью фаз $\frac{\pi}{2}$

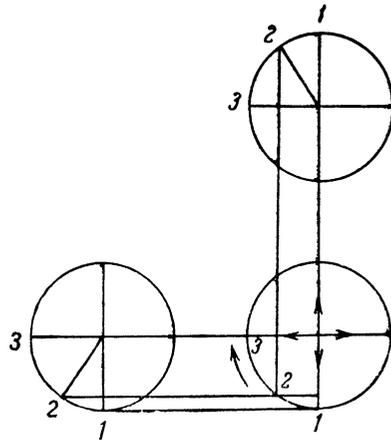


Рис. 87. Правое круговое колебательное движение, суммирующееся из двух прямолинейных, с разностью фаз $\frac{3\pi}{2}$

Если допустить существование таких колебаний, то каждое из них можно представить себе как составляющееся из двух прямолинейных колебаний со следующими свойствами:

- 1) взаимно перпендикулярных,
- 2) с равными амплитудами и скоростями и
- 3) с разностью фаз, равной нечетному числу $\frac{\pi}{2}$.

На рис. 86 представлено круговое колебательное движение против часовой стрелки, т. е. левое, суммирующееся из двух прямолинейных, с разностью фаз, равной $\frac{\pi}{2}$, а на рис. 87— круговое движение по часовой стрелке, правое, суммированное из двух прямолинейных, с разностью фаз $\frac{3\pi}{2}$.

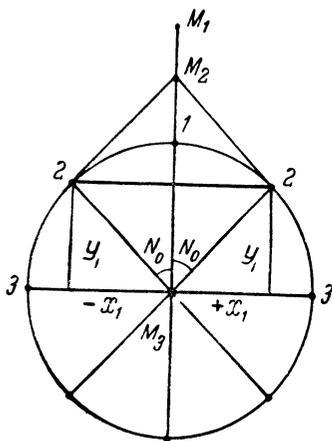


Рис. 88. Образование прямолинейного колебания из двух круговых

Каждое прямолинейное колебание можно рассматривать, с другой стороны, как равнодействующее двух круговых колебаний одного и того же радиуса и одной и той же скорости, но противоположных по направлению: одного—правого, а другого—левого. Амплитуда результирующего прямолинейного колебания равняется при этом двойному радиусу колебаний круговых, а направление колебаний совпадает с диаметром, проходящим через место встречи круговых колебаний.

Чтобы убедиться в том, что это действительно так, будем разлагать каждое из наших круговых колебаний на слагающие его взаимноперпендикулярные прямолинейные (рис. 88). Предположим, что одно из этих последних направлено по упомянутому сейчас диаметру встречи (y), β — фаза круговых колебаний, считая от момента встречи, a — радиус круговых колебаний. Рассмотрим следующие моменты.

- 1) Момент встречи $\beta = 0$.

	y	x
Правое колебание	$+a$	0
Левое колебание	$+a$	0
	$2a$	0

- 2) $\beta = N_0$.

Правое колебание	y_1	x_1
Левое колебание	y_1	$-x_1$
	$2y_1$	0

- 3) $\beta = 90^\circ$.

Правое колебание	0	a
Левое колебание	0	$-a$
	0	0

и т. д.

Колеблющаяся точка в M_3

Причиной вращательной способности тех или иных сред является, очевидно, то обстоятельство, что скорость тех круговых колебаний, из которых складывается вступающее в такую среду колебание прямолинейное, перестает здесь быть одинаковой. В результате диаметр встречи круговых колебаний не остается постоянным, но с каждой встречей перемещается по направлению вращения более быстрого колебания.

Отсюда становится понятным тот установленный выше на опыте факт, что вращательная способность a данной среды пропорциональна ее толщине. Понятно, далее, и то, что эта вращательная способность однозначно изменяется вместе со скоростью колебаний: чем последняя больше, тем чаще повторяются встречи круговых колебаний, тем быстрее растет a .

Нарушение равенства скоростей круговых колебаний в телах с вращательной способностью нельзя объяснить иначе, как неодинаковым сопротивлением, которое встречают в таких средах правые и левые колебания. Чем оно вызывается? Тот

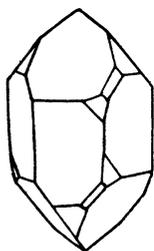


Рис. 89. Правый кристалл кварца

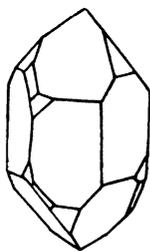


Рис. 90. Левый кристалл кварца

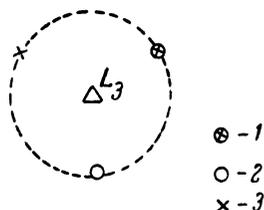


Рис. 91. Винтовая ось симметрии
1, 2, 3 — материальные точки, лежащие в разных плоскостях

факт, что вращательная способность свойственна не только кристаллам, но и жидкостям, а в кристаллах она не зависит от направления, — свидетельствует о том, что дело здесь, по видимому, во внутреннем строении, правом и левом, самых молекул вещества. В кристаллах, однако, это правое и левое строение наблюдается в самых кристаллических комплексах молекул, в результате чего получают так называемые энантиоморфные, правые и левые формы кристаллов. В качестве примера на рис. 89 изображены правый и соответственно правовращающий, а на рис. 90 — левый и левовращающий кристаллы кварца.

Энантиоморфные вещества можно представлять себе построенными из сложной системы пространственных решеток таким образом, что соответственные частицы параллельных между собой сеток расположены по винтовой кривой, завернутой вправо или влево (винтовая ось симметрии). На рис. 91

винтовая ось третьего порядка перпендикулярна к чертежу. Точка, изображенная знаком 1, лежит в плоскости чертежа, точки, изображенные знаками 2 и 3—в параллельных между собой и бумаге плоскостях, равно отстоящих от плоскости бумаги, одна — сверху, другая — снизу. Если точка 3 находится в верхней плоскости, а 2 — в нижней, то закручивание винта правое; если, наоборот, 3 представляет нижнюю точку, а 2 — верхнюю, то закручивание левое.

Весьма интересно, что искусственное воспроизведение такого строения из весьма тонких пластинок слюды сопровождается ожидаемым эффектом вращения плоскости поляризации. Пластинки накладываются в стопку одна на другую с таким расчетом, чтобы соответственные точки их расположились по спирали. Такие стопки, обладающие вращательной способностью, называются „слюдными системами Рейша“.

Величина двупреломления при вращении плоскости поляризации. Двойное лучепреломление, возникающее в процессе вращения плоскости поляризации, значительно уступает по своей силе обыкновенному двойному преломлению. Так, для кварца оно едва достигает величины 0,00007, между тем как Ne—No этого минерала — около 0,01. Вследствие этого вращение плоскости поляризации кварца можно наблюдать только в толстых препаратах, да и то лишь в таких, которые вырезаны перпендикулярно к оптической оси, где это вращение не маскируется обыкновенным двупреломлением.

Коноскопическая картина вращающих кристаллов. В сходящемся свете такой препарат дает интерференционную фигуру (рис. 92), отличающуюся от интерференционной фигуры невращающих кристаллов тем, что центральная часть ее освещена. При этом, как само собой понятно, она окрашена в тот же интерференционный цвет какой этот препарат дает в параллельном поляризованном свете. Вращение столика не оказывает на этот цвет никакого влияния, а при вращении анализатора он постепенно сменяется другими цветами: в порядке спектра или против него, в зависимости от того, совпадают ли или нет направления вращения анализатора и препарата.



Рис. 92. Коноскопическая фигура одноосного вращающего кристалла

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД Е. С. ФЕДОРОВА

§ 10. ПРИНЦИП И УСТРОЙСТВО УНИВЕРСАЛЬНОГО СТОЛИКА

Как видно из предыдущего, оптическое исследование кристаллов того или иного вещества под микроскопом дает ряд признаков, которые служат для его характеристики и для отличия его от других твердых веществ. Вполне естественно, что к такому исследованию весьма часто прибегают на практике. В особенности это имеет место при изучении пороодообразующих минералов в петрографии, где именно кристаллооптика этих последних поставлена во главу угла.

Обыкновенный поляризационный микроскоп, которым мы пользовались до сих пор, является, вообще говоря, прекрасным инструментом, приспособленным для целей практической кристаллооптики. Тем не менее он не лишен некоторых недостатков. Одним из наиболее важных, пожалуй, даже самым существенным из его недостатков, является ограниченное вращение на нем шлифа в одной только его собственной плоскости. Таким образом, какое бы минеральное зерно мы ни взяли, мы не можем при его исследовании выйти из пределов той случайной плоскости, по которой оно рассечено шлифом. Вследствие этого и для нахождения особенно характерных направлений и плоскостей в кристалле, и тем более для полноты его оптической характеристики приходится производить и комбинировать наблюдения над многими зернами минерала. Понятно, что все это затягивает и затрудняет исследование.

Указанное неудобство поляризационного микроскопа в настоящее время в значительной мере устранено благодаря применению так называемого универсального столика Е. С. Федорова, позволяющего вращать препарат вокруг не одной,

а нескольких осей (четыре или пять), пересекающихся в одной точке, в центре универсального столика.

Устройство столика Федорова. Универсальный столик Федорова обычно привинчивается двумя винтами на столик микроскопа.

На рис. 93 изображен пятиосный столик Федорова, выпускаемый заводом „Русские самоцветы“ в Ленинграде. Препарат помещается на стекле внутреннего круга n . Круг снабжен на краю меткой и вращается в кольце h , содержащем градусные деления для отсчета углов вращения круга n . Ось, во-

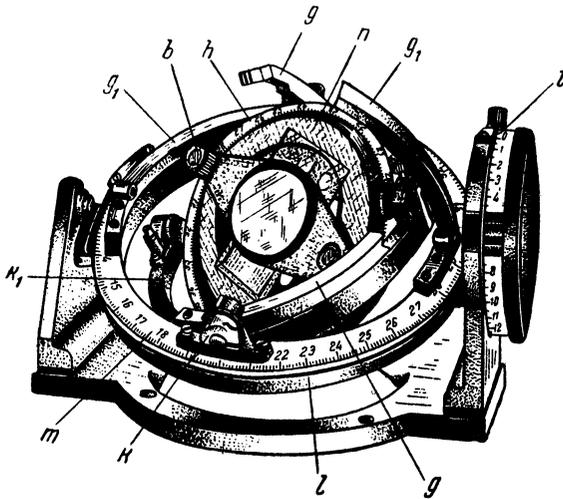


Рис. 93. Пятиосный столик Федорова

b —винты крепления верхнего стеклянного полушара; n —круг, вращающийся вокруг оси N , перпендикулярной к оси I ; H и K —оси соответственных наименований; m —кольцо, движущееся вокруг оси M ; gg_1 —дужки для отсчетов угла поворота по осям H и K ; i —шкала углов поворота по оси I . (При нормальном положении столика ось K должна совпадать с осью I , H должна быть им перпендикулярной, а остальные оси должны стоять на нуле, т. е. весь столик должен быть горизонтальным)

круг которой происходит это вращение, перпендикулярная к кругу n , была названа Е. С. Федоровым осью N (Normal—нормаль к шлифу). Кольцо h , в свою очередь, вращается на шарнирах вокруг оси H (Hilfsaxe—вспомогательная ось), лежащей в плоскости круга n и перпендикулярной к N . Следующее кольцо K_1 , к которому прикреплена ось H , вращается в вертикальной плоскости вокруг дополнительной оси K (в четырехосных столиках эта ось отсутствует). Вертикальные углы (повороты по осям H и K) отсчитываются по специальным дужкам g и g_1 , убирающимся при работе. Ось K лежит на кольце m , которое вращается в собственной плоскости вокруг перпендикулярной к ней оси M (Mobile—подвижная ось).

Кольцо t имеет градусные деления по краю; подстилающее его кольцо l , по которому оно скользит при своем движении и на боковом выступе которого виден нониус, неподвижно соединено с вертикальным кругом i . Вращение последнего и одновременно с ним всей описанной системы происходит вокруг горизонтальной оси I (Immobile — неподвижная ось), параллельной наблюдателю. Последнее, шестое по счету вращение всего столика Федорова происходит вместе с обыкновенным столиком, на котором он укреплен, вокруг оси микроскопа (ось A).

Четырехосный и пятиосный столики. Различие в конструкции столиков Федорова вызывает и различие методов работы на них. При работе на четырехосном столике все установленные на нем кристаллографические и кристаллооптические направления наносятся на проекцию и уже на этой последней производятся дальнейшие вычисления. Конструкция пятиосного столика позволяет прочитывать ряд необходимых углов непосредственно на столике и тем самым в ряде случаев значительно ускоряет работу. Однако составление диаграммы часто бывает весьма полезно, а при структурном изучении горных пород — и совершенно необходимо. В соответствии с этим главное внимание уделяется в дальнейшем работе на четырехосном столике, и в тех случаях, когда это не оговорено специально, предполагается именно четырехосный столик.

Шаровые сегменты. Кроме описанной нами системы осей, необходимую составную часть столика Федорова составляют два стеклянных шаровых сегмента (рис. 94). Один из них (b) приклеивается капелькой глицерина к нижней поверхности

круглого стекла столика и в таком положении удерживается длительное время (недели, месяцы) во время работы. Другой сегмент (a) накладывается (и подвинчивается винтиками, находящимися в его оправе) сверху на шлиф, помещаемый на круглом стекле столика. Между верхним сегментом и шлифом и между шлифом и круглым стеклом должна быть опять-таки прокладка из капелек глицерина. Так как стекла шлифа, кружка и сегментов имеют одинаковый показатель преломления ($N=1,52$) и приблизительно таким же светопреломлением обладают канадский бальзам в шлифе

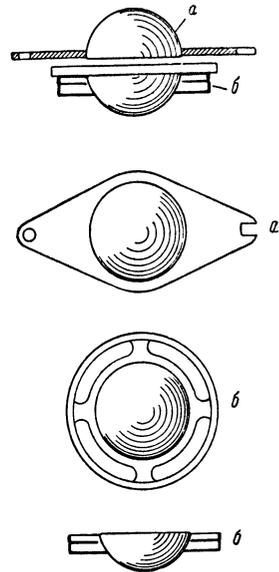


Рис. 94. Стеклянные полушаровые сегменты

и глицерин, то вся полученная нами система представляет собой достаточно однородную сферу, в экваториальной плоскости которой находится пластинка шлифа. Шлиф передвигается в своей плоскости таким образом, чтобы минеральное зерно, подлежащее исследованию, совмещалось с центром

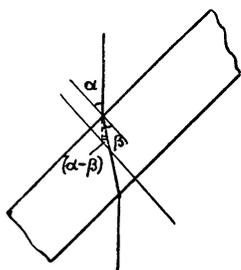


Рис. 95. Ход луча в плоско-параллельной пластинке без сегментов

и воздуха—тем больше, чем больше угол поворота. Углы в шлифе были бы меньше, чем углы в воздухе (рис. 95, α и β). Все это, само собой понятно, весьма затрудняло бы наблюдения и искажало бы его результаты.

Поправка на светопреломление минерала. Необходимо, однако, заметить, что и при употреблении сегментов дело не обходится без некоторых недоразумений. Возникают они именно тогда, когда показатель преломления минерала более или менее сильно отличается от показателя преломления сегментов. Происходящее при этом отклонение луча от своего первоначального направления определяется по формуле светопреломления:

$$\sin x = \frac{N}{Nx} \sin \alpha,$$

где

α — угол в стекле,

N — показатель преломления стекла,

Nx — показатель преломления минерала,

x — угол в минерале.

Для нахождения значения x по величине α при $N = 1,52$ и при разных величинах Nx нами составлена специальная таблица (табл. 5).

Плюсы и минусы в таблице означают, что к α нужно прибавить или что от него необходимо отнять соответственное число градусов, чтобы получить x .

Таблица 5

Поправки для перехода от углов наблюдения α к углам действительным x при N сегмента, равном 1,52

α	Поправки при показателе преломления минерала									
	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
10	+ 1,0	+1,0	-0,0	-0,0	-0,5	-1,0	- 1,5	- 1,5	- 2,0	- 2,0
15	+ 1,5	+1,0	+0,5	-0,5	-1,0	-1,5	- 2,0	- 2,5	- 2,5	- 3,0
20	+ 2,0	+1,5	+0,5	-0,5	-1,5	-2,0	- 2,5	- 3,0	- 3,0	- 4,0
25	+ 2,5	+1,5	+0,5	-0,5	-1,5	-2,5	- 3,0	- 3,5	- 4,0	- 5,0
30	+ 3,0	+2,0	+1,0	-1,0	-2,0	-3,0	- 3,5	- 4,5	- 5,0	- 6,0
35	+ 4,0	+2,5	+1,0	-1,0	-2,0	-3,5	- 4,5	- 5,5	- 6,0	- 7,0
40	+ 5,0	+3,0	+1,0	-1,0	-2,5	-4,0	- 5,5	- 6,5	- 7,0	- 8,5
45	+ 6,0	+3,5	+1,0	-1,5	-3,0	-4,5	- 6,5	- 7,5	- 8,0	-10,0
50	+ 7,0	+4,0	+1,5	-1,5	-3,5	-5,5	- 7,5	- 8,5	- 9,5	-11,5
55	+ 9,0	+5,0	+1,5	-2,0	-3,5	-6,5	- 8,5	-10,0	-11,0	-13,0
60	+11,0	+6,0	+2,0	-2,5	-4,5	-7,5	-10,0	-11,5	-12,5	-15,0

В более общем виде задача нахождения x по величине α решается при помощи круговой диаграммы Федорова (рис. 96). Способ ее построения и использования уясняется из дополнительного рис. 97, где при концентрических окружностях радиуса, принятого за единицу, и радиуса $\frac{N}{Nx}$ осуществляется равенство $\sin x = \frac{N}{Nx} \sin \alpha$. На рис. 96 вместо одной внутренней окружности нанесен целый ряд их, причем для удобства деления радиусы обозначены не через $\frac{N}{Nx}$, а через обратную величину их $\frac{Nx}{N}$.

Пример. Пусть $\alpha = 61^\circ$, а $\frac{Nx}{N} = \frac{1,75}{1,52} = 1,15$. От 60° внешней окружности передвигаемся по радиусу до окружности радиуса 1,15 и отсюда поворачиваем направо по горизонтали опять до внешней окружности, где читаем: $x = 49^\circ$.

Когда $Nx < N$, употребляется обратный прием: от a на внешней окружности следуют по горизонтали до окружности

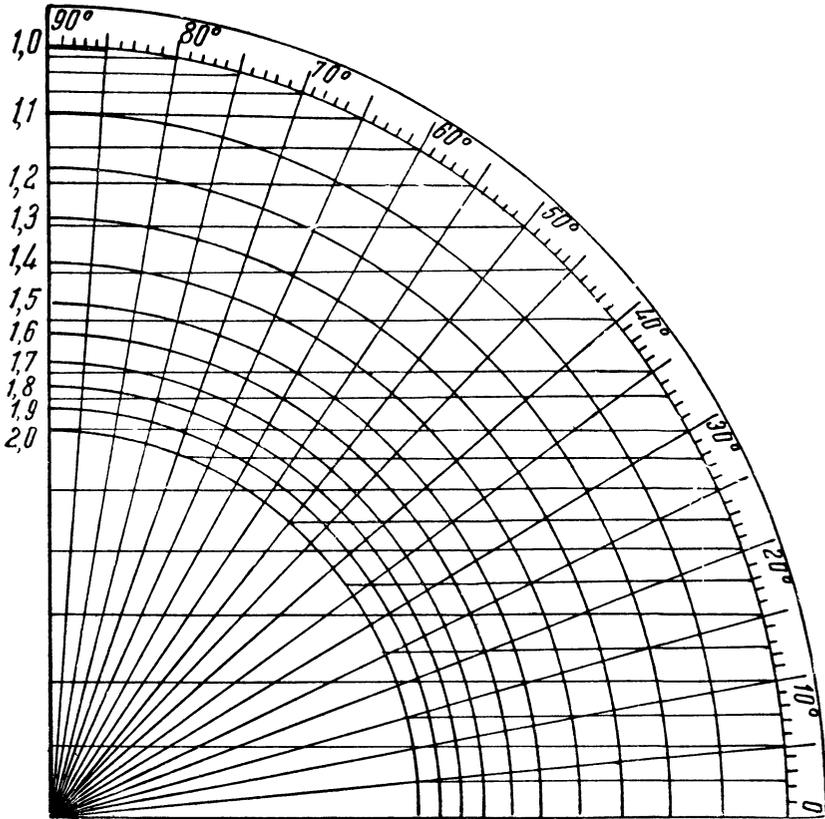


Рис. 96. Диаграмма для перехода от углов, измеренных с сегментами иного светопреломления, чем минерал, к углам в минерале

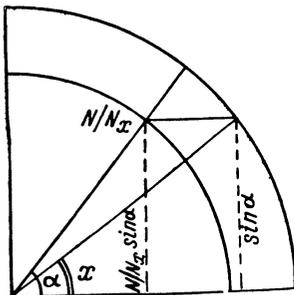


Рис. 97. Пример применения диаграммы рис. 97

радиуса $\frac{N}{Nx}$, а отсюда по радиусу вновь до внешней окружности, где находится x .

К каждому столбiku в настоящее время обычно прилагаются, кроме основной пары сегментов с $N=1,516$, также две дополнительные пары с $N=1,554$ и $N=1,640$. Чтобы уменьшить неточность в определении углов и в ряде случаев избавиться от поправки или сильно уменьшить ее,

для каждого исследуемого минерала берется такой сегмент, показатель преломления которого наиболее близок к показателю преломления минерала. Предельная точность обычной работы на столике Федорова $\pm 1^\circ$. Ясно, таким образом, что работать без поправок можно лишь в тех случаях, когда эта поправка не превышает размеров неточности. Из табл. 5 видно, что при углах, с которыми обычно приходится работать (меньше $40-50^\circ$), это имеет место в тех случаях, когда светопреломление изучаемого кристалла и сегмента отличается не более, чем на $0,02-0,03$. Практически при работе с полусферами, сделанными из стекла с показателем преломления $1,516$, можно не вводить поправок для калиевых полевых шпатов, а с полусферами $1,554$ — для плагиоклазов. Полусферам $1,64$ примерно соответствует светопреломление обычных роговых обманок, биотитов, пироксенов и т. д.

§ 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДИКАТРИСЫ

Установка столика. Приступая к работе со столиком Федорова, прежде всего следует тщательно его центрировать.

Поместив столик на микроскоп и наклеив на него препарат, начинают центрирование объектива. Для этого закрепляют все оси столика в горизонтальном положении и, вращая столик микроскопа (ось A), центрируют объектив по предыдущему (стр. 46). Обычно при работе по методу Федорова употребляют малые объективы — двух- или трехкратные или специальные длиннофокусные — пяти-, десяти- или тридцатикратные. После полного центрирования объектива центрируют самый столик Федорова. Столик микроскопа при этом закрепляют и несколько опускают винты, скрепляющие с ним столик Федорова. Вращая последний вокруг оси N , определяют центр вращения и, пользуясь широкими отверстиями крепящих винтов, совмещают его с центром поля зрения и зажимают возможно плотнее крепящие винты.

Далее следует вертикальное центрирование, компенсирующее различия в толщине предметного стекла. Наклоняют шлиф на предельный угол по оси I (или оси H) в разные стороны и ввинчивая (или вывинчивая) оправу стекла в круг n , добиваются того, чтобы центральное зерно не выходило из фокуса. При этом обычно приходится несколько изменять фокусировку трубы микроскопа.

Установка индикатрисы. Наиболее просто удается находить на столике Федорова оси оптической индикатрисы. Если совместить какую-либо ось индикатрисы с осью I столика, то перпендикулярно к последней, в плоскости главного сечения микроскопа (параллельно вертикальной нити окулярного креста) автоматически установится перпендикулярное к этой оси

сечение индикатрисы, и, следовательно, при всех поворотах по оси I сохранится темнота. Установка эта производится следующим образом.

Путем вращения вокруг оси I отклоняем препарат на возможно больший угол от себя и в этом положении, при скрещенных николях, затемняем исследуемое зерно, вращая внутренний круг вокруг оси N . Затем вращаем систему вновь вокруг оси I в противоположную сторону, т. е. к себе, также на возможно больший угол. Зерно при этом, вообще говоря, просветлеет. Не трогая ось N , затемняем зерно путем вращения вокруг оси H и в этом новом положении вновь вращаем систему от себя вокруг оси I . Если темнота при этом сохраняется, это значит, что одна из главных плоскостей индикатрисы совмещена с плоскостью симметрии микроскопа, а перпендикулярная к ней главная ось индикатрисы совмещена с осью I . Если же темнота опять нарушается, то, очевидно, означенного совмещения мы еще не достигли. Вновь отклоняем препарат на возможно больший угол от себя, вращаем до затемнения вокруг оси N и т. д. Повторяя описанные операции и подправляя попеременно положение осей N и H , мы достигаем наконец желательной установки полной темноты, не нарушаемой вращением вокруг оси I . Эта темнота означает, что одна из главных осей индикатрисы совместилась с осью I и что главная ее плоскость, перпендикулярная к оси I , совпала с установочной плоскостью.

Теоретически рассуждая, описанным путем можно привести последовательно в совпадение с установочной плоскостью все три главные плоскости индикатрисы. Практически, однако, это почти никогда не удается. Причиной служит ограниченная возможность вращения препарата вокруг оси H (максимум на 60° от его нулевого положения). При больших его наклонах оптическая картина теряет ясность, и, кроме того, металлические части прибора входят в поле зрения микроскопа. Таким образом, с удовлетворительной точностью устанавливаются обычно не все три, а только две главные плоскости индикатрисы, образующие меньшие, чем третья, углы с оптической осью микроскопа. Впрочем, в непосредственной установке на столике этой третьей плоскости мы обычно и не нуждаемся, так как положение ее легко определяется графически, при помощи стереографической проекции двух первых плоскостей.

Нанесение результатов измерения на диаграмму. Для черчения стереографической проекции наиболее удобно пользоваться сеткой Вульфа, в которой на плоскость основного круга стереографически спроектированы меридианы и параллельные круги через два градуса каждый (рис. 98).

Черчение при помощи сетки Вульфа производится на прозрачной бумаге (бумажной кальке), накладываемой на сетку.

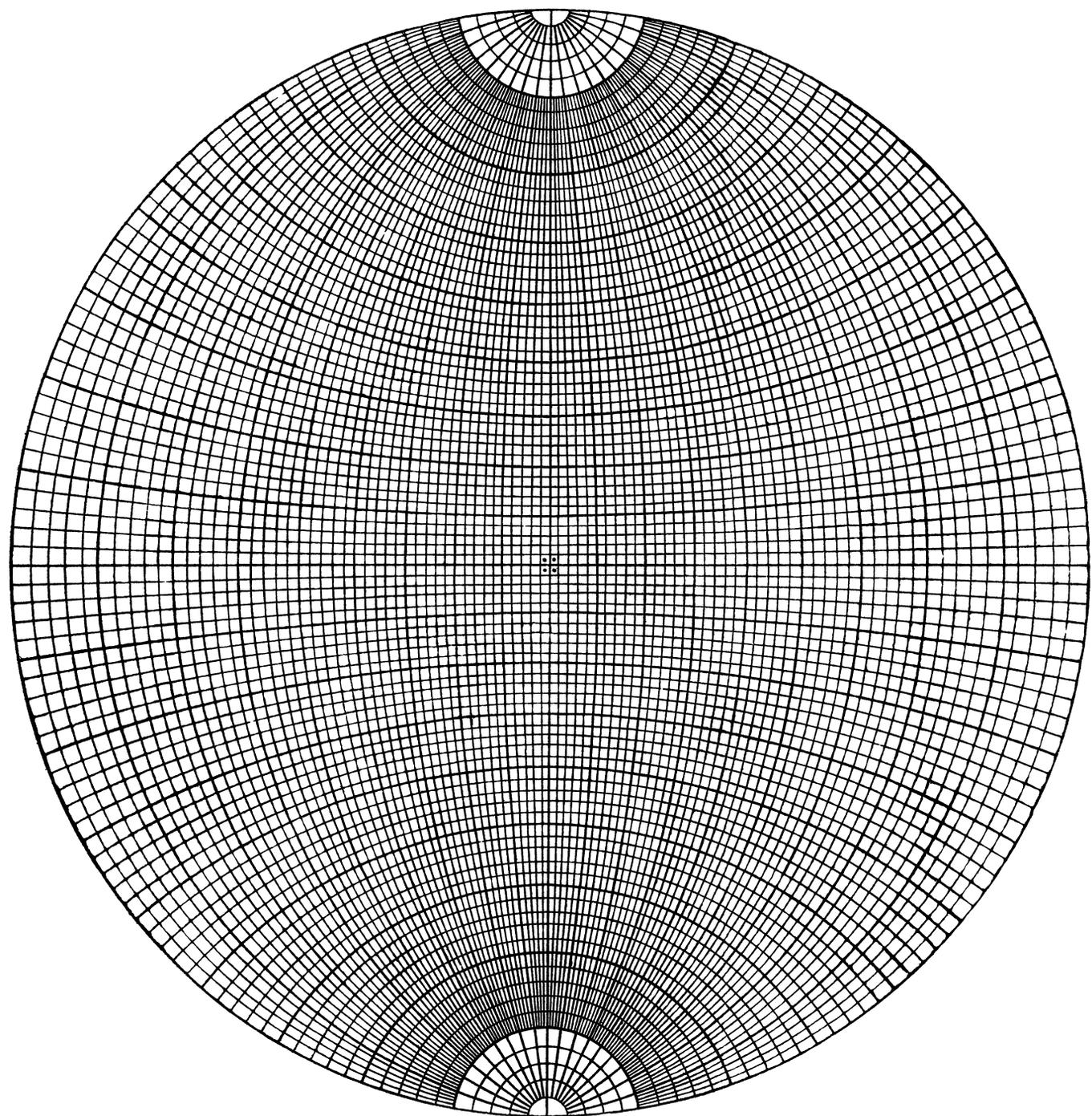


Рис. 98. Сетка Вульфа

Для удобства работы самую сетку наклеивают предварительно на толстый картон или на дощечку из деревянной фанеры и в центре ее укрепляют перпендикулярно к сетке металлический шпенек. В центре чертежной бумаги посредством накаленной иглы прожигают круглое отверстие; при наложении бумаги на сетку шпенек входит в отверстие и служит осью вращения бумаги. Чтобы отверстие при этом вращении не расширялось, полезно, прежде чем его прожигать, подготовить для него более толстый бумажный слой путем подклеивания на его предполагаемом месте, например, маленького кружка обыкновенной писчей бумаги. При проектировании результатов исследования на универсальном столике сетку с наложенной на нее бумагой располагают таким образом, чтобы проекция установочной плоскости микроскопа совпала с меридианом — диаметром сетки, а оси I соответствовал экваториальный диаметр ее.

При работе с сеткой Вульфа крайне легко решаются все задачи стереографического проектирования индикатрисы.

Вместо гномостереографической проекции, преимущественно употребляемой в геометрической кристаллографии, в кристаллооптике более охотно применяют так называемую грамма-стереографическую проекцию. В этой последней проектируют на сферу и на основной круг не перпендикуляры к плоскостям, а непосредственно пучок самых плоскостей и направлений, пересекающихся в центре сферы. В противоположность гномопроекции, в граммапроекции плоские сечения индикатрисы изображаются большими кругами, а направления — точками.

Предположим, что нам дана задача: представить в проекции все три плоскости индикатрисы.

На столике установили:

- 1) первую плоскость — путем вращения
 - а) вокруг оси N на 30° влево (сокращенно $N 30^\circ$ л.),
 - б) вокруг оси H на 20° вправо (сокращенно $H 20^\circ$ п.),
- 2) вторую плоскость — путем вращения
 - а) $N 103^\circ$ л. и
 - б) $H 40^\circ$ л.

На рис. 99 представлена проекция первой плоскости. Чтобы ее получить, мы должны были, очевидно, произвести следующие операции:

- а) нанести на бумагу точку нуля,
- б) повернуть бумагу на 30° влево,
- в) отсчитать от центра проекции по экватору сетки 20° влево же и провести через найденную таким образом точку E меридиональный круг,
- г) вернуть бумагу путем вращения на 30° вправо в исходное положение.

Следует обратить специальное внимание на то, что отсчет δ произведен не вправо (что соответствовало бы вращению вправо столика вокруг оси H), а влево. Это сделано потому, что на столике мы переходим от плоскости первой к установочной плоскости HH , а на сетке, наоборот, от установочной к первой. Так нам всегда придется поступать и впредь при проектировании вертикальных углов.

На рис. 100 к проекции первой плоскости присоединена также проекция второй плоскости, вычерченная при помощи

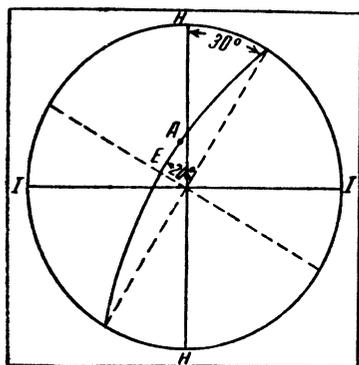


Рис. 99. Нанесение на диаграмму плоскости индикатрисы

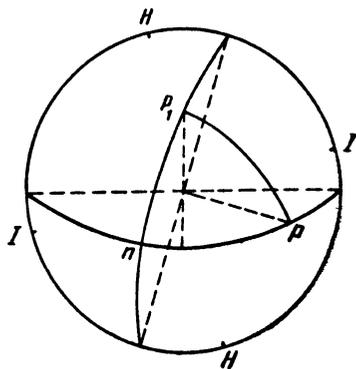


Рис. 100. Проекция всех трех плоскостей индикатрисы и их полюсов

тех же приемов, как и первая. Вследствие взаимной перпендикулярности главных осей индикатрисы полюс первой плоскости P^1 , очевидно, должен оказаться на дуге второй, а полюс этой последней P_1 — на дуге первой плоскости². Ясно также, что точка пересечения наших дуг n — не что иное, как полюс третьей плоскости³. Поворачиваем бумагу таким образом, чтобы точка оказалась на экваторе сетки. Тогда P и P_1 лягут на меридиан третьей плоскости. Остается его прочесть.

¹ Для нахождения полюса плоскости P поворачивают чертежную бумагу на сетке таким образом, чтобы дуга, изображающая плоскость, совпала с подходящим меридианом. От точки пересечения меридиана с экватором откладывают по этому последнему 90° .

² Практически это часто не наблюдается. Получающаяся при этом неувязка, — если ее не удастся устранить с помощью повторных определений углов N и H на столике, — уничтожают графически — исправляя углы N и H путем добавления или вычитания величин, обратно пропорциональных той чувствительности, с которой они определялись на столике микроскопа. Недостаточная точность установки углов N и H на столике происходит от разных причин: от некоторой нечувствительности глаза наблюдателя, дисперсии осей индикатрисы в белом свете, от оптических аномалий в измеряемом кристалле и т. д.

³ Перпендикулярно к главным плоскостям индикатрисы располагается та или иная ось ее. Следовательно, указываемые здесь полюсы главных сечений индикатрисы являются ее осями: N_g , N_m , N_p .

На рис. 100 мы имеем проекцию всех трех плоскостей индикатрисы.

Двуосные и одноосные кристаллы. Первое, что улавливается нами при установке на столике Федорова плоскостей индикатрисы, это одноосный или двуосный характер ее.

Одноосная индикатриса, как мы знаем, отличается от двуосной тем, что одна из главных ее плоскостей является кругом. Плоскость шлифа пересекает этот круг и вследствие этого заключает в себе один из его диаметров, т. е., иначе говоря, одну из главных осей индикатрисы. Если вращать

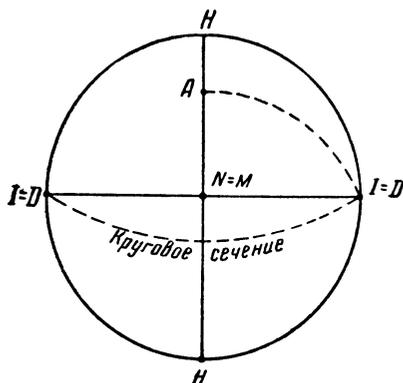


Рис. 101. Установка плоскости индикатрисы одноосного кристалла путем вращения только вокруг оси N

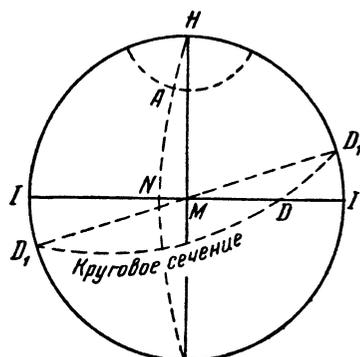


Рис. 102. Отличие одноосного кристалла от двуосного

шлиф в его собственной плоскости, то, очевидно, при некотором угле поворота эта ось—диаметр совпадет с осью I ($I=D$, рис. 101), и одновременно главная ось индикатрисы, перпендикулярная к оси—диаметру и заключающая в себе оптическую ось индикатрисы A , совпадет с установочной плоскостью микроскопа (NN , рис. 101). Получается, таким образом, следующее правило для одноосных кристаллов: одну из главных плоскостей одноосной индикатрисы устанавливают путем вращения препарата вокруг только одной оси N , не изменяя положения оси H .

Двуосная индикатриса, в противоположность одноосной, имеет только три главные оси, и, таким образом, крайне редко случается, чтобы одна из них оказалась в плоскости шлифа и совмещалась с осью I посредством вращения столика вокруг одной только оси N , не изменяя положения оси H . Когда это все же происходит, то и в этом случае очень легко отличить двуосный кристалл от одноосного, производя после указанной установки небольшой наклон препарата вокруг оси H (угол $DI=NM$, рис. 102). Таким образом, мы выводим главную ось из совпадения с I . Если она была диаметром

кругового сечения одноосного кристалла, то, как видно из рис. 102, другой диаметр D_1D_1 можно опять привести в совпадение с I , не изменяя положения H , но вращая столик на этот раз вокруг оси M вместо N . Если же это была одна из главных осей двусного кристалла, то другой главной оси, после вращения вокруг H , в плоскости, перпендикулярной к N и проходящей через I , мы уже не получим. Не получим, таким образом, и описываемой реакции на одноосный кристалл.

Установка оптической оси одноосного кристалла. Когда в сечении индикатрисы, приведенном в установочную плоскость микроскопа, находится оптическая ось одноосного минерала, то если она образует не слишком большой угол с осью микроскопа, ее можно привести в совмещение с этой последней. Для этого, после установки сечения, приводим его в диагональное положение между николями, для чего поворачиваем весь столик Федорова на 45° вокруг оси микроскопа.

Тогда в общем случае минерал просветлеет. В этом новом его положении будем вращать его вокруг оси I . Минерал вновь потемнеет — именно тогда, когда оптическая ось его совместится с осью микроскопа, а при дальнейшем вращении вокруг оси I он опять просветлеет.

Совмещение оптической оси минерала с осью микроскопа проверяют путем вращения столика микроскопа вокруг оси микроскопа (оси A): при этом минерал все время должен оставаться темным.

Определение оптического знака одноосного кристалла. Констатировав одноосность исследуемого минерала, легко определить его оптический знак. Производится это при том же диагональном положении его главного сечения, при котором устанавливается его оптическая ось.

В прорезь трубы над объективом вводится, как обычно, гипсовая или другая компенсационная пластинка, длинной стороной параллельно установленному сечению индикатрисы. Наступающее при этом понижение интерференционной окраски свидетельствует о том, что $Ne' > No$, т. е. что минерал положительный, а повышение ее — что $Ne' < No$, т. е. что минерал отрицательный. Особенно эффектная картина получается тогда, когда оптическая ось совмещается с осью микроскопа. Употребляя в качестве компенсатора гипсовую пластинку, дающую красный цвет первого порядка, и слегка вращая столик вокруг оси I в ту и другую стороны от оптической оси, мы наблюдаем каждый раз, что красная окраска резко сменяется желтой и синей в зависимости от знака кристалла и положения его, относительно пластинки.

Определение наименования осей индикатрисы двусного кристалла. Когда с осью I столика совпадает установленная какая-нибудь ось индикатрисы двусного кристалла, следует определить ее наименование.

Прежде всего необходимо проверить, не является ли она осью Nm . Если Nm совпадает с осью I , то перпендикулярно к ней в установочной плоскости микроскопа будет находиться сечение индикатрисы, являющееся плоскостью оптических осей. После тщательного приведения его в установочную плоскость микроскопа, поворотом столика микроскопа (оси A) на 45° , его ставят в диагональное положение. Путем вращения в этом положении минерала вокруг оси I (если установлено сечение индикатрисы, перпендикулярное к Nm), можно привести оптическую ось в совпадение с осью микроскопа. В этот момент наступает потемнение освещенного ранее минерала. Установленную оптическую ось рекомендуется проверять, вращая столик микроскопа вокруг оси A . В некоторых случаях удается путем вращения кристалла около оси I установить обе оптические оси, попеременно приводя их в совпадение с осью микроскопа. Но чаще это возможно лишь в отношении какой-либо одной оси, а другая выходит за пределы возможных поворотов столика.

Если при описанном вращении столика, находящегося в диагональном положении, вокруг оси I не удастся получить выхода оптической оси и кристалл остается все время светлым,

то, очевидно, в установочную плоскость приведена не плоскость оптических осей, а какое-либо иное главное сечение индикатрисы, содержащее в себе Nm ($Ng - Nm$ или $Np - Nm$), и соответственно с осью I будет совпадать либо Np , либо Ng . Определить это можно путем следующих рассуждений. На рис. 103 представлен такой случай, когда Nm примерно совпадает с осью микроскопа, а устанавливаемые плоскости являются сечениями индикатрисы $Nx - Nm$ и $Ny - Nm$, причем относительные значения Nx и Ny нам не известны. Предположим, что плоскость $Nx - Nm$ совмещена с установочной плоскостью микроскопа. Тогда с осью I совмещена Ny , а с осью H — некоторый вектор Nx' , промежуточный между Nx и Nm . Испытание относительных значений Nx' и Ny производится с гипсовой или иной компенсационной пластинкой (как обычно при диагональном положении столика). Если при этом окажется, что $Nx' > Ny$, то очевидно $Ny = Np$, а если $Nx' < Ny$, то, наоборот, $Ny = Ng$.

Обычно определение наименования оси индикатрисы производится непосредственно после установки какого-либо сече-

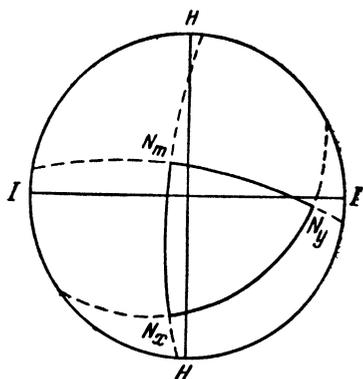


Рис. 103. Стереографическая проекция индикатрисы

ния индикатрисы в установочную плоскость микроскопа и полученное наименование перпендикулярной к ней оси индикатрисы наносится на сетку как полюс установленного сечения.

Определение угла оптических осей двусосного кристалла. В двусосных кристаллах оптические оси находятся по тому же способу, как и в кристаллах одноосных. Иногда при этом удается привести в совмещение с осью микроскопа последовательно обе оптические оси. В других случаях и, как само собой понятно, гораздо чаще — только одну оптическую ось. В первом

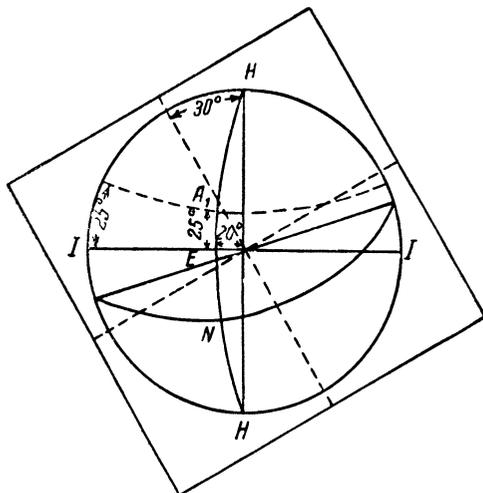


Рис. 104. Графическое определение угла оптических осей

случае угол оптических осей, $2V$, определяется посредством прямого отсчета градусов по шкале круга, во втором его находят графически — в стереографической проекции индикатрисы.

Пусть, например, HEH (рис. 104) — плоскость оптических осей. После приведения ее на столике микроскопа в установочное положение, необходимо повернуть систему вокруг оси на 25° на себя, чтобы совместить оптическую ось A_1 с осью микроскопа. На проекции A_1 окажется, очевидно, в 25° кверху (поворот от себя) от E , т. е. от серединной точки дуги HEH . Измеряем дугу A_1 при помощи параллелей. Она равна V , т. е. половине угла оптических осей.

Определение оптического знака двусосного кристалла. Оптический знак двусосного кристалла определяется непосредственно после описанного выше совмещения одной оптической оси с осью микроскопа, как показано на рис. 105 (разрез по оси микроскопа). В препарате, перпендикулярно к этому разрезу, мы будем иметь всегда Nm . Вращаем столик вокруг оси I .

Если это вращение совершается в сторону $Ng \rightarrow A \rightarrow Np$ (т. е. влево на рис. 105), то вместо A с осью микроскопа совпадет направление Ng' , а перпендикулярно к ней и параллельно гипсу уляжется Np' ; вместо красной появится синяя окраска минерала. Если же вращение будет производиться в противоположную сторону: $Np' \rightarrow A \rightarrow Ng'$ (на рис. 105 вправо),

то с осью микроскопа совпадает Np' , а перпендикулярным к ней и параллельным гипсу окажется Ng' : красная окраска минерала сменится желтой.

Определение знака кристалла возможно также с помощью диаграммы, где нанесены две плоскости индикатрисы и хотя бы одна оптическая ось. Такой случай приведен на рис. 104. Путем построения можно получить Nm (как полюс дуги $HAENH$) и полюс второй дуги (пересекающейся с первой в точке N). С гипсовой пластинкой, как сказано на стр. 103, следует определить его наиме-

нование. Тем самым определится и наименование полюса третьей плоскости (третья ось индикатрисы), изображенно-го точкой N . Зная положение одной оптической оси (точка A), легко можно под- считать, которая из двух биссектрис — Ng или Np является острой.

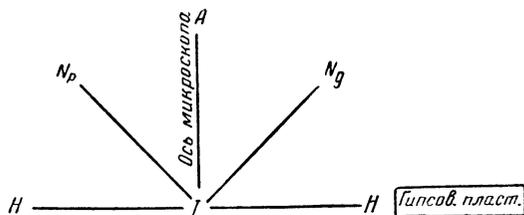


Рис. 105. Определение знака двусосного кристалла

Случай отсутствия выходов оптических осей. При установке двух плоскостей индикатрисы на столике Федорова может случиться, что ни в одной из них не получится выхода оптической оси. Это наблюдается в двух случаях: или когда оптические оси находятся в третьей плоскости, не устанавливавшейся нами, или тогда, когда в действительности они присутствуют в одной из наших плоскостей, но настолько удалены от оси микроскопа, что не совмещаются с ней. О присутствии в данной плоскости оптической оси свидетельствует интерференционная окраска, понижающаяся по мере того, как путем вращения столика вокруг оси I мы уменьшаем угол между оптической осью и осью микроскопа.

Хотя Федоров пытался дать способы определения $2V$ и в том случае, когда, как сказано, ни одна оптическая ось не устанавливается на столике, но все они настолько неточны и громоздки, что не могут быть предметом нашего рассмотрения.

§ 12. ИЗМЕРЕНИЕ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ

Федоровский метод дает очень мало преимуществ в отношении определения константы светопреломления. Предложенный для этой цели В. В. Никитиным способ весьма сложен и дает очень неточные цифры. Самое большее, что мы от него получаем, это возможность быстро ориентироваться

в порядке величины этой константы для тех или иных минералов¹. Гораздо лучше обстоит дело с определением двупреломления последних. Хотя принцип измерения этой величины остается тот же, что в случае плоского столика, но зато, как следует из самого принципа универсального метода, здесь сильно облегчено нахождение главных плоскостей индикатрисы, в которых это измерение должно производиться. Сверх того, Никитиным предложен добавочный способ измерения, специально на столике Федорова, толщины препарата, входящей в формулу двупреломления,—способ, очень удобный и простой. Он основан на измерении ширины какой-нибудь трещинки в шлифе при некотором, специально заданном наклоне препарата.

Определение толщины шлифа на столике Федорова. Пусть на рис. 106, представляющем разрез шлифа по плоскости,

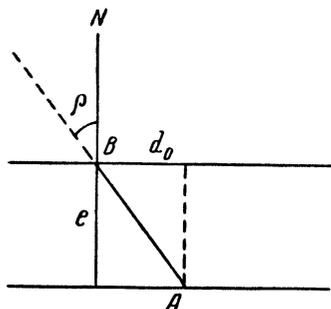


Рис. 106. Соотношение между видимой шириной трещинки спайности и толщиной шлифа

перпендикулярной к оси I , AB —наблюдаемая трещинка, образующая с осью микроскопа N угол ρ . Видимая ширина трещинки— d_0 . Очевидно, если измерить ρ , вращая столик до тех пор, пока трещинка станет вертикально, а также d_0 —при помощи окулярного микрометра, то величину e мы получим из следующего соотношения: $e = d_0 \operatorname{ctg} \rho$. Величина ρ измеряется очень точно на столике. Что же касается d_0 , то вследствие ее незначительности точность измерения здесь очень небольшая. Выгодно поэтому измерять ее не при начальном положении препарата, а после поворота столика вокруг оси I на некоторый угол φ —такой, при котором трещинка, еще не утрачивая своей ясности, представится нам возможно более широкой. На рис. 107 изображен разрез шлифа после этого второго поворота. Ширина трещинки d в этом новом ее положении (т. е. проекции ее на плоскость, перпендикулярную к оси микроскопа) определяется из треугольника ABC :

$$d = S \cdot \cos ABC = S \cdot \cos [90^\circ - (\varphi + \rho)] = S \cdot \sin (\varphi + \rho),$$

или если придать ρ и φ разные знаки соответственно их расположению по разные стороны от нормали к шлифу BN , то

$$d = S \cdot \sin (\varphi - \rho),$$

или

$$S = \frac{d}{\sin (\varphi - \rho)}.$$

¹ Описание этого способа сделано в предыдущих изданиях книги, и здесь мы его опускаем.

Так как в треугольнике ABD , далее, $S = \frac{e}{\cos \rho}$, то

$$e = \frac{d \cos \rho}{(\sin \varphi - \rho)}.$$

Выведенная выше формула для e соответствует замкнутой трещине. Наоборот, когда она является зияющей, наполнен-

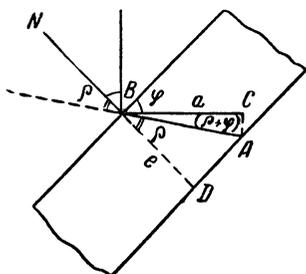


Рис. 107. Определение толщины шлифа по узкой трещине

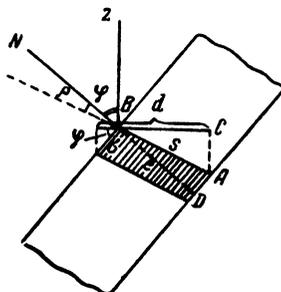


Рис. 108. Определение толщины шлифа по широкой трещине, заполненной канадским бальзамом

ной канадским бальзамом, как на рис. 108, ширина ее больше действительной на величину $\sigma \cos \varphi$, и соответственно наша формула должна принять следующий вид:

$$e = \frac{(d - \sigma \cos \varphi) \cos \rho}{\sin (\varphi - \rho)}.$$

Определение толщины шлифа „по кварцу“. Как известный „метод пылинок“, так и описанный выше „метод трещинки“ дают недостаточно точные результаты: ошибки измерения могут достигать 40—50% измеряемой толщины. Разность хода, с другой стороны, измеряется с очень большой точностью. Выгоднее поэтому непосредственное измерение толщины заменять измерением разности хода какого-либо минерала с известным двупреломлением. Ошибка в различии толщин двух соседних зерен будет всегда меньше, чем ошибка в непосредственном определении толщины. Наиболее удобен для этой цели кварц, двупреломление которого равно 0,009. Для определения „толщины шлифа по кварцу“ зерно кварца, расположенное по возможности ближе к исследуемому зерну, устанавливается так, чтобы его оптическая ось стала в плоскости, перпендикулярной к оптической оси микроскопа. Углы для такой установки лучше прочесть по стереографической проекции. В этом положении ввиду одноосности кварца двупреломление зерна будет максимальным, и искомая толщина шлифа e определится по формуле:

$$e = \frac{\Delta \cos \alpha}{0,009},$$

где

α — угол наклона шлифа к основному положению столика.

Измерение разности хода. Величина Δ на столике Федорова измеряется в определенных, а именно в главных сечениях индикатрисы. Для этой цели соответственное сечение устанавливается в положение, перпендикулярное к оси микроскопа, — так, как описано это нами в главе об оптическом знаке двусосного минерала. Так как при установке нужного сечения шлиф поворачивается вокруг осей H и I на углы h и i , то в результате и слой, проходимый лучами в шлифе, будет уже не e , а e' , причем $e' = \frac{e}{\cos h \cdot \cos i}$, каковая величина и вводится в формулу двупреломления.

Общее и частное двупреломление. Как мы уже знаем из общей части нашего курса, в случае одноосных кристаллов двупреломление минерала имеет один только смысл, а именно — оно означает разницу между оптической осью и радиусом кругового сечения его индикатрисы. В кристаллах двусосных, кроме общего, максимального преломления $N_g - N_p$, содержатся еще две частные его величины: $N_g - N_m$ и $N_m - N_p$. Так как $N_g - N_p = (N_g - N_m) + (N_m - N_p)$, то, очевидно, определив две из этих величин, мы тем самым получаем и третью.

Зависимость между двупреломлением и углом оптических осей. Весьма важным обстоятельством, сокращающим время исследования, является также связь между двупреломлением и величиной $2V$, позволяющая по $2V$ и по одной из величин двупреломления находить две остальные. $2V$, как мы видели, принадлежит к числу величин, наиболее легко и быстро определяемых на столике Федорова. Необходимо поэтому математически сформулировать здесь указанную связь.

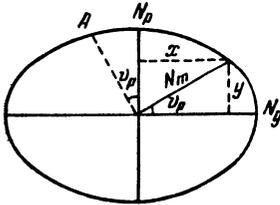


Рис. 109. Угол оптических осей и двупреломление

Пусть рис. 109 изображает сечение некоторой двусосной индикатрисы по плоскости оптических осей. Одна из них A изображена на рисунке.

Напишем уравнение эллипса сечения в полярных координатах:

$$\frac{Nm^2 \cos^2 V_p}{Ng^2} + \frac{Nm^2 \sin^2 V_p}{Np^2} = 1,$$

или

$Nm^2 Np^2 - Nm^2 Np^2 \sin^2 V_p + Ng^2 Nm^2 \sin^2 V_p = Ng^2 Np^2$,
откуда:

$$\sin^2 V_p = \frac{Np^2 (Ng^2 - Nm^2)}{Nm^2 (Ng^2 - Np^2)}.$$

Подобным же образом определяем:

$$\cos^2 V_p = \frac{Ng^2 (Nm^2 - Np^2)}{Nm^2 (Ng^2 - Np^2)};$$

$$\operatorname{tg}^2 V_p = \frac{Np^2 (Ng^2 - Nm^2)}{Nm^2 (Nm^2 - Np^2)}.$$

Можно все три формулы упростить. Для этого перепишем, например, первую из них следующим образом:

$$\sin^2 V_p = \frac{Np^2 (Ng + Nm)}{Nm^2 (Ng + Np)} \cdot \frac{Ng - Nm}{Ng - Np}.$$

Но величина $\frac{Np^2 (Ng + Nm)}{Nm^2 (Ng + Np)}$ очень близка к единице, и, таким образом, мы можем принять:

$$\sin^2 V_p = \frac{Ng - Nm}{Ng - Np}$$

и далее:

$$\cos^2 V_p = \frac{Nm - Np}{Ng - Np},$$

$$\operatorname{tg}^2 V_p = \frac{Ng - Nm}{Nm - Np}.$$

Болдыревым составлены специальные диаграммы связи между двупреломлением и $2V$ исходя из вышеприведенной полной формулы для $\operatorname{tg}^2 V_p$. Одна из них в сокращенном, но достаточном для практических целей виде воспроизведена на рис. 110. По оси абсцисс отложены величины $Ng - Nm$, а по оси ординат $Nm - Np$; кривые обозначают величину $2V$. Диаграмма позволяет решать чрезвычайно просто следующие три задачи.

1. Даны $Ng - Nm$ и $2V$. Найти $Nm - Np$ (вспомогательный рис. 111). Откладываем $Ng - Nm$ по оси абсцисс и от полученной точки следуем по вертикали до кривой, соответствующей $2V$. Отсюда поворачиваем по горизонтали к оси ординат и на этой плоскости прочитываем $Nm - Np$.

2. Даны $Ng - Nm$ и $Nm - Np$. Найти $2V$. Откладываем $Ng - Nm$ по оси абсцисс и из полученной точки ведем вертикаль. Откладываем $Nm - Np$ по оси ординат и из полученной точки ведем горизонталь. Точка пересечения горизонтали с вертикалью лежит на кривой, соответствующей $2V$.

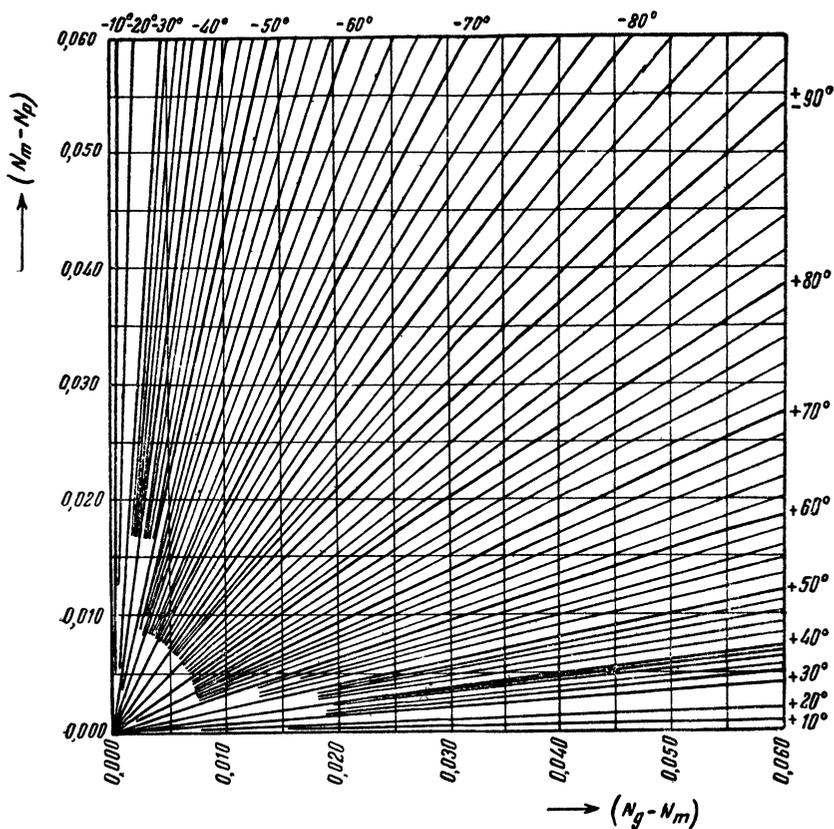


Рис. 110. График зависимости угла оптических осей от двулучеломления по Болдыреву

3. Известны $N_g - N_p$ и $2V$. Требуется определить $N_g - N_m$ и $N_m - N_p$ (вспомогательный рис. 112). Откладываем $N_g - N_p$ как по оси абсцисс, так и по оси ординат. Прямая, соединя-

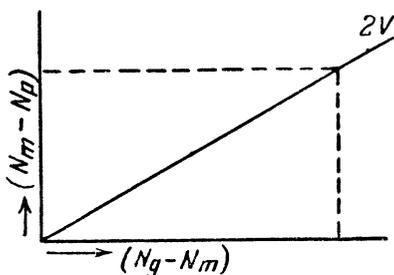


Рис. 111. Пример определения $2V$, когда известны $N_g - N_m$ и $N_m - N_p$

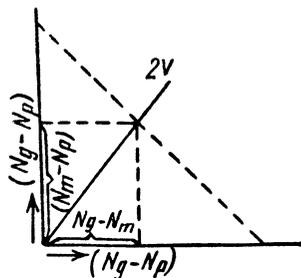


Рис. 112. Пример определения $N_g - N_m$ и $N_m - N_p$, когда известны $N_g - N_p$ и $2V$

ющая концы отрезков, пересекает кривую $2V$ в точке, координаты которой x и y равны $Ng - Nm$ и $Nm - Np$ (ибо, как явствует из рис. 112, $x + y = Ng - Np$).

§ 13. ИНДИКАТРИСА, СПАЙНОСТЬ И ДВОЙНИКИ

Оптическая индикатриса и геометрические направления кристалла. Универсальный столик Федорова является в сущности гониометром. Подобно плоскостям индикатрисы на нем можно устанавливать также грани кристалла, образующие его внешнее ограничение, и плоскости спайности и двойниковые элементы и т. д. Вследствие отрывочности получающихся при этом данных они имеют, конечно, небольшое самостоятельное значение. Наоборот, из комбинации их с индикатрисой возникают новые константы, весьма полезные для характеристики минералов. На первом плане здесь надо поставить

- 1) углы погасания на тех или иных плоскостях относительно трещинок спайности и
- 2) оптическую ориентировку двойниковых образований.

Установка направления спайности. Углы погасания очень удобно определять графически, для чего наносят на диаграмму 1) индикатрису и 2) плоскость спайности. Необходимая для этого установка плоскости спайности на столике Федорова производится обычным способом — путем вращения препарата вокруг осей N и H до тех пор, пока спайность совместится с плоскостью симметрии микроскопа. След ее трещинки в этом положении должен совпадать с осью H , и самая трещинка представляется при этом наиболее узкой и резкой. Если спайность установлена правильно (перпендикулярно к оси I), то параллельность ее и вертикальной оси окулярного креста не нарушится при вращении препарата по оси I . В противном случае установку следует уточнить, изменяя наклоны по осям N и H и проверяя одновременно установку при помощи оси I .

Пример графического определения угла погасания. На рис. 42 изображено сечение моноклинического пироксена параллельно (010) с одной системой трещинок призматической спайности, идущей параллельно вертикальной кристаллической оси c , и с осями индикатрисы Ng и Np . Угол погасания $cNg = 40^\circ$. На рис. 113 то же сечение изображается в виде дуги $NgNp$. Ее пересекает в точке c дуга, изображающая спайность. Дуговой отрезок cNg соответствует углу погасания.

Поскольку спайность пироксенов призматическая, здесь должно быть не одно, а два направления спайности, пересекающиеся под углом, характерным для данного пироксена. Линия пересечения этих двух спайностей должна быть парал-

лельна оси c . Таким образом, проекция ее (оси c) и точка пересечения проекции обеих спайностей должны совпадать. Поэтому безразлично, какой из двух спайностей пользоваться при определении cNg .

В случае моноклинных пироксенов ось Nm совпадает с кристаллографической осью b , являющейся в то же время осью симметрии второго порядка. Следовательно, плоскость оптических осей ($Ng - Np$) совпадает с плоскостью симметрии кристалла, а ось c должна лежать именно в этой плоскости¹

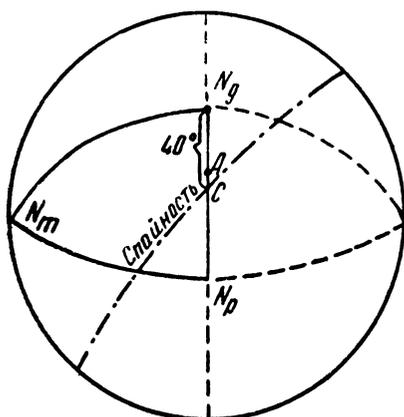


Рис. 113. Графическое определение угла погасания (cNg)

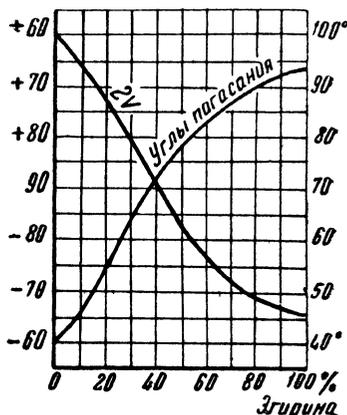


Рис. 114. $2V$ и углы погасания в зависимости от содержания эгириновой молекулы в пироксене

Значение углов погасания. Углы погасания, характерные для того или иного минерального вида, в случае изоморфных смесей изменяются закономерно и непрерывно вместе с их химическим составом. На диаграмме (рис. 114), заимствованной нами у Заварицкого, представлены изменения угла погасания и величины угла $2V$ моноклинических пироксенов параллельно с изменением их состава от чистого диопсида до чистого эгирина:

$$\begin{aligned} \text{для чистого диопсида } cNg &= 40^\circ \quad 2V = +60^\circ \\ \text{” ” ” эгирина } cNg &= 94^\circ \quad 2V = -66^\circ \\ \text{” } 50\% \text{ диопсида и } & \\ \text{” } 50\% \text{ эгирина } cNg &= 77^\circ \quad 2V = -83^\circ \end{aligned}$$

¹ На практике часто бывает, что точка пересечения двух призматических спайностей на несколько градусов отстоит от плоскости оптических осей, и тем самым кристалл моноклинической симметрии приобретает псевдотриклинность. Однако, такое отклонение не должно превышать 2—3 градуса. В противном случае оно является явной ошибкой, и тогда необходимо проверить установку обеих плоскостей спайности.

Метод измерения углов погасания при обычной работе на плоском столике микроскопа, как известно, особенно хорошо разработан для полевых шпатов, в частности для плагиоклазов, где по этой константе, относимой к тому или иному ориентированному сечению плагиоклаза, мы определяем химический состав последнего (процент альбита и анортита).

Непосредственное определение угла погасания на столике Федорова. Само собой разумеется, что методику определения углов погасания легко перенести на универсальный столик Федорова, где она значительно упрощается и уточняется. Так, в общей части нашего курса разрезы плагиоклазов, перпендикулярные к обеим главным спайностям по P (001) и по M (010), указаны как такие, в которых получаются наиболее характерные их погасания (рис. 54).

Вместо того чтобы подыскивать эти разрезы на плоском столике микроскопа, гораздо проще установить на столике Федорова в положение, перпендикулярное к PM , то или иное произвольное зерно минерала.

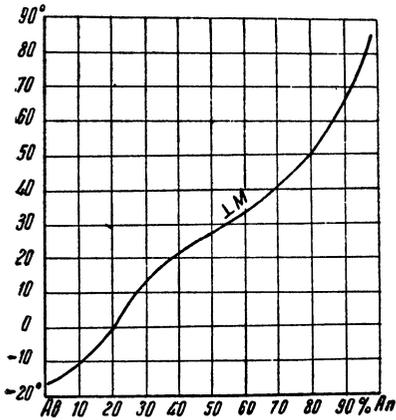


Рис. 115. Максимальные углы погасания в разрезах, перпендикулярных к M (010), в плагиоклазах различного состава

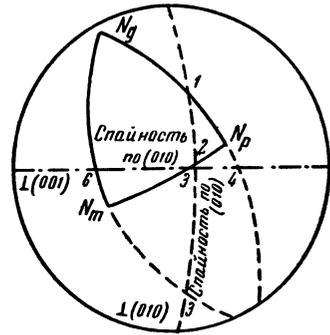


Рис. 116. Графическое определение углов погасания плагиоклаза

Для определения плагиоклазов служат, далее, максимальные значения углов погасания в зоне, перпендикулярной к плоскости M (010). На столике Федорова достаточно привести плоскость M в установочную плоскость, чтобы, вращая затем минерал вокруг оси I и измеряя через известные промежутки углы погасания, найти в каждом частном случае означенное максимальное их значение (рис. 115).

Графическое определение углов погасания. Вместо непосредственного измерения углов погасания в случае плагиоклазов, как и в случае пироксенов, мы можем прибегнуть к графическому их определению. В стереографической проекции (рис. 116) представлены индикатриса и обе спайности некоторого плагиоклаза. Вследствие триклинности минерала пересечение пинакоидальных спайностей не совпадает здесь с осями индикатрисы. Как легко видеть, проекция эта дает углы погасания не только в сечениях, перпендикулярных к биссектрисам, но и в сечении, перпендикулярном к оптической нормали.

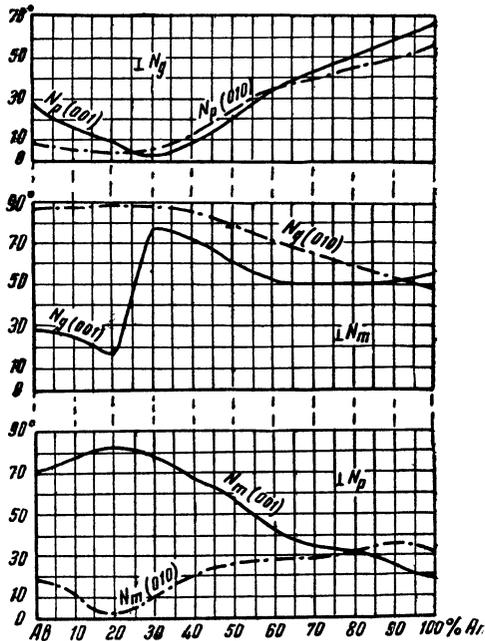


Рис. 117 График для определения номера плагиоклаза по углам погасания в различных разрезах

I. $\perp N_p$, т. е. в плоскости $N_m N_p$, а именно: а) $N_p:(001)$, равной дуге между N_p и 2, и б) $N_p:(010) = N_p - 5$;

II. $\perp N_m$, т. е. в плоскости $N_g N_p$: а) $N_g:(001) = N_g - 1$, и б) $N_g:(010) = N_g - 4$;

III. $\perp N_p$, т. е. в плоскости $N_g N_m$: а) $N_m:(001) = N_m - 3$ и б) $N_m:(010) = N_m - 6$.

Вычислив эти углы, можно определить состав плагиоклаза по диаграммам (рис. 117).

Общая ориентировка спайности по отношению к оптической индикатрисе. Углы погасания относительно следа спайности мы определяем при работе на плоском столике микроскопа. При исследовании по универсальному методу целесообразнее и проще заменять эту константу общей пространственной ориентировкой спайности относительно индикатрисы. Такого рода ориентировку можно получить, измерив на диаграмме типа рис. 116 углы между полюсами плоскостей спайности [$\perp(010)$ и $\perp(001)$] и осями индикатрисы. Для такого измерения полюс и соответственную ось индикатрисы помещают на одну дугу большого круга. Практически достаточно полюс спайности и ось индикатрисы привести на один какой-либо меридиан сетки Вульфа и по этому меридиану отсчитывать угол. Если он при этом окажется больше 90° , то в окончательный результат берется угол, дополнительный до 180° (т. е. он отсчитывается от противоположного полюса).

На рис. 119 изображены кривые изменения ориентировки различных геометрических направлений плаггиоклазов, отнесенных к осям оптической индикатрисы, в зависимости от состава плаггиоклаза (процент Ab и An). В центре поля зрения помещена ось Nm на горизонтальном диаметре Ng , и на вертикальном — ось Np^1 . Каждой точке, полученной по вышеприведенному способу, вообще говоря (так как учесть знаки на столике Федорова не удастся), соответствуют четыре точки, по одной в каждом квадранте. В каждом случае приходится решать, к какой кривой следует относить данную точку.

Кривая 1 (рис. 119) изображает изменения в зависимости от химического состава (процента Ab и An) — означенной ориентировки полюса спайности по P у плаггиоклазов, так что, например, в случае плаггиоклаза № 50 мы имеем:

$$\begin{aligned} \sphericalangle Nm &= 36^\circ \\ \perp P - Ng &= 59^\circ \\ \sphericalangle Np &= 72^\circ \end{aligned}$$

На том же рис. 119 кривая 2 обозначает аналогичные углы полюса спайности по M у плаггиоклазов. В случае лабрадора № 50

$$\begin{aligned} \sphericalangle Ng &= 27^\circ \\ \perp M - Nm &= 66^\circ \\ \sphericalangle Np &= 79^\circ \end{aligned}$$

¹ Иногда вместо полного круга применяется только сектор — его четверть. Так как кривых здесь довольно много, то в некоторых местах такого сектора (около центра, вблизи Ng и т. д.) получается весьма сложное их переплетение. Пользоваться кругом по нашему мнению легче.

² Весьма удобным является предложенный Е. С. Федоровым способ изображения состава плаггиоклаза посредством номеров, соответствующих проценту содержания анортита. Так, указание, что плаггиоклаз относится к № 50, означает, что в его состав входит 50% анортитовой частицы и он, таким образом, относится к ряду лабрадора.

Значение двойниковых элементов для определения ориентировки индикатрисы. В двойниковых образованиях, как известно, мы различаем два специальных геометрических элемента: ось и плоскость. Первый из них, двойниковая ось, является осью симметрии второго порядка для всего двойникового комплекса. Второй элемент, двойниковая плоскость, служит плоскостью его симметрии. Двойниковая ось и двойниковая плоскость для каждого двойникового закона имеют вполне определенное кристаллографическое значение. Подобно тому как в упомянутом случае спайности для оптического определения состава минерала (в особенности плагиоклаза), можно использовать оптическую ориентировку двойниковой оси или, иначе говоря, углы ее с главными осями индикатрисы. В случае плагиоклазов при этом получаются кривые, аналогичные кривым для спайности (рис. 119).

На столике Федорова можно устанавливать и двойниковую ось и двойниковую плоскость.

Двойниковая ось. Ввиду того что двойниковая ось является осью симметрии двойника, она легко узнается под микроскопом. Если совместить двойниковую ось с осью микроскопа, оба индивида двойника при вращении его на столике микроскопа будут вести себя, как один, и кристалл при вращении препарата вокруг оси микроскопа (ось *A*) ведет себя, как один индивид.

Если двойниковая плоскость совмещается с установочной плоскостью микроскопа, перпендикулярной к оси *I*, то оба индивида, расположенные симметрично по ту и другую стороны от этой плоскости, при вращении препарата вокруг оси *I* становятся неразличимы в оптическом отношении. Опять получается как бы один индивид, но при вращении вокруг другой оси — оси *I*, вместо оси микроскопа.

Непосредственная установка двойниковой оси и двойниковой плоскости на микроскопе. Вследствие своей взаимной перпендикулярности двойниковая ось и двойниковая плоскость определяют друг друга. Поэтому можно устанавливать ту или другую в зависимости от их углового расстояния от оси микроскопа.

Обе операции нахождения двойниковой оси и двойниковой плоскости производятся ощупью, путем сопряженных вращений препарата вокруг осей *N* и *H*. Однако установка двойниковой плоскости облегчается тем обстоятельством, что в большинстве случаев эта плоскость совпадает с плоскостью срастания индивидов, так что след ее в виде двойникового шва мы сразу же совмещаем с осью *H*, и дальше установка производится путем вращении препарата только вокруг оси *H*.

Отдавая таким образом известное преимущество установке двойниковой плоскости, мы тем не менее считаем вообще непосредственную установку двойниковых элементов на столике

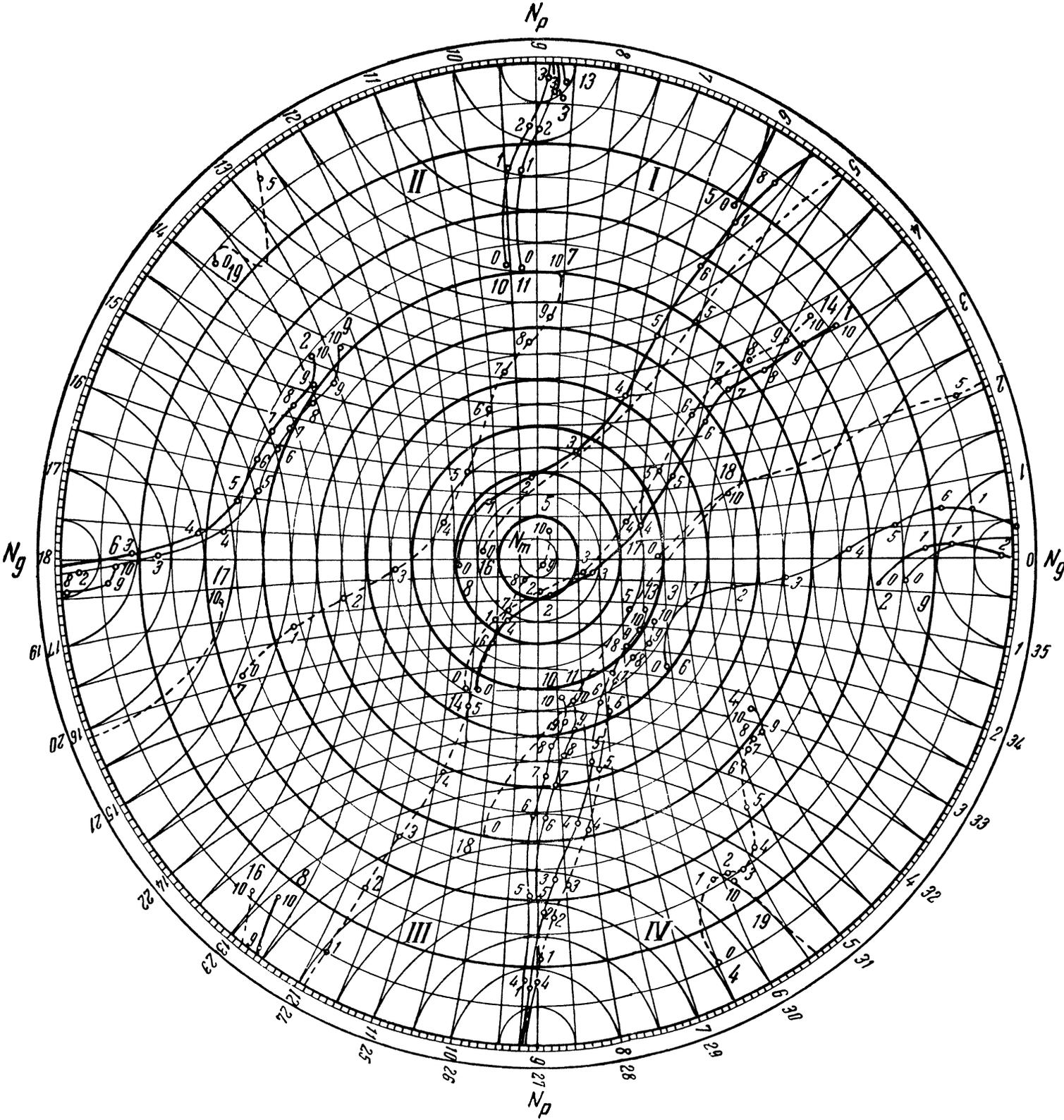


Рис. 119. Положение геометрических элементов полевых шпатов (полюсов плоскостей и двойниковых осей), отнесенное к осям оптической индикатрисы, в зависимости от изменения их состава (цифры на кривых целые — десятки процентов анортита)

недостаточно точной и рекомендуем по возможности всегда прибегать также к графике, которая дает большую точность и большую уверенность в работе. Графически очень удобно находить двойниковую ось кристалла следующим образом.

Графическое определение положения двойниковой оси и двойниковой плоскости. Устанавливаем на столике микроскопа и вычерчиваем на сетке индикатрисы обоих индивидов двойника. Выходы одноименных главных осей индикатрис соединяем дугами больших кругов: Ng' с Ng'' , Nm' с Nm'' , Np' с Np'' . В точке пересечения дуг должен находиться выход двойниковой оси B (рис. 118). Легко видеть, что он должен приходиться ровно посередине отрезков $Ng'Ng''$, $Nm'Nm''$, $Np'Np''$, так как двойниковая ось как L_2 двойника является биссектрисой для любых двух одноименных его направлений, а следовательно, и для одноименных осей, в плоскости, проходящей через эти оси.

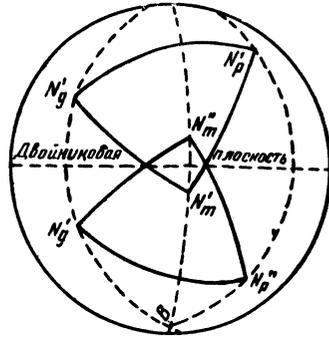


Рис. 118. Графическое нахождение двойниковой оси

Вследствие не вполне точной установки кристалла сплошь и рядом случается, что указанные выше дуги фактически не пересекаются в одной точке, но образуют треугольник, площадь которого тем больше, чем меньше точность работы. Если, однако, не заниматься специальным выравниванием результатов этой последней, то практически за выход двойниковой оси можно принимать центр тяжести полученного треугольника.

Оптическая ориентировка двойниковой оси, как и полюса спайности, изображается формулой:

$$B_{1-2} \begin{array}{l} / Ng \\ - Nm \\ \backslash Np \end{array}$$

Углы BNg , BNm и BNp или измеряют непосредственно на сетке или же, что практичнее, получают путем деления пополам измеряемых на сетке отрезков: $Ng'Ng''$ и т. д.

Задача оптической ориентировки двойниковых элементов решается с тем или иным успехом в зависимости от различных обстоятельств. Наиболее неблагоприятный случай наблюдается тогда, когда две какие-нибудь одноименные главные оси образуют очень малый угол между собой. При недостаточной точности установки направление дуги, проходящей через них, наносится с большой ошибкой, а без этой дуги, как само собой понятно, нельзя фиксировать и выход двойниковой оси.

Определение состава плагиоклаза по ориентировке двойниковых элементов. Из всех пороодообразующих минералов чаще всего сдвойниваются при кристаллизации плагиоклазы. На рис. 119 приведена так называемая двойниковая диаграмма этих минералов, где в координатах Ng, Nm и Np представлены кривые, относящиеся к разным двойниковым законам плагиоклазов. Как и в случае спайности, они изображают изменения в оптической ориентировке двойниковых осей в зависимости от изменения химического состава плагиоклаза (процента Ab и An). На каждой кривой даны точки, соответствующие плагиоклазам, содержащим целые десятки процентов анортита, что обозначено цифрой, стоящей при каждой точке. Рассмотрение диаграммы показывает, что координаты на ней взяты со знаком плюса и минуса. Это относится к такой постановке кристалла, когда при вертикальном положении оси [001] грань (001) располагается вправо и наклонена вперед, к наблюдателю. Необходимо, однако, заметить, что исследование на столике Федорова в громадном большинстве случаев дает не эти знаки, а только абсолютное значение координат двойниковой оси. Поэтому, получив их, мы ищем по ним положение двойниковой оси не в одном, а во всех четырех квадрантах диаграммы.

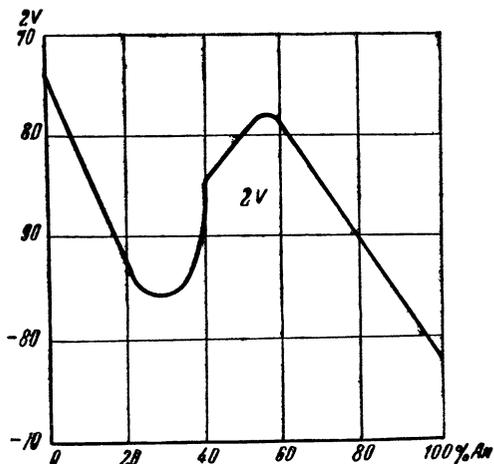


Рис. 120. Изменение угла оптических осей плагиоклазов в зависимости от их состава (процент An)

Естественно, что иногда мы сталкиваемся с тем, что полюс двойниковой оси падает больше, чем на одну кривую. Происходит это от того, что и самая работа на столике не вполне точна, а также от того, что на ее результаты, независимо от этой неточности, влияют примеси к полевому шпату (калий, окись железа и т. д.), искажающие его оптическую ориентировку. Вследствие этих и подобных обстоятельств сплошь и рядом создается такое положение, что найденный нами полюс не ложится в сущности ни на одну кривую, а лишь располагается поблизости, и не от одной, а от нескольких кривых. Вопрос о том, к какой кривой его следует относить, решается тогда на основании разного рода дополнительных данных, например, соотношения двойниковых элементов пла-

гиоклаза с плоскостями спайности по P или по M , других двойникований его, величины $2V$ (рис. 120), светопреломления относительно канадского бальзама и т. д.

Определение закона двойникования. В табл. 6 приведены те двойниковые законы плагиоклазов, к которым относятся кривые рис. 119. Если двойниковая ось ложится только на одну кривую, то, очевидно, двойник построен по тому закону,

Таблица 6
Законы двойникования плагиоклазов

Типы законов	№ закон на рис. 119	Название законов	Двойниковая ось	Плоскость срастания
I	1	Манебахский . .	$\perp (001)$	(001)
	2	Альбитовый . .	$\perp (010)$	(010)
	3	—	$\perp (100)$	(100)
	4	—	$\perp (110)$	(110)
	5	—	$\perp (1\bar{1}0)$	($1\bar{1}0$)
	6	Бавенский . . .	$\perp (021)$	(021)
	7	"	$\perp (0\bar{2}1)$	($0\bar{2}1$)
II	8	Карлсбадский .	[001]	Грань из зоны (010) (100), обычно (010)
	9	Периклиновый .	[010]	Грань из зоны (001) (100)
	10	Де л'Эстерель .	[100]	Грань из зоны (010) (100), обычно (010)
III	11	Скопи	$\perp [010] // (001)$	
	12	—	$\perp [100] // (001)$	
	13	Ля Рок-Турне .	$\perp [001] // (010)$	
	14	—	$\perp [100] // (010)$	
	15	—	$\perp [001] // (100)$	
	16	—	$\perp [010] // (100)$	
IV	17	—	$\angle [010] - [001]$	
	18	—	$\angle [100] - [001]$	
	19	—	$\angle [100] - [010]$	

к которому относится эта кривая. В тех же случаях, когда она не ложится точно на кривую или располагается между несколькими кривыми, необходима дополнительная проверка на основании следующих соображений.

Хотя двойник и представляет собой результат отклонения одной части кристалла (одного индивида двойника) от положения полной параллельности с другой его частью (другим индивидом двойника), но для устойчивости таких образований необходимо, чтобы такой сросток был закономерным, чтобы между обоими индивидами была некоторая общая плоскость, по которой они срстаются, и чтобы сохранялась их параллельность по отношению к некоторым кристаллографически важным элементам — плоскостям и ребрам. Такое положение получается только тогда, когда второй индивид можно вывести из первого в результате обычных симметрических преобразований: отражения в некоторой плоскости (двойниковая плоскость) и поворота вокруг некоторой оси (двойниковая ось). В результате оказываются возможными следующие четыре принципиально различных способа двойникования.

I. Второй индивид поворачивается вокруг оси, перпендикулярной к какой-либо кристаллографически важной плоскости, и срстается с первым по этой плоскости. Получается обратная параллельность по отношению к плоскости. Плоскость срстания перпендикулярна к двойниковой оси и совпадает с двойниковой плоскостью (закон грани).

II. Второй индивид поворачивается вокруг какого-либо ребра и срстается с первым какой-либо гранью, лежащей в зоне этого ребра. Получается прямая параллельность ребра обоих индивидов. Это ребро является двойниковой осью, и оно лежит в плоскости срстания (закон оси).

III. Один из срстающихся индивидов двойника поворачивается вокруг оси, перпендикулярной к какому-либо ребру кристалла и лежащей в кристаллографически важной плоскости. Эта плоскость является плоскостью срстания. Получается, таким образом, обратная параллельность ребра (ребро, перпендикулярное к двойниковой оси, параллельно одноименному в другом индивиде, но направлено в противоположную сторону). Такой двойник легче всего представить при посредстве третьего индивида. Предположим, что первый и второй кристаллы сдвойниковались по закону первого типа, т. е., будучи повернуты по двойниковой оси, перпендикулярной к грани, по которой они срстаются, а второй и третий срслись по закону второго типа, т. е. двойниковой осью является какое-либо ребро, лежащее в плоскости срстания. Если предположить, что второй индивид не попал в поле зрения, а наблюдается только срстание первого и третьего, то третий индивид оказывается повернутым по отношению к первому вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, а такой поворот, как известно из тео-

рии симметрии, может быть заменен одним поворотом вокруг третьей оси, перпендикулярной к первым двум. Получившаяся в результате такой замены двойная ось поворота и будет двойниковой осью „сложного“ двойника индивидов один—три. Естественно, что она будет перпендикулярна к ребру (совпадающему с двойниковой осью двойника индивидов два—три) и будет лежать в плоскости срастания (как перпендикуляр к двойниковой оси двойника индивидов один—два), которая перпендикулярна к этой плоскости.

IV. Двойниковая ось является биссектрисой между двумя ребрами. Такое ее положение, подобно предыдущему случаю, можно рассматривать как результат двух двойниковых поворотов по закону оси. Двойниковая ось и здесь лежит в плоскости срастания.

К первому из четырех намеченных нами типов относятся двойники по законам, значащимся на рис. 119 на кривых 1—7, ко второму—на кривых 8—10, к третьему—на кривых 11—16, к четвертому—на кривых 17—19.

По соотношению между плоскостью срастания и двойниковой осью можно различить тип двойникового закона. Двойниковый шов (плоскость срастания) может быть установлен на столике Федорова с помощью того же приема, что и спайность, но при скрещенных николях, и нанесен на диаграмму. Установка эта, правда, весьма неточная, но для поставленной выше цели достаточно лишь констатировать совпадение или перпендикулярность двойниковой оси и плоскости срастания. При выборе кривой, к которой должна относиться полученная двойниковая ось, следует учитывать относительное расположение плоскости срастания и двойниковой оси. Если констатирована их перпендикулярность, то двойник может относиться только к законам 1—7 (табл. 6), и, наоборот, если ось лежит в плоскости срастания, то именно к этим законам двойник не может относиться.

Для суждения о характере двойникового закона в особенно трудных случаях могут служить косвенные соображения: соотношения двойниковых элементов со спайностью, ограничением и двойниками по другим законам.

Кроме простых и полисинтетических двойников, сложенных по одному и тому же закону, в плагноклазах нередко возникают такие сложные двойниковые комплексы, где двойникование происходит одновременно по нескольким законам. Когда двойниковые оси этих комплексов взаимно перпендикулярны, то естественно, что образуются тройники с B_{1-2} , B_{2-3} , B_{1-3} , так как двойниковые оси являются осями L_2 двойниковых частей комплекса, и, таким образом, в случае их перпендикулярности возможна только комбинация $3L_2$. Тройники со взаимно перпендикулярными осями бывают иногда весьма полезны

для контроля наших определений. Наиболее часто встречающиеся тройники такого рода сложены:

- 1) по законам 2, 10 и 14,
- 2) „ „ 2, 8 и 13,
- 3) „ „ 1, 9 и 11.

Сообразно с частотой двойникового плагиоклазов по тем или иным двойниковым законам соответственные кривые изображаются на диаграмме 1) жирными линиями, 2) простыми сплошными линиями и 3) пунктиром.

Для двойникового по законам 12 и 15 на диаграмме не показаны отдельные кривые. Нетрудно видеть, что они должны почти точно совпадать с кривыми законов 9 и 2.

Работа на пятиосном столике. Конструкция пятиосного столика дает возможность при помощи двух внутренних осей N , H и оси I установить две оси индикатрисы измеряемого кристалла параллельно осям H и I , а третью—привести в совпадение с оптической осью микроскопа. После этого, пользуясь осями K , M и I , можно установить любое другое направление. Отсчеты по трем последним осям дадут углы между осями оптической индикатрисы и установленным позднее направлением.

Специально для изучения полевошпатовых двойников на пятиосном столике А. Н. Заварицким разработан „двойной теодолитный метод“, вкратце заключающийся в следующем. Путем вращения вокруг осей N , H и K исследуемое зерно минерала ориентируют таким образом, что одна из осей индикатрисы совпадает с осью микроскопа, другая — с осью I , а третья — с направлением, перпендикулярным и к оси I и к оси микроскопа. Ориентировка осей индикатрисы и их наименование определяются обычным способом. Затем, путем вращения вокруг осей I и M , индексы которых ранее оставались на нуле, новое направление (спайность, двойниковый шов, грань) совмещают с вертикальной плоскостью, перпендикулярной к оси I . Отсчет по лимбу оси M дает долготу λ (отсчитываемую от оси индикатрисы, совпадающей с осью H), а отсчет по оси I — широту φ (отсчитываемую от оси индикатрисы, совпадающей с осью микроскопа).

Для определения номера и двойникового закона плагиоклаза А. Н. Заварицким был составлен новый график, где кривые рис. 119 даны в координатах широты и долготы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

§ 14. ПОРЯДОК ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПОД МИКРОСКОПОМ

В заключение нашего небольшого курса мы предлагаем некоторые рекомендации для систематического микроскопического изучения кристаллического вещества. В задачу кристаллооптического исследования кристаллов входят: 1) определение природы кристаллов с отнесением их к тому или иному минеральному виду, уже изученному ранее; 2) определение содержания того или иного компонента в твердом растворе; 3) наконец, в очень редких случаях — полное изучение свойств нового, неизвестного ранее минерального вида. Решение всех этих задач сводится к определению оптических констант данных кристаллов.

Выше (в табл. 2) приведены типы констант, характеризующих вещество в зависимости от кристаллизации его в той или иной системе.

Первоначальное исследование кристаллов лучше всего проводить в шлифах. Прежде всего непосредственно по появлению или отсутствию поляризационного эффекта при скрещенных николях отличают вещества изотропные от веществ анизотропных.

Дальнейшее исследование изотропных веществ относится к внешней форме зерен, к характеру спайности (совершенная или несовершенная), к числу направлений ее, к интенсивности и характеру естественной окраски (фиолетовая флюорита, голубая и синяя минералов содалитовой группы) и, наконец, грубо — к светопреломлению минералов по рельефу или по полоске Бекке на границе их с канадским бальзамом или каким-либо другим соседним минералом. Для точного определения констант светопреломления с целью характеристики изотропных минералов, представляющих собой твердые растворы (гранаты,

минералы содалитовой группы, вулканические стекла), служит иммерсионный метод.

В случае минералов анизотропных к качественным признакам минерала, перечисленным выше, присоединяется величина двупреломления, о которой мы судим по интерференционной его окраске.

Если этих признаков оказывается недостаточно для определения минерального вида или если мы хотим глубже ориентироваться в его химизме, то мы переходим к измерению точных констант кристалла. При этом мы решаем с самого начала, имеем ли мы дело с одноосным или двуосным кристаллом. На плоском столике микроскопа среди многих разрезов данного минерала находим разрез, грубо перпендикулярный к оптической оси (самая низкая интерференционная окраска среди всех разрезов этого вещества), и коноскопируем его. В случае кристалла с малым углом оптических осей последний можно определить по формулам Маляра. Измерение угла оптических осей больше 30° проводим на столике Федорова. Минералы же с малым углом оптических осей (меньше 30°) почти не отличаются на федоровском столике от одноосных.

В коноскопе же, в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, или на федоровском столике при помощи компенсатора определяется оптический знак кристалла.

На плоском столике посредством компенсаторов удобно определяется знак удлинения кристалла.

Определение углов погасания на плоском столике целесообразно производить в ориентированных разрезах, перпендикулярных к оптической нормали ($\perp Nm$). Этот разрез узнают по наиболее высокой интерференционной окраске и размытому сходящемуся кресту в коноскопе. Иногда желательно определение углов погасания в разрезах, перпендикулярных к биссектрисам (промежуточная интерференционная окраска и размытый сходящийся крест в коноскопе). В разрезе, перпендикулярном к Nm , определяется cNg моноклинных пироксенов и амфиболов. Определение углов погасания на столике Федорова всегда лучше проводить непосредственно, устанавливая предварительно нужный разрез в плоскость столика микроскопа. Измерение углов погасания на стереографической проекции не очень рекомендуется: неточности установки плоскостей спайности и сечений индикатрисы приводят здесь к таким большим ошибкам, что в результате эта константа часто совершенно искажается.

Определение плагиоклаза (если требуется определить только его номер) хорошо производить в разрезах, перпендикулярных к PM на плоском столике микроскопа. Если в шлифе мало кристаллов, рекомендуется соответственная установка подходящего кристалла на столике Федорова. Для определения номера плагиоклаза на столике Федорова удобно также поль-

зоваться методом максимального погасания в разрезе, перпендикулярном к M (010). Определение плагиоклаза по оптической ориентировке двойниковой оси, как правило, несколько менее точно.

Однако в некоторых случаях необходимо знать точно оптическую ориентировку той или иной грани (например, при изучении существенно калиевых полевых шпатов) или определить закон двойникования. Тогда построение полной двойниковой диаграммы совершенно необходимо.

Определение численной величины двупреломления на плоском столике производится в разрезах, перпендикулярных к оптической нормали (Nm), причем определяется, таким образом, максимальное двупреломление $Ng-Np$. Определение частных двупреломлений $Ng-Nm$ и $Nm-Np$ на плоском столике производится относительно редко: слишком трудно распознать необходимые для этого разрезы ($\perp Np$ или $\perp Ng$). Значительно проще и более точные результаты дает изучение на федоровском столике, причем и толщина шлифа лучше всего определяется здесь по кварцу, по нефелину или подобным минералам.

На плоском столике в разрезах, ориентированных перпендикулярно к оптической нормали и к оптической оси, хорошо распознается характер плеохроизма и абсорбции. В первом разрезе наблюдается окраска кристалла по осям Ng и Np , а во втором — по Nm .

Прекрасным дополнением к приведенным выше константам являются точные величины показателей преломления, которые мы получаем иммерсионным методом. Наиболее удобны для этого ориентированные зерна, извлекаемые из шлифа. В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, определяется Nm , а в разрезе, перпендикулярном к Nm , — Ng и Np . В большинстве случаев, однако, нет необходимости прибегать к определению всех трех показателей преломления двуосного кристалла. Обычно можно ограничиться двумя — Ng и Np , тогда как Nm вычисляется по формулам стр. 76, исходя из этих величин и значений $2V$. Иногда (в особенности в случае слабого двупреломления) можно ограничиться определением только Nm , а Ng и Np рассчитать по двупреломлению и по углу оптических осей.

В случае кристаллов одноосных No можно получить в любом разрезе. Ne , как правило, при иммерсионном его определении оказывается заниженным в случае положительных, и завышенным — в случае отрицательных кристаллов. Параллельное самостоятельное определение двупреломления весьма целесообразно.

Для определения минерального вида обычно достаточно какой-либо одной характерной для него константы, и только

при специальном его изучении (детали состава и т. п.) приходится проводить полное исследование.

Вообще говоря, задачи кристаллооптического изучения веществ весьма разнообразны, и не всегда одно микроскопическое исследование может дать полный ответ на все возникающие вопросы. В ряде случаев приходится прибегать также к другим оптическим методам—методу призмы, рефрактометру и т. д. Наиболее полные результаты получаются тогда, когда методика микроскопических исследований применяется в комплексе с другими способами—химическим анализом, термографией, рентгеновским исследованием и т. д. Все эти методы дополняют друг друга и дают возможность даже в очень трудных случаях точно изучить минералогический состав того или иного вещества, что в свою очередь позволяет рационально использовать знание этого состава для целей и теории (генезис и др.) и практики (в промышленности).

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие к третьему изданию	3
Из предисловия ко второму изданию	3
§ 1. Основные положения учения о свете	5
§ 2. Методы определения показателей преломления	13
§ 3. Прохождение света через кристаллы	21
§ 4. Теория прохождения света через кристаллы	30
§ 5. Поляризационный микроскоп. Методы исследования кристаллов	43
§ 6. Двупреломляющие кристаллы между скрещенными николями микроскопа	48
§ 7. Оптический характер кристаллов. Величина двупреломления	58
§ 8. Изучение кристаллов в сходящемся свете	69
§ 9. Оптические аномалии. Вращение плоскости поляризации	81
Универсальный метод Е. С. Федорова	91
§ 10. Принцип и устройство универсального столика	91
§ 11. Исследование индикатрисы	97
§ 12. Измерение двупреломления	105
§ 13. Индикатриса, спайность и двойники	111
Заключение	123
§ 14. Порядок исследования кристаллов под микроскопом	123

Редактор *В. П. Петров*
Редактор издательства *М. В. Семенова*
Переплет художника *Г. В. Лаврухина*
Технический редактор *М. Е. Кац*
Корректоры *Э. Г. Агеева*
и *А. Г. Покровский*

* * *

Сдано в производство 13/VI-1949 г.
Подписано к печати 27-VII-1949 г.
60×92¹/₁₆ 8 п. л. +3 вкл.
9,1 уч.-изд. л. Тираж 5000 экз.
А-06297 Заказ № 1134
Цена в перепл. 6 р. 25 к.

* * *

1-я тип. Госгеолиздата
2-я Мещанская ул., д. 97