

МВ и ССО РСФСР

ГОРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО

Лаборатория общей физики радиофизического факультета

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ДВОЙНОГО ПРЕЛОМЛЕНИЯ И
ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА НА ПРИБОРЕ НОРРЕНБЕРГА

(описание к лабораторной работе)

Горький - 1984

В В Е Д Е Н И Е

Прибор Норренберга - универсальный учебный поляризационный прибор. Его можно использовать и как полярископ и как поляриметр. Он дает возможность получать поляризованный свет, изменить поляризацию света, анализировать поляризованный свет, наблюдать интерференцию в поляризованном свете и измерять углы поворота плоскости поляризации в оптически активных средах.

Прибор Норренберга состоит из поляризатора, анализатора, трех поворотных столиков, револьверной обоймы для быстрой смены светофильтра и специального осветителя, смонтированного на общем основании с прибором (рис. 1).

Поляризатором служит прозрачное стеклянное зеркало в оправе, допускающей поворот вокруг горизонтальной оси и установку зеркала под углом Брюстера к отраженному вверх или вниз пучку света. Как известно, свет отраженный под углом Брюстера полностью линейнополяризован. Световая трубка осветителя имеет лишь две необходимые степени свободы, а именно: перемещение ее вверх и вниз (по двум вертикальным направлениям) и поворот вокруг горизонтальной оси; этого достаточно для направления светового пучка на поляризующее зеркало под углом Брюстера.

Особенностью прибора Норренберга нашей конструкции является возможность быстрой установки его как по обычной, простой схеме (рис. 2а), так и по схеме "удвоителя Норренберга" (рис. 2б). В удвоителе поляризованный свет проходит через исследуемый образец дважды (вниз и после отражения от вспомогательного горизонтального зеркала вверх, по направлению к глазу наблюдателя). Двойное прохождение света через образец позволяет наблюдать ряд новых интересных явлений.

Верхний столик предназначен для установки и поворота сменных анализаторов, которыми поочередно могут быть поляризационная призма из голландского шпата, пленочный поляризатор в специальной оправе (рис. 5б), черное зеркало (рис. 3а) и стопка стеклянных пластин (рис. 3б).

Исследуемые образцы обычно помещают на среднем столике, а в схеме удвоителя их можно помещать как на среднем, так и на нижнем столике прибора.

Настроенный прибор Норренберга посылает на исследуемый образец линейно-поляризованный свет с колеблющимся вектором \vec{E} , происходящим перпендикулярно плоскости падения в направлении

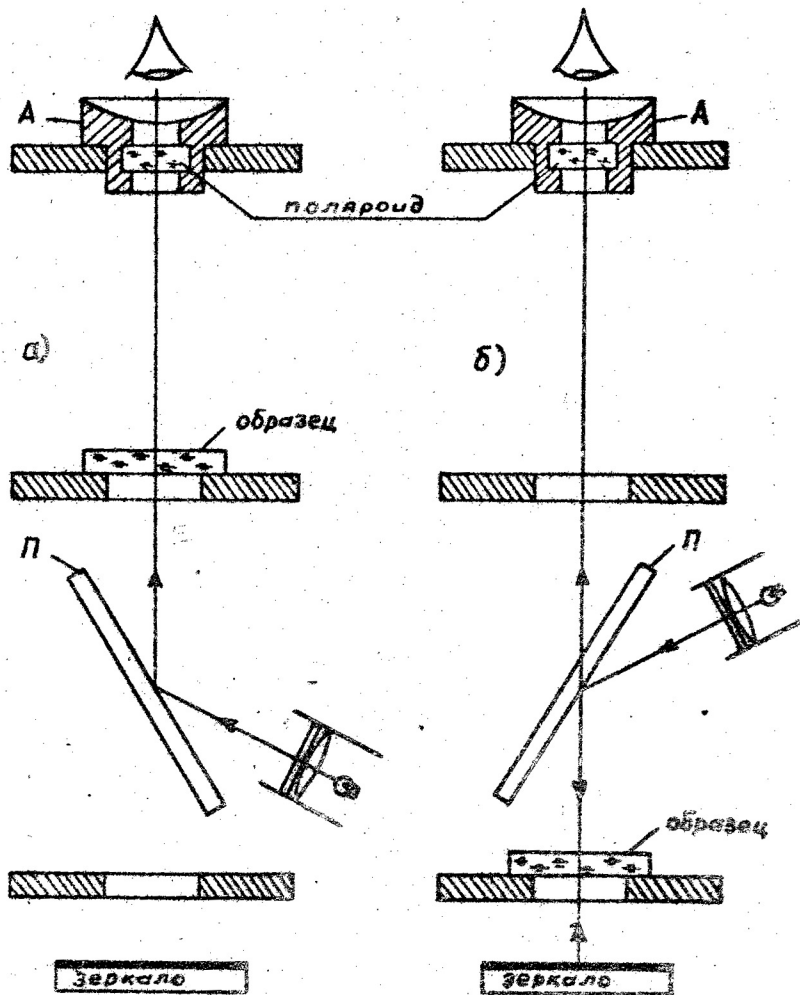


Рис. 2. Ход лучей в общем приборе (а) и в удвоителе (б) Норренберга.

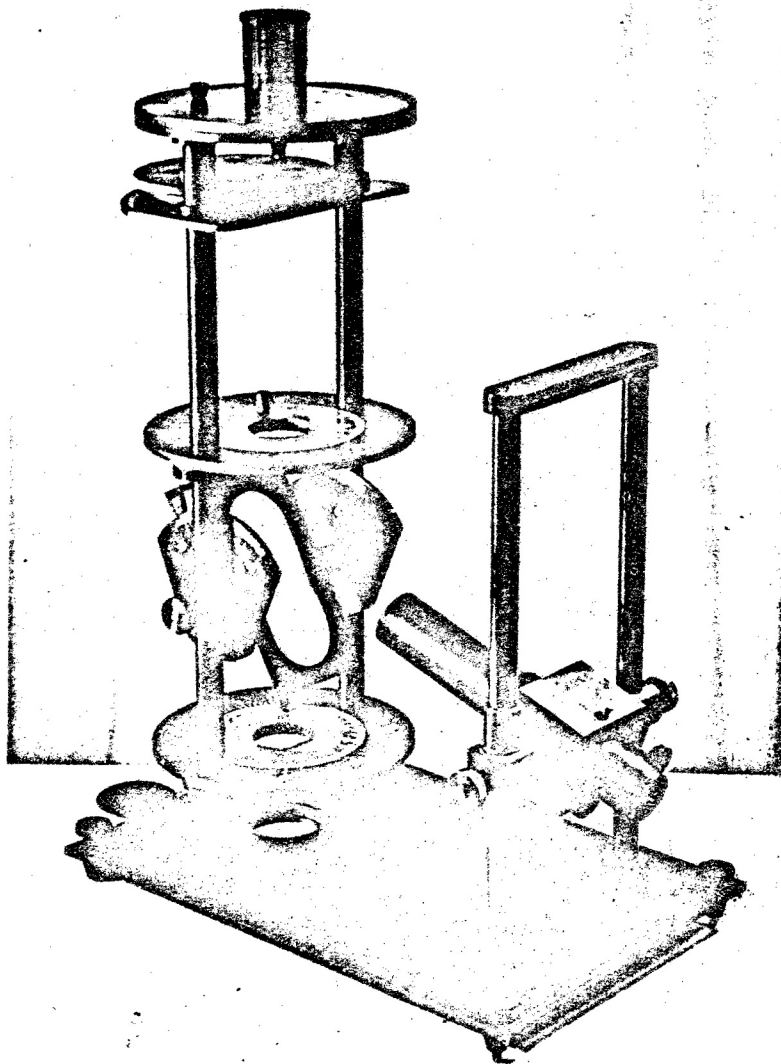


Рис. 1. Прибор Норренберга с осветителем.

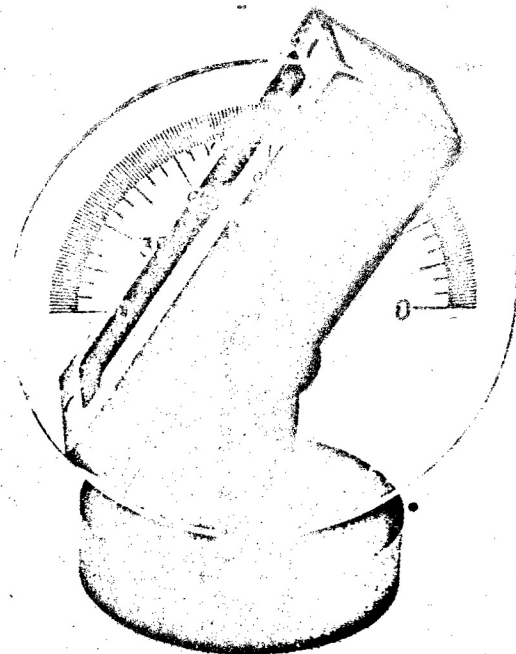
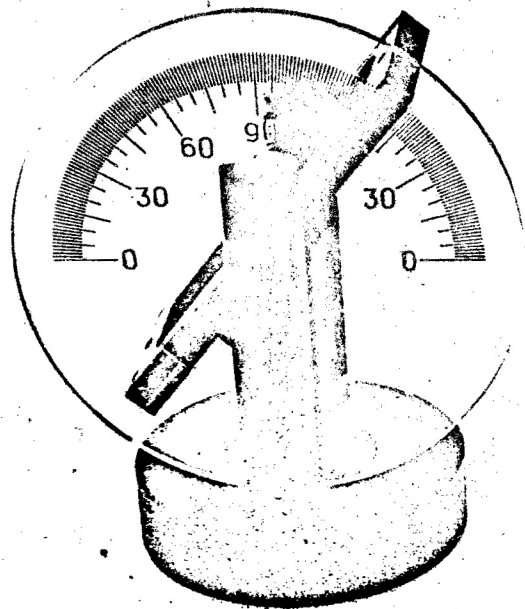


Рис. 3. Черное зеркало (а) и стопа стеклянных пластин

перпендикуляра, соединяющего стойки прибора.

Ч А С Т Ь I

ДВОЙНОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ CaCO_3 . УСТРОЙСТВО ПОЛЯРИЗАТОРОВ ИЗ КРИСТАЛЛОВ КАЛЬЦИТА. ОПЫТЫ ГЮЙГЕНСА.

Двойное преломление открыто в 1669 году датским ученым Эразмом Бартолином в кристаллах кальцита (CaCO_3), привезенных из Исландии. По месту находки кальцит называли исландским шпатом. В 1690 году голландский физик Христиан Гюйгенс открыл поляризацию света при двойном преломлении в кристаллах кальцита.

Природный кальцит легко колется по плоскостям спайности параллельным граням ромбоэдра. Поэтому ему нетрудно придать форму ромбоэдрической призмы или ромбоэдра. Ромбоэдр — это шестигранник, все шесть граней которого одинаковые ромбы. Его можно рассматривать как куб, сжатый вдоль одной из его пространственных диагоналей. Каждая из восьми вершин ромбоэдра есть вершина трехгранного угла, но две из них резко отличны от шести остальных. Две особенные вершины образованы тремя одинаковыми плоскими углами, равными 102° . Каждая из шести остальных вершин образована одним тупым и двумя острыми углами в 76° .

Прямая, соединяющая две особенные вершины, есть короткая пространственная диагональ ромбоэдра и является его геометрической осью симметрии третьего порядка. При вращении ромбоэдра вокруг этой оси он через каждую треть полного оборота приходит в самосовпадение, занимая положение тождественное с исходным.

Направление оптической оси в кристалле CaCO_3 параллельно короткой пространственной диагонали ромбоэдра и образует углы в $63^\circ 45'$ и $45^\circ 22'$ с его ребрами и гранями, соответственно.

Плоскость, проходящую через падающий луч и направление оптической оси в точке падения, называют главной плоскостью или главным сечением двойнопреломляющего кристалла.

Бездефектные кристаллы кальцита до сих пор являются наилучшим материалом для изготовления высококачественных поляризующих свет призм — поляризаторов. Первая поляризующая призма из кальцита была изготовлена в 1828 году шотландским физиком Уильямом Николем. По имени изобретателя ее назвали: "призма

Николя" или кратко "николь". Из-за присущих им недостатков призмы Николя уже давно не изготавливают, но термин "николь" глубоко укоренился в учебной и научной литературе и употребляется как синоним любого типа поляризатора или анализатора. Словом "николь" называют и поляризаторы и анализаторы независимо от их устройства и принципа действия.

Для изготовления призмы Николя сильно удлиненную ромбоэдрическую призму из кальцита разрезают по плоскости, перпендикулярной главному сечению, на две равные части и склеивают их вновь канадским бальзамом. На рис.6 показано главное сечение ABCD призмы Николя. Линия AC - след плоскости распила и склейки. Обыкновенный луч, с колебаниями перпендикулярными главному сечению, испытывает полное отражение на границе с канадским бальзамом и поглощается на зачерненных боковых гранях призмы. Необыкновенный луч, с колебаниями в плоскости главного сечения, проходит через обе половинки призмы и дает линейно поляризованный свет на ее выходе.

Практически все современные поляризационные призмы из кальцита, подобно призме Николя, состоят из двух склеенных половинок, но отличаются от нее в лучшую сторону тем, что плоскости их входного и выходного сечений перпендикулярны продольной оси призмы и оси выходящего из нее поляризованного пучка.

Опыты Гюйгенса по наблюдению двойного преломления и поляризации света в кристаллах кальцита выполняются в нашей лаборатории на специальном полярископе (рис.4) с точечным источником света. Точечным источником служит светодиод АЛ 1028, питаемый от батарейки из двух элементов типа "373". Кристалл кальцита ставится на поворотный столик с центральным отверстием, под которым находится выдвижной пленочный поляроид в оправе и светодиод.

Для наблюдения двойного преломления в естественном (не поляризованном) свете светящуюся точку рассматривают сквозь кристалл через центрированный наглазник (рис.5а) и поляроидный анализатор, располагаемые поочередно в специальном гнезде, на расстоянии наилучшего зрения от кристалла.

Для наблюдения в поляризованном свете в пространство между светодиодом и кристаллом вдвигается пленочный поляроид - поляризатор, а наглазник, в случае необходимости, заменяется поляроидным анализатором в идентичной с наглазником оправе

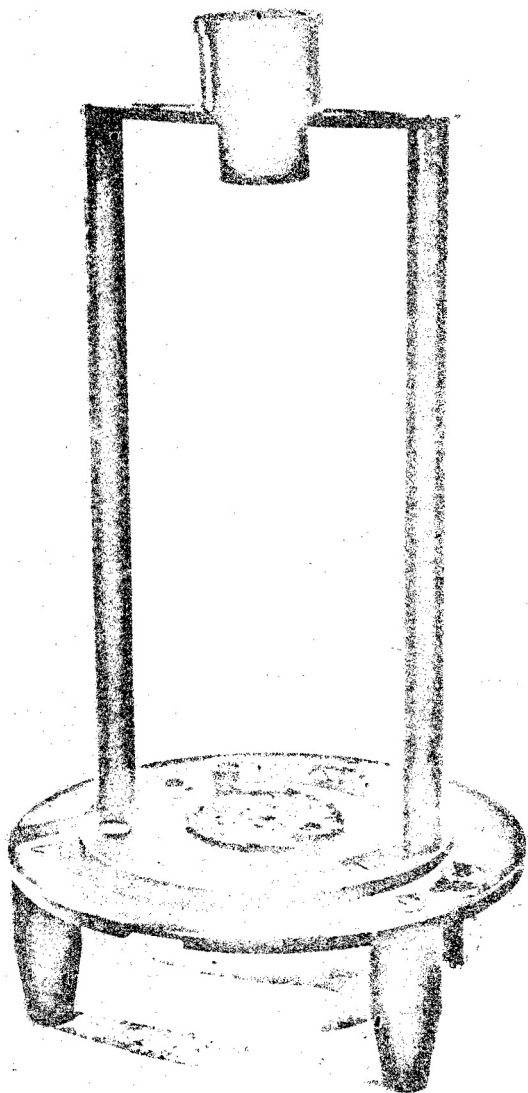


Рис. 4. Полярископ с точечным источником света

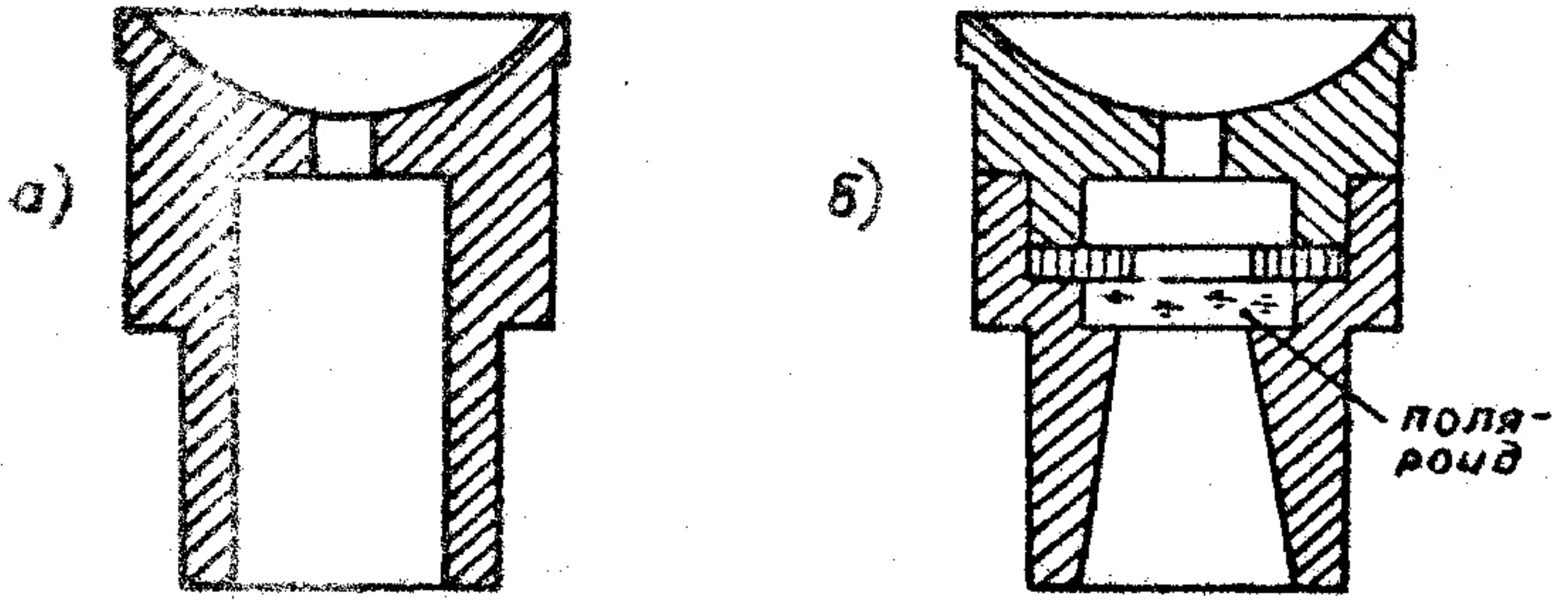


Рис. 5. Наглазник (а) и оправа поляроида (б)

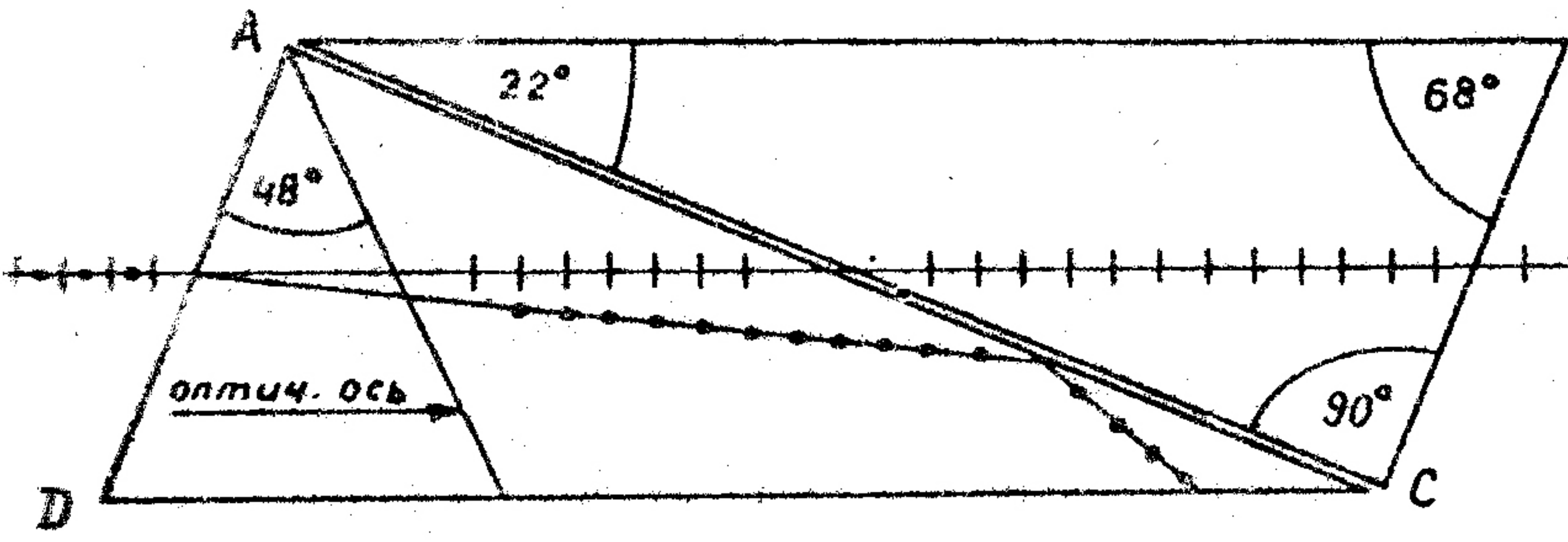


Рис. 6. Ход лучей в призме Николя

(рис. 56).

ЗАДАНИЕ I

I.1. Рассмотрите и зарисуйте модель ромбоэдра исландского шпата. Найдите две особенные вершины ромбоэдра и представьте себе направление оптической оси в кристалле. Начертите главное вертикальное сечение ромбоэдра и укажите направление оптической оси на чертеже (главное вертикальное сечение проходит через короткую пространственную диагональ и наклонное ребро острой вершины ромбоэдра).

Двойное преломление естественного света.

I.2. Поставьте ромбоэдр кальцита на поворотный столик полярископа с точечным источником света и рассмотрите светящуюся точку через наглазник и кристалл. Вы увидите два изображения точки, одно из которых ближе к глазу, чем другое. Вращая поворотный столик, заметьте какая из двух точек остается при этом неподвижной и какая движется вместе с кристаллом. Изображение неподвижной точки создается обыкновенным, а изображение движущейся — необыкновенным лучом.

I.3. В какой плоскости по отношению к кристаллу находится необыкновенная точка? Сохраняет ли эта плоскость свое положение относительно кристалла при его вращении? Зарисуйте результаты своих наблюдений в тетради, последовательно изображая относительное положение обеих точек и отмечая стрелкой след вертикального главного сечения кристалла на горизонтальной плоскости чертежа. Изобразите не менее четырех положений за поворот на 360° .

I.4. Расстояние между необыкновенным и обыкновенным лучом на выходе из кристалла пропорционально толщине кристалла и не зависит от удаления глаза наблюдателя. Это значит, что вне кристалла оба луча идут параллельно друг другу. Зарисуйте наблюдаемый Вами ход лучей в плоскости вертикального главного сечения кристалла. В какую сторону необыкновенный луч отклоняется от обыкновенного? У какого из лучей угол с оптической осью больше? Докажите правильность найденного Вами результата с помощью построения Гюйгенса.

I.5. Используя тот факт, что при наблюдении сквозь кристалл обыкновенное изображение точки ближе к глазу, чем необыкновенное,

Выясните какая волна распространяется в кристалле быстрее; обыкновенная или необыкновенная? Для облегчения ответа на вопрос, рассмотрите светящуюся точку через толстое стекло или вспомните опыт с ошибочной оценкой глубины водоема по наблюдению предметов на его дне сквозь толстый слой чистой воды.

I.6. Вставьте в гнездо вместо наглазника анализатор с известной плоскостью пропускаемых им колебаний и, вращая его, наблюдайте за изменением яркости обеих точек. На какой угол надо повернуть анализатор, чтобы перейти от полного гашения одной точки к полному гашению другой? При каких положениях анализатора яркость обеих точек одинакова? Что можно сказать о поляризации света в обыкновенной и необыкновенной волне на основании этих опытов? Установите, в каких плоскостях по отношению к кристаллу происходят колебания в обыкновенной и необыкновенной волне.

Двойное преломление поляризованного света

I.7. Установите между светодиодом и кристаллом поляризатор с известным направлением пропускаемых им колебаний вектора \vec{E} . Рассматривая светящуюся точку через наглазник и кристалл, вращайте столик с кристаллом и опишите, как при этом изменяются яркости обыкновенной и необыкновенной точек. Какие углы образует след главного вертикального сечения (на горизонтальной плоскости) с направлением вектора \vec{E} в тех положениях кристалла, когда яркости обыкновенной и необыкновенной точек сравниваются или когда они поочередно становятся максимальными?

I.8. Установите столик с кристаллом в положение, при котором яркости обеих точек одинаковы. Замените наглазник анализатором с известным направлением пропускаемых им колебаний вектора \vec{E} . Вращая анализатор, отметьте те его положения, при которых яркости необыкновенной и обыкновенной точек поочередно достигают максимума. На основании сделанных наблюдений сформулируйте вывод о том, в каких плоскостях происходят колебания вектора \vec{E} в необыкновенной и обыкновенной волне. Совпадает ли этот вывод с результатом, полученным в пункте I.6?

ЧАСТЬ II

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН ПРИ ОТРАЖЕНИИ И ПРЕЛОМЛЕНИИ

Энергетический коэффициент отражения плоской световой волны по определению равен

$$\rho = \frac{P_1}{P} = \frac{\overline{E_1^2}}{\overline{E^2}}$$

Здесь P_1 и P , $\overline{E_1^2}$ и $\overline{E^2}$ — потоки энергии и средние по времени квадраты напряженности электрического поля в отраженной и падающей волне (соответственно).

Как следует из формул Френеля [2, с. 474], коэффициент отражения ρ от плоской границы двух диэлектриков I и 2 зависит от направления вектора \vec{E} в падающей волне. Так, если вектор \vec{E} перпендикулярен к плоскости падения ($\vec{E} = E_{\perp}$), то

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\psi - \varphi)}{\sin^2(\psi + \varphi)} \quad (1)$$

Если же вектор \vec{E} параллелен плоскости падения ($\vec{E} = E_{\parallel}$), то

$$\rho_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2(\psi - \varphi)}{\operatorname{tg}^2(\psi + \varphi)} \quad (2)$$

Графики зависимости ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} от угла падения ψ и угла преломления φ (при $n_2/n_1 = n = 1,52$) приведены на рис. 7. Из (1), (2) и рис. 7 видно, что:

1. при любом ψ $\rho_{\perp} > \rho_{\parallel}$
2. при $\psi + \varphi = 90^\circ$ (3) $\rho_{\perp} \neq 0$ при $\rho_{\parallel} = 0$

Это означает, что в отраженном свете всегда преобладает E_{\perp} . При отражении под углом Брюстера, удовлетворяющим условию (3), отраженный свет полностью линейно поляризован ($E_{\perp} \neq 0$, $E_{\parallel} = 0$). При этом преломленный свет оказывается частично поляризованным.

Угол отражения, удовлетворяющий соотношению (3), называется углом полной поляризации или углом Брюстера ψ_B по имени шотландского ученого Давида Брюстера, открывшего в 1812 году полную поляризацию при отражении. Из закона преломления

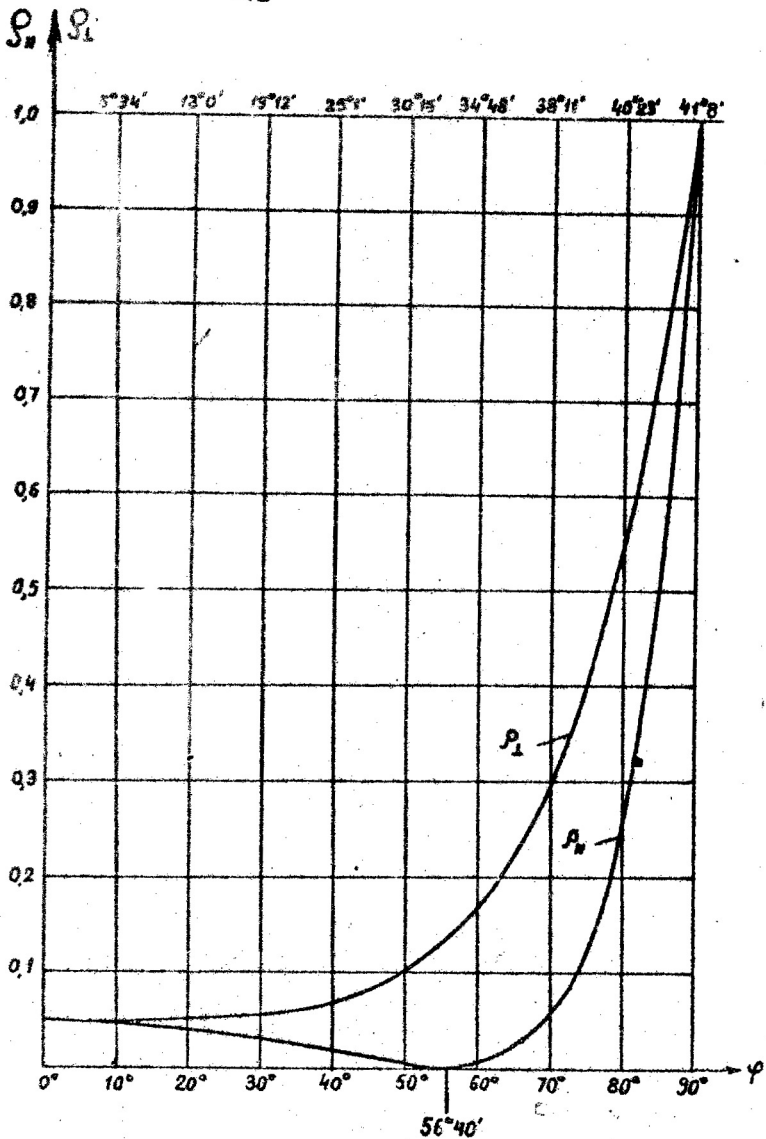


Рис. 7. График зависимости $\rho_1(\varphi)$ и $\rho_n(\varphi)$

$$\frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} = n \quad (4)$$

и условия (3) следует:

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = n \quad (5)$$

В качестве числовой характеристики частично поляризованного света используется понятие степени поляризации. Так, степень поляризации отраженного света по определению равна

$$\Delta = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}} = \frac{E_{\perp}^2 - E_{\parallel}^2}{E_{\perp}^2 + E_{\parallel}^2}$$

Аналогично определяется степень поляризации преломленного света и света, прошедшего через прозрачную плоскопараллельную пластинку.

Прохождение света через пластинку эквивалентно двум последовательным преломлениям на ее первой и второй границе с воздухом. При каждом преломлении степень поляризации возрастает на несколько процентов (порядка 8% при $n = 1,52$). Пропустив свет через стопу из достаточно большого числа ($N \approx 20$) тонких пластинок, можно получить степень поляризации близкую к единице.

Таким образом, прозрачное стеклянное зеркало, зеркало из черного стекла и стопу стеклянных пластинок можно использовать в качестве поляризатора или анализатора.

ЗАДАНИЕ 2

ОПЫТ С ЧЕРНЫМ ЗЕРКАЛОМ И СТОПОЙ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИН

- 2.1. Установите прибор Нюрнберга по простой схеме рис.2а.
- 2.2. Замените стандартный поляриметрический анализатор черным зеркалом. Установите черное зеркало наклонно под углом близким к предпологаемому углу Брюстера. Найдите изображения окна осветителя в черном зеркале. Брауна зеркало вокруг вертикальной оси, найдите то его положение, при котором изображения окна меркнет всего сильнее. Поворотом вокруг горизонтальной оси установите зеркало на максимальное затемнение и отсчитайте по градусной шкале угол Брюстера.
- 2.3. Запишите относительную ориентировку горизонтальных осей вращения поляризующего и черного зеркал при двух по -

положениях черного зеркала с максимальным и минимальным отражением падающего на него снизу линейно поляризованного света.

- 2.4. Замените черное зеркало стопой стеклянных пластин. Ведя наблюдение в проходящем свете, глазом сквозь стопу, проделайте с ней все опыты, описанные в пунктах 2.2 и 2.3 для черного зеркала. Отметьте и зарисуйте относительное расположение поляризующего зеркала и стопки в двух случаях, когда стопа установлена на максимальное затемнение и на максимальную яркость изображения окна осветителя. Сравните действие стопки стеклянных пластин с действием черного зеркала.

Ч А С Т Ь Ш

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧАХ. ФАЗОВЫЕ ПЛАСТИНКИ В $\lambda/2$ И $\lambda/4$ И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ КОЛЕБАНИЙ В КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА. ОПЫТЫ С УДВОИТЕЛЕМ НОРРЕНБЕРГА.

Пусть линейно поляризованный свет, прошедший через узкополосный фильтр Φ и поляризатор Π , падает на двупреломляющую пластинку толщины d нормально к ее большим граням, в положительном направлении оси z (рис.8). Пусть, кроме того, большие грани пластинки параллельны оптической оси x , образующей углы α и β с направлениями колебаний вектора \vec{E} на выходе поляризатора Π и анализатора A , соответственно (рис.8). Электрическое поле \vec{E} в падающем на пластинку параллельном луче можно приближенно описать уравнением плоской бегущей волны

$$\vec{E}(t) = \vec{E} \cos(\omega t - kz).$$

На входной грани $z = 0$ поле $\vec{E} \cos \omega t$ возбуждает в пластинке два взаимно перпендикулярных колебания E_y (обыкновенная волна) и \vec{E}_x (необыкновенная волна) с амплитудами $E \sin \alpha$ и $E \cos \alpha$ и разными скоростями распространения вдоль оси z

$$v_x^{од} = v_o = \frac{c}{n_o} \quad \text{и} \quad v_x^{н10д} = v_e = \frac{c}{n_e}$$

Здесь n_o и n_e — главные показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волны.

На выходе из пластинки получается взаимноперпендикулярные колебания

$$E_y = E \sin \alpha \cos(\omega t - k_y d) \quad \text{и} \quad E_x = E \cos \alpha \cdot \cos(\omega t - k_x d),$$

где

$$k_y = \frac{\omega}{v_o} = \frac{\omega}{c} n_o = k n_o, \quad k_x = \frac{\omega}{v_e} = \frac{\omega}{c} n_e = k n_e$$

Эти колебания сдвинуты по фазе на величину

$$\delta = (k_x - k_y) d = k(n_e - n_o) d = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d, \quad (6)$$

зависящую только от длины волны λ и свойств пластинки.

Разность главных показателей преломления $\Delta n = n_e - n_o$ называют величиной двупреломления или просто "двупреломлением".

На вход анализатора А поступает суперпозиция двух векторных взаимно перпендикулярных колебаний с неравными амплитудами

$E \sin \alpha$ и $E \cos \alpha$ и постоянным сдвигом фаз δ , т.е.

эллиптически поляризованное колебание, которое в специальных случаях может переходить в поляризованное по кругу (при

$d = \pm 45^\circ$ и $\delta = \pm \pi/2$) или в линейно поляризованное (при $\delta = \pm \pi$). При эллиптической поляризации

конец вектора \vec{E} движется (в фиксированной плоскости xy) по эллипсу, ориентация которого зависит от амплитуд $E \sin \alpha$

$E \cos \alpha$ и разности фаз δ . Из-за зависимости $\delta(\lambda)$ положение эллипса поляризации изменяется с изменением длины

волны λ .

Анализатор А, расположенный на расстоянии $z-d$ от пластинки, пропускает в глаз наблюдателя сумму двух параллельных колебаний $E = E \cos \alpha \cos \beta \cos[\omega t - k_x d - k(z-d)] +$

$$+ E \sin \alpha \sin \beta \cos[\omega t - k_y d - k(z-d)]$$

с приобретенным в пластинке сдвигом фаз δ . Тем самым создается возможность наблюдать интерференцию в параллельном поляризованном свете. Для описания интерференционной картины необходимо знать интенсивность света I на выходе анализатора, которая с точностью до постоянного размерного множителя равна квадрату амплитуды E ($I \approx E^2$). Чтобы найти E^2 и получить

для I выражение удобное для интерпретации, - обозначим $E \cos \alpha \cos \beta = a_1$, $E \sin \alpha \sin \beta = a_2$ и воспользуемся известной формулой для квадрата амплитуды суммарного колебания:

$$E^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta = (a_1 + a_2)^2 - 4a_1a_2 \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

После несложных тригонометрических преобразований, получаем

$$I = I \left[\cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (7)$$

Формула (7) описывает все возможные случаи прохождения параллельных линейно поляризованных лучей через пластинку, параллельную оптической оси, и анализатор. Особый интерес представляет случай наблюдения в скрещенных и в параллельных николях.

При скрещенных николях $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$ и

$$I_I = I \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (7a)$$

При параллельных николях $\beta - \alpha = 0$ и

$$I_{II} = I \left(1 - \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (7b)$$

Следовательно

$$I_I + I_{II} = I \quad (8)$$

Соотношения (8) справедливы для каждой спектральной компоненты в случае падающего на устройство белого света (для этого в схеме на рис. 8а и соответственно в установке на рис. 2 надо убрать фильтр Φ). Суммируя равенства (8) для компонент белого света, получим

$$\sum_{\lambda} I_I + \sum_{\lambda} I_{II} = \sum_{\lambda} I, \quad (8a)$$

где $\sum_{\lambda} I$ - интенсивность белого света на входе, $\sum_{\lambda} I_I$ и $\sum_{\lambda} I_{II}$ - интенсивность окрашенного света на выходе при скрещенных и параллельных николях, при этом их цвета являются дополнительными.

Как видно из формулы (7) интенсивность в интерференционной картине зависит от величин δ . Рассматривая двулучевую пластинку через анализатор, глаз будет видеть ее светлой, темной или в разных местах различно окрашенной в зависимости от значения и распределения сдвига фаз δ по

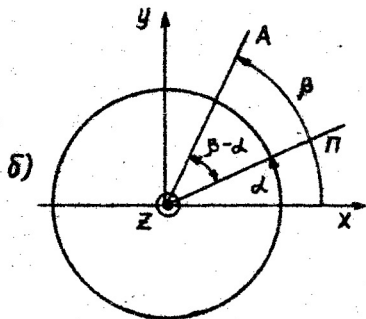
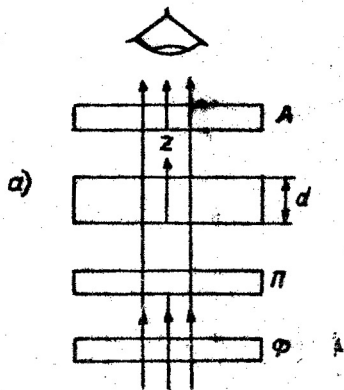


Рис. 8. К выводу формулы (7)

неоднородности пластины. Сам сдвиг фаз δ , как видно из (6), зависит от порядка интерференции $m = \frac{\Delta n d}{\lambda}$. При низких порядках интерференции наблюдается против интерференционные окраски, наличие которых следует из структуры формулы (7), в которой первое слагаемое $\cos^2(\beta - d)$ постоянно для всех цветов, а второе - содержащее множитель $\sin^2 \frac{\delta}{2}$, зависит от λ . Наиболее яркие интерференционные окраски наблюдаются в средних областях, когда $\cos^2(\beta - d) \approx 0$, и амплитуды $E \sin d$ и $E \cos d$ одинаковы. Половина пластины, при котором $E_0 \sin d = E_0 \cos d$ и $d = \pm 45^\circ$ называется "диагональной", она особенно благоприятна для наблюдения интерференционных окраски при освещении белой светом.

Для изучения характера поляризации и анализа поляризованного света применяют базовые пластины в поперечку и в четверть длины волны. Это дубированные пластины, параллельные оптической оси, на которую из которых сдвиг фаз между обыкновенной и необыкновенной волной равен $\pm \pi$ или $\pm \frac{\pi}{2}$, соответственно. Толщина поперечных и четверть-волновых пластинок вычисляется из условия $\Delta n d = \frac{\lambda}{2}$ и $\Delta n d = \frac{\lambda}{4}$. Базовые пластины чаще всего изготавливают из таких прозрачных кристаллов, как кальциевый шпат ($CaCO_3$), кварц (SiO_2) и слюда. В таблице I приведены дубированные этих кристаллов и толщины срезовных из них дубированных пластинок, для желтого света натрия ($\lambda = 5893 \text{ \AA}$).

Четверть-волновые пластины из кварца и слюды очень тонкие из-за малой толщины. Исключением является пластины из висмутсодержащей слюды, которые легко расширяются на очень тонкие листочки, параллельные оптической оси (слюда является дубированными кристаллами).

Т а б л и ц а I

	$\Delta n = n_e - n_o$	$d = \frac{\lambda}{4\Delta n}$ в микронах
CaCO_3	- 0,173	0,85
SiO_2	+ 0,0091	16,2
Слюда	0,004	36,8

х) Существует простой прием, позволяющий изготовить из кварца прочную пластинку в одну четверть волны. Для этого берут две достаточно толстые пластинки, параллельные оптической оси с толщиной d_2 и d_1 , отличающимися на величину $d = \frac{\lambda}{4\Delta n}$ и располагают их одну над другой так, что их оптические оси оказываются взаимно перпендикулярными (рис. 9). При этом волна E_x , являющаяся необыкновенной в I-ой пластинке, становится обыкновенной во 2-й и наоборот. Сдвиг фаз δ между двумя взаимно перпендикулярными колебаниями E_x и E_y на выходе из такой двойной скрещенной пластинки будет равен

$$\delta = [\omega t - k_x d_1 - k_y d_2] - [\omega t - k_y d_1 - k_x d_2] = (k_x - k_y)(d_2 - d_1)$$

или

$$\delta = k(n_e - n_o)(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n (d_2 - d_1) \quad (9)$$

Если $d_2 - d_1 = \frac{\lambda}{4\Delta n}$, то $\delta = \frac{\pi}{2}$

Легко видеть, что если сделать скрещенные пластинки слабо клиновидными так, чтобы толщина одной убывала, а другой росла с ростом координаты x по линейному закону (при $d_1 + d_2 =$

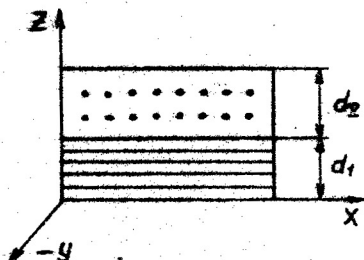


Рис. 9. К выводу формулы (9)

= const), то мы получим двойной кварцевый клин, на выходе из которого малая разность фаз δ будет линейной функцией координаты x . Такой двойной кварцевый клин является обязательной принадлежностью поляризационного микроскопа и получил название компенсатора Бабине. Он служит для получения, компенсации и измерения малых сдвигов фаз или малых оптических разностей хода, не превышающих нескольких длин волн и возникающих в двуупреломляющих кристаллических пластинках. Если поместить такой клин в диагональное положение между скрещенными николами, то, при освещении белым светом на его поверхности будет видна характерная картина цветных интерференционных полос, параллельных ребру клина.

В набор образцов, предлагаемых для исследования, могут входить пластинки из слюды; пластинки из кварца, параллельные и перпендикулярные оптической оси; кварцевый кубик, две грани которого перпендикулярны, а четыре — параллельны оптической оси; фазовые пластины "в $\lambda/4$ " и "в $\lambda/2$ "; кварцевый клин и

бикварц (см. ниже, стр. 22)

При работе с образцами из кварца следует иметь в виду, что кварц, наряду с двойным преломлением, обладает ещё одним удивительным свойством совсем иной природы, а именно — способностью вращать плоскость колебаний линейно поляризованного света. Эта способность называется оптической активностью и обусловлена особым, винтовым расположением молекул SiO_2 в кристаллической решетке кварца. Вращение плоскости колебаний наиболее сильно выражено именно тогда, когда двойное преломление отсутствует, т.е. при распространении света в кристалле по направлению оптической оси.

В природе встречаются две модификации кристаллов кварца — правая и левая. В правых и левых кристаллах плоскости колебаний поворачиваются в противоположных направлениях. Если для наблюдателя, смотрящего навстречу световому лучу, плоскость колебаний на выходе из кварца повернута по часовой стрелке, то такой кварц называется правовращающим или правым. Для того, чтобы избежать неоднозначности при экспериментальном определении направления вращения в кварце, толщина исследуемого образца должна быть достаточно мала (не более одного миллиметра).

Угол поворота плоскости колебаний в кварце пропорционален толщине образца d и равен $\alpha = \alpha_1 \cdot d$, где α_1 — удельное вращение, измеряемое в град/мм. Величина α_1 сильно зависит от длины волны и быстро увеличивается при переходе от красного света к фиолетовому. Зависимость $\alpha_1(\lambda)$ называется дисперсией вращения плоскости колебаний или дисперсией оптической активности.

Если на вход кварцевой пластинки поступает линейно поляризованный белый свет, то на её выходе плоскости колебаний раз-

линых спектральных компонент поля $\vec{E}(A)$ развернуты в "цветовой восток", от красного цвета к фиолетовому.

Б И К В А Р Ц

Бикварц состоит из двух одинаковых полукруглых пластинок из левого и правого кварца, склеенных по диаметральному сечению. Толщина обеих половинок одинакова и равна 3,75 мм. При такой толщине плоскости колебаний фиолетового света на выходе из бикварца повернуты в противоположных направлениях на 180° , а плоскости колебаний наиболее яркий в спектре зеленовато-желтых лучей - на 90° . Поэтому, в параллельных николях зеленовато-желтый свет будет полностью погашен, а фиолетовый - полностью пропущен, и при точной установке николей обе половинки бикварца будут окрашены в характерный серовато-фиолетовый оттенок.

При скрещенных николях окраска изменится на дополнительный зеленовато-желтого оттенка. Малейшее отклонение одного из николей от параллельной или скрещенной установки вызывает резкое различие в окраске обеих половинок бикварца. Поэтому бикварц позволяет установить николи в параллельное или скрещенное положение с более высокой точностью, чем при обычной установке их на темноту.

З А Д А Н И Е 3

Получение линейно, эллиптического и циркулярно поляризованного света. Опыт с образцами, вырезанными параллельно оптической осью, и пластинками в $\lambda/4$ и $\lambda/2$.

а) Наблюдение в белом свете

3.1. Используя формулу (7а), выясните, как будет меняться

интенсивность I_{\perp} при изменении α от 0° до 360° .

Помещая образцы между скрещенными николями на среднем столике и вращая их вокруг вертикальной оси, убедитесь на опыте в том, что гашение поля зрения наблюдается 4 раза за оборот, через каждые 90° , со всеми образцами, параллельными оптической оси, независимо от их толщины (в том числе и с кварцевым кубиком). Как поляризован свет на выходе из образца в положениях максимального затемнения и в положениях, промежуточных между ними? Как расположены главные сечения образцов в положениях максимального затемнения?

3.2. Установите тонкую слюдяную пластинку в диагональное положение между скрещенными николями. Проследите за изменением интерференционной окраски при переходе от скрещенных николей к параллельным. Объясните смену окрасок при вращении пластинки между скрещенными николями и при вращении анализатора и диагональном положении пластинки. Наблюдаются ли интерференционные окраски, если заменить тонкую пластинку толстой или кварцевым кубиком?

б) Наблюдения с узкополосным фильтром

3.3. Используя формулу (7), найдите, будет ли изменяться интенсивность на выходе анализатора при его вращении, если пластинку в $\lambda/4$ установить в диагональное положение. Из имеющихся пластинок выявите опытным путем пластинку в $\lambda/4$ для рекомендованного Вам интерференционного светофильтра ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$ или $\lambda = 5893 \text{ \AA}$) и получите с её помощью циркулярно поляризованный свет.

3.4. С помощью формул (7а) и (7б) выясните, какова будет интенсивность на выходе из анализатора, если пластинку в $\lambda/2$

установить в диагональное положение между скрещенными и между параллельными николями. Как при этом изменяется поляризация света на выходе из пластинки по сравнению с поляризацией на ее входе?

При наличии в комплекте образцов пластинки в $\lambda/2$ проверьте сделанные Вами теоретические выводы на опыте.

ЗАДАНИЕ 4

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КРИСТАЛЛАХ КВАРЦА

4.1. Опытным путем выявите кварцевые пластинки, перпендикулярные оптической оси.

4.2. Используя тонкую кварцевую пластинку (не толще 1 мм) и узкополосные фильтры с известными длинами пропускаемых ими волн, найдите направление вращения плоскости колебаний.

4.3. Пронаблюдайте вращение плоскости колебаний кварцевым кубиком. Объясните, почему в этом случае поворотом анализатора не удастся восстановить затемнение поля зрения.

4.4. Используя бикварц и красный светофильтр, убедитесь в том, что половинки бикварца поворачивают плоскость колебаний в противоположных направлениях.

ЗАДАНИЕ 5

ОПЫТЫ С УДВОИТЕЛЕМ НОРРЕНБЕРГА

5.1. Установите прибор по схеме рис. 2 б.

5.2. Определите, как поляризован свет после двукратного прохождения через образец в случаях, когда

а) свет идет вдоль оптической оси кубика или пластинки из кварца;

б) свет идет через пластинку в $\lambda/4$, установленную в диагональное положение.

5.3 х) Сравните интерференционные картины, наблюдаемые в кварцевом клине при помещении его в диагональное положение на среднем и на нижнем столике удвоителя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой свет называется естественным, линейно -, циркулярно -, эллиптически - и частично поляризованным?
2. Как поляризован свет после отражения и преломления на плоской границе двух прозрачных диэлектриков ?
3. Исходя из представления о том, что под действием преломленного света электроны в молекулах диэлектрика совершают вынужденные колебания и ведут себя как элементарные электрические вибраторы (колеблющиеся диполи), дайте наглядное объяснение закону Брюстера.
4. Как отличить циркулярно поляризованный свет от естественного ?
5. Как отличить свет, поляризованный по правому кругу, от света, поляризованного по левому ?
6. Как можно получить свет, поляризованный по правому или левому кругу ?
7. Пренебрегая зависимостью двупреломления от длины волны и приняв для кварца $\Delta n = n_e - n_o = 9 \cdot 10^{-3} = \text{const}$, найти совокупности длин волн, для которых параллельная оптической оси кварцевая пластинка толщиной $d = 0,2$ мм является пластинкой в нечетное число четвертей λ и в нечетное число полуволн. По результатам расчета сформулируйте требования к полосе пропускания светофильтра, с которым данная пластинка вела

бы себя как пластинка в $\lambda/4$ (или в $\lambda/2$).

8. Почему тонкая двоякопреломляющая пластинка, помещенная между двумя николями, имеет цветную окраску ?

9. Кварцевая пластинка толщиной в 1 мм, перпендикулярная оптической оси, помещена между скрещенными николями. Почему она остается освещенной при любой длине волны падающего света?

10. Почему перпендикулярная оптической оси и помещенная между николями кварцевая пластинка меняет свою окраску при вращении анализатора.

11. Как отличить кварцевые пластинки, перпендикулярные оптической оси и параллельные ей, освещая прибор Норренберга белым светом ?

12. Как надо выбрать толщину кварцевой пластинки, перпендикулярной к оптической оси, чтобы при экспериментальном определении направления вращения плоскости поляризации в ней можно было избежать неоднозначности ?

Части описания и задания, отмеченные знаком x), являются дополнительными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. Наука, М. 1980, §§76-79.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. ГИИТЛ, М., 1957, гл.ХУ.Естественный и поляризованный свет. Гл. ХУІ.Поляризация при двойном лучепреломлении. Гл.ХУП.Интерференция поляризованных лучей. Гл.ХХІХ.Вращение плоскости поляризации.
3. Дитцберн Р. Физическая оптика. Наука, М. 1965, гл.ХП.Поляризованный свет.

Подп.к печ.16.10.84г.Форм.бум.60х90 1/16.Бумага писчая
Печать офсетная.Усл.печ.1,7 л.Уч.изд.1,3 л.Заказ №452.
Тираж 300 экз.Бесплатно.

Лаборат.многоэт.техники ГСУ им. Н.А. ЛОБАЧЕВСКОГО,
г. Горький, пр.Тарарина - 23.