

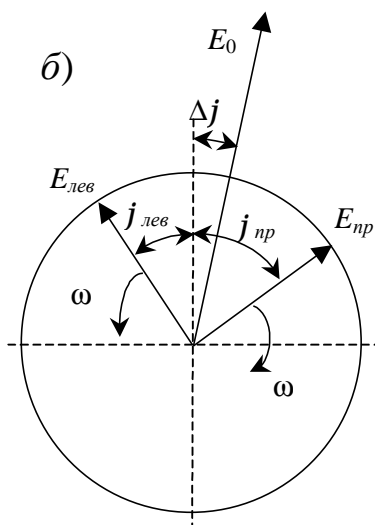


Лабораторный практикум
по **ФИЗИКЕ**

ОПТИКА

Задача № 147

Изучение явления естественного вращения
плоскости поляризации света



МОСКВА 2010

Изучение явления естественного вращения плоскости поляризации света

Цель работы. Измерение удельного вращения плоскости поляризации света оптически активными веществами (кварц, раствор сахара) в зависимости от толщины, концентрации раствора и длины волны излучения.

Идея эксперимента. Пластины (кювету) оптически активного вещества помещают между скрещенными поляризатором и анализатором. Поворот плоскости поляризации, возникший после прохождения пластины, компенсируют поворотом анализатора. В качестве источников света используются натриевая лампа и светодиоды с различными длинами волн.

I. Теория

Вещества, способные вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через них света, называют *оптически активными*. Впервые подобное поведение было обнаружено Д.Ф.Араго в 1811 году в кварце. Оптически активные вещества подразделяют на два типа. Первый тип веществ активен только в кристаллической фазе (кварц, киноварь), второй — в любом агрегатном состоянии (сахара, камфора, винная кислота). Для первого типа оптическая активность связана со специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла, для второго — с асимметричным строением их молекул.

Типичным представителем первой группы являются кристаллы природного кварца - минерала двуокиси кремния SiO_2 . Его кристаллическая структура построена из кремне-кислородных тетраэдров (рис. 1), расположенных винтообразно (с правым или левым ходом винта) по отношению к оптической оси кристалла. Решётка правого кристалла зеркально-симметрична решётке левого и не может быть пространственно совмещена с ней. Такие формы кристаллов называют оптическими антиподами. При пропускании линейно поляризованного излучения вдоль оптической оси левые кристаллы кварца вращают плоскость поляризации против часовой стрелки, а правые — по часовой стрелке (если смотреть навстречу ходу лучей).

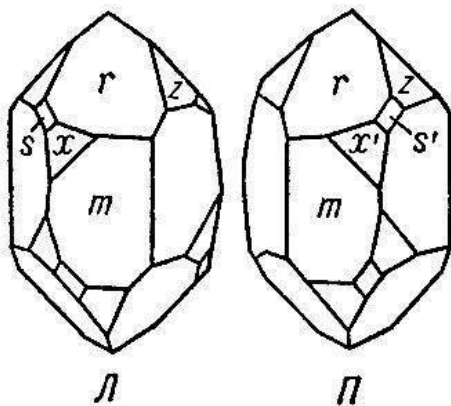


Рис. 1. Кристаллическая структура левого и правого кристаллов кварца.

При плавлении кварца (температура плавления 1710 °С) получают кварцевое стекло, или плавленый кварц, широко применяемый в промышленном производстве. Однако в отличие от природных кристаллов плавленый кварц не является оптически активным.

У соединений второй группы оптическая активность обусловлена диссимметрическим строением самих молекул, при котором зеркальное отображение молекулы никакими вращениями и перемещениями не может быть наложено на оригинал. Такой вид диссимметрии называют хиральностью, при этом хиральные объекты (оптические изомеры) относятся друг к другу как левый и правый винт. Эксперименты показывают, что раствор природного сахара (сахарозы $C_6H_{12}O_{11}$) вращает плоскость поляризации только по часовой стрелке, в то время как глюкоза и фруктоза – против часовой.¹

Феноменологическая теория, объясняющая явление оптической активности, была предложена в 1823 году О.Ж. Френелем. Он предположил, что в таких веществах различны показатели преломления $n_{пр}$ и $n_{лев}$ для право- и левополяризованных по кругу волн. Известно, что любую линейно поляризованную волну можно представить как результат сложения двух волн, распространяющихся в одном направлении, но поляризованных по кругу с противоположными направлениями вращения (подробнее см. в Приложении). Если такие две волны распространяются в веществе с различными скоростями, то возникает поворот плоскости поляризации результирующей волны.

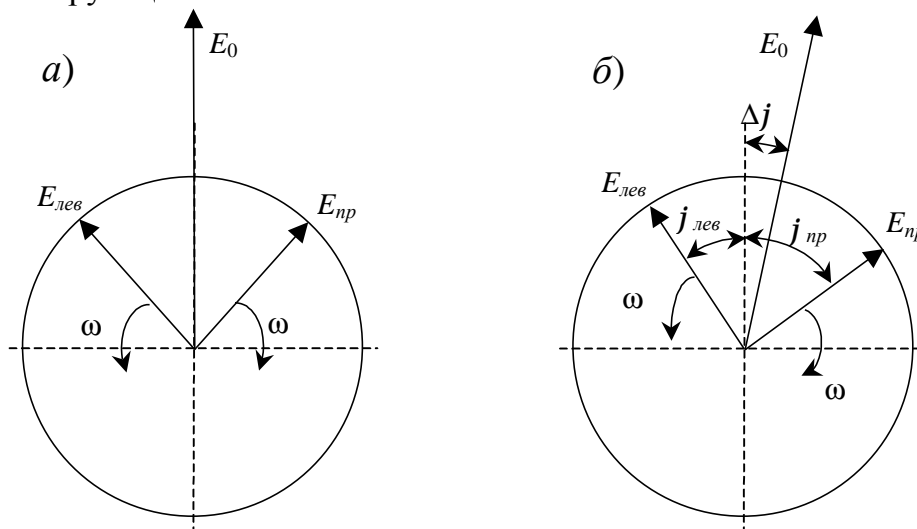


Рис. 2. Представление линейно поляризованной волны как суммы двух волн с круговой поляризацией: а) до прохождения пластины; б) после прохождения пластины.

На рис. 2а исходная волна с амплитудой E_0 , поляризованная вдоль вертикальной оси, представлена как сумма двух поляризованных по кругу

¹ Сейчас известно, что все белки на нашей планете построены только из левовращающих аминокислот, а нуклеиновые кислоты - из правовращающих сахаров; это свойство считается одной из фундаментальнейших характеристик живого.

волн с одинаковыми амплитудами $E_{np} = E_{лев} = \frac{E_0}{2}$. При этом векторы E_{np} и $E_{лев}$ вращаются с угловой скоростью ω (равной частоте световой волны) в противоположных направлениях, в результате суммарный вектор всегда остается направленным вдоль вертикали (по биссектрисе угла между E_{np} и $E_{лев}$). В оптически активном веществе скорости распространения v_{np} право- и $v_{лев}$ лево- циркулярно поляризованных волн различны, как следствие, различны и показатели преломления $n_{np} = \frac{c}{v_{np}}$ и $n_{лев} = \frac{c}{v_{лев}}$ (c - скорость

света в вакууме). В результате после прохождения через пластину оптически активного вещества толщиной d для каждой из волн возникнут дополнительные набег фазы, равные (рис. 2б)

$$j_{np} = \frac{2p}{l} \cdot d \cdot (n_{np} - 1) \text{ и } j_{лев} = -\frac{2p}{l} \cdot d \cdot (n_{лев} - 1)$$

соответственно (знак «-» учитывает различие в направлении вращения). В результате плоскость поляризации на выходе из пластины повернется на угол

$$\Delta j = \frac{j_{np} + j_{лев}}{2} = \frac{p}{l} \cdot d \cdot (n_{np} - n_{лев}). \quad (1)$$

Хотя разность показателей преломления $(n_{np} - n_{лев})$ может быть довольно малой величиной, поворот плоскости поляризации растет линейно с ростом толщины пластины d и может достигать заметных значений.

Для кристаллических веществ формулу (1) принято записывать в виде

$$j = \frac{180}{p} \cdot \Delta j = a \cdot d, \quad (2)$$

где a – удельное вращение, измеряемое в град/мм, толщина d измеряется в миллиметрах, угол вращения j – в градусах.

Для оптической активности характерна значительная дисперсия. Еще в начале 19-го века Био установил, что вдали от резонансного поглощения удельное вращение обратно пропорционально квадрату длины волны $a \sim \frac{1}{l^2}$.

Современные теории оптической активности качественно правильно описывают это явление, однако количественная теория дисперсии сталкивается со значительными трудностями в связи со сложностью изучаемых объектов.

Отметим, что при изменении направления прохождения волны через кристаллическую пластину изменяется и направление вращения плоскости поляризации. Если на выходе из пластины установить идеальное зеркало, то отраженная волна после повторного прохождения пластины будет иметь то же состояние поляризации, что и исходная волна.

Для растворов оптически активных веществ вращение плоскости поляризации зависит не только от толщины слоя, но и от концентрации вещества:

$$j = [a] \cdot c \cdot d, \quad (3)$$

где c – концентрация вещества, измеряемая в г/см^3 (равна массе вещества в единице объема раствора), толщина d измеряется в дециметрах, угол вращения j – в градусах. Для растворов удельное вращение принято обозначать $[a]$, и измерять в $\frac{\text{град} \cdot \text{см}^3}{\text{дм} \cdot \text{г}}$.

Часто в качестве характеристики раствора используют понятие массовой доли, равной отношению массы вещества к массе раствора. Массовую долю p измеряют в процентах и иногда также называют концентрацией. Связь между величинами c и p выражается формулой:

$$c = \frac{r \cdot p}{100}, \quad (4)$$

где r – плотность раствора, измеряемая в г/см^3 . Плотность раствора зависит от массовой доли (концентрации) p и температуры раствора. Таблица данных для плотности r представлена на установке.

II. Эксперимент

Описание прибора для измерений.

Простейший прибор для поляризационных измерений состоит из двух основных элементов: поляризатора **П** и анализатора **А**, между которыми находится ячейка **Я**, в которую может быть помещен исследуемый объект (рис. 3). Первоначально **П** и **А** устанавливают так, чтобы в отсутствие объекта излучение от источника света **ИС** не проходило через прибор, т.е. поляризатор и анализатор *скрещены* (для наблюдателя поле наблюдения затемнено). После помещения между **П** и **А** образца оптически активного вещества часть излучения начинает проходить через систему. Для полного гашения анализатор следует повернуть на угол j , равный углу поворота плоскости поляризации при прохождении через образец.

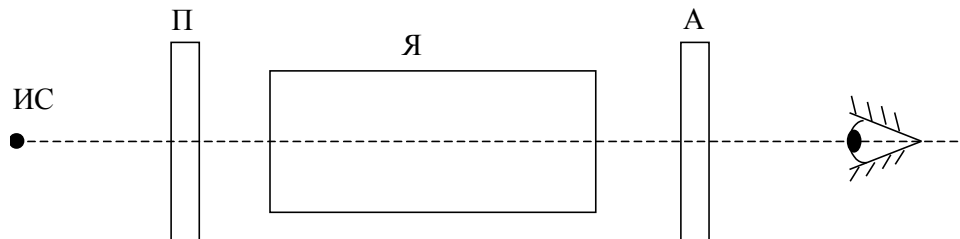


Рис. 3. Схема простейшего поляризационного прибора.

Однако глаз наблюдателя не может точно отметить положение, когда анализатор установлен на полное затемнение поля зрения, поэтому данный способ установки не является достаточно точным. Для повышения точности измерений применяют *полутеневые поляриметры*, устанавливаемые не на полную темноту, а на равномерное освещение двух половин поля зрения. Современные поляриметры позволяют измерить поворот плоскости поляризации с точностью до 0,01 градуса.

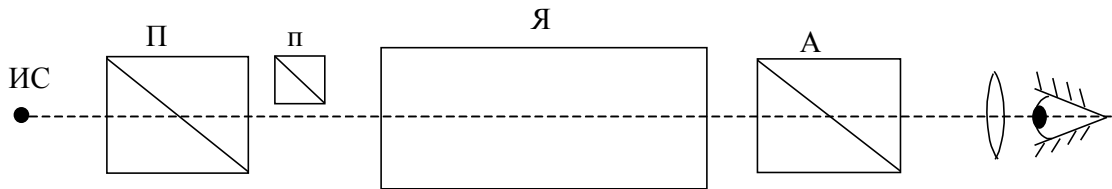


Рис. 4. Схема полутеневого поляриметра.

Схема полутеневого прибора приведена на рис.4. Поляризатор состоит из двух поляризационных призм: большой **П** и помещенной за ней малой **п**. В качестве поляризаторов и анализатора обычно используются призмы Николя². Часть света от источника проходит только через **П**, а часть – последовательно через **П** и **п**. Так как между плоскостями пропускания большого и малого поляризаторов есть небольшой угол b , то в результате поле зрения разделяется на две части, освещенность которых зависит от ориентации анализатора **А**.

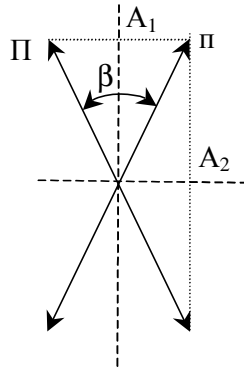


Рис. 5. Установка анализатора на равномерное освещение.

Анализатор следует устанавливать в положение, когда поле зрения будет полностью равномерно освещено в обеих частях. Это означает, что проекции амплитуд волн, поляризованных вдоль направлений **П** и **п**, на направление пропускания анализатора **А** одинаковы. Из рис. 5 видно, что существует два положения анализатора, при которых это условие выполнено: по биссектрисе угла b (положение A_1) и по биссектрисе угла $(p - b)$ (положение A_2). В случае A_2 освещенность поля будет слабее, именно такое положение анализатора повышает точность измерений благодаря физиологическим особенностям глаза, более чувствительного к изменениям малых освещенностей. Можно показать, что точность установки анализатора тем больше, чем меньше угол b между плоскостями пропускания поляризаторов **П** и **п**. Однако надо иметь в виду, что освещенность поля ослабевает с уменьшением b , поэтому обычно используют мощные источники света. В современных приборах предусмотрена возможность регулировки угла b .

Анализатор устанавливают на равномерное освещение поля сначала в отсутствии оптически активного вещества, а затем – после помещения этого

² Иногда вместо малого поляризатора **п** используют небольшой кристалл кварца, поворачивающий плоскость поляризации на малый угол b

вещества в ячейку **Я**. При этом угол поворота анализатора равен углу поворота плоскости поляризации.

В настоящей задаче используются поляриметры различной конструкции, но в каждом из них анализатор, находящийся в передней части прибора, можно поворачивать на произвольный угол при помощи специальной рукоятки. Отсчеты углов производятся при наблюдении в лупы по двум нониусам, находящимся на концах одного из диаметров круга с делениями, связанного с анализатором, и дающим точность до сотых долей градуса. Для получения четкого изображения предусмотрен механизм фокусировки. Находящаяся между поляризатором и анализатором сахариметрическая трубка помещается в особой камере. Угол β между плоскостями пропускания призм **П** и **п** зафиксирован и не может быть изменен.

В качестве источника света при работе с поляриметром используется натриевая лампа. Светофильтр, установленный перед поляризатором **П**, выделяет желтую линию ($\lambda \approx 589 \text{ нм}$) спектра натрия.

Для исследования дисперсии оптической активности используется установка, схема которой приведена на рис.3. Источниками света являются светодиоды (красный, желтый, зеленый и фиолетовый), обладающие высокой степенью монохроматичности (отношение средней длины волны λ к диапазону $\Delta\lambda$ излучения светодиода $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx 25 - 30$). Каждый из светодиодов размещен в цилиндрической оправе, в задней части которой расположено гнездо питания для подключения адаптера на 4,5 Вольт. Оправа помещается в держатель и закрепляется винтом.

Угол поворота плоскости поляризации для различных длин волн определяется по полному затемнению поля зрения при повороте анализатора.

Проведение эксперимента.

Упражнение 1. Определение удельного вращения кварца и раствора сахара с помощью полутеневого поляриметра.

Измерения.

1. Включить натриевую лампу поляриметра и дать ей прогреться в течение 3-5 минут.
2. Вращением анализатора **А** добиться равномерного освещения поля зрения (минимального из двух возможных). Записать в тетрадь соответствующее значение угла установки анализатора.
3. Поместить в ячейку **Я** поляриметра оправу с исследуемым образцом (кристалл кварца или раствор сахара). Убедиться в нарушении равномерности засветки.
4. Вращением анализатора **А** вновь добиться равномерного освещения поля зрения. Записать в тетрадь значение угла поворота анализатора. По направлению вращения анализатора определить тип активности образца (левое или правое).

5. Повторить измерения с данным образцом 3-5 раз, по результатам найти среднее значение угла $\varphi_{\text{ср}}$ поворота и оценить погрешность S_{φ} .

6. Аналогичные измерения провести со всеми исследуемыми образцами раствора сахара (при четырех различных концентрациях - массовых долях p_i , одна из которых не задана) и кварцевыми пластинами (при четырех различных толщинах d_i). Результаты, полученные с раствором сахара, занести в табл. 1 (для кварца таблица строится аналогично).

Табл.1. Измерения с раствором сахара

Результаты измерений с раствором сахара									
№	d (мм)	p (проц)	ρ (г/см ³)	c (г/см ³)	φ_1	φ_2	φ_3	$\varphi_{\text{ср}}$	S_{φ}
1									
2									
3									
4									

7. Среди кварцевых пластин одна вращает плоскость поляризации в другом направлении по сравнению с остальными (т.н. бразильский кварц). Установить в ячейку **Я**, кроме этой пластины, поочередно каждую из оставшихся и определить, с какой из пластин суммарный поворот плоскости поляризации будет минимальным. Объяснить получившийся результат.

Обработка результатов.

1. Для измерений с кварцевыми пластинами построить график зависимости угла вращения $\varphi_{\text{ср}}$ плоскости поляризации от толщины d пластины. По графику с помощью формулы (2) определить a – удельное вращение, измеряемое в град/мм.

2. Для измерений с раствором сахара построить график зависимости угла вращения $\varphi_{\text{ср}}$ плоскости поляризации от концентрации c раствора. Концентрацию c раствора рассчитать по формуле (4), используя данные о массовой доле p_i и плотности раствора $r(p_i)$, приведенные на установке.

По графику с помощью формулы (3) определить $[a]$ – удельное вращение, измеряемое в $\frac{\text{град} \cdot \text{см}^3}{\text{дм} \cdot \text{г}}$. По этому же графику и по измеренному

углу вращения определить неизвестную концентрацию $c_{\text{неизв}}$ сахара в одной из кювет. С помощью (4) оценить массовую долю $p_{\text{неизв}}$ в кювете.

Упражнение 2. Определение дисперсии удельного вращения кварца и раствора сахара с помощью простейшего поляриметра.

По указанию преподавателя измерения могут проводиться только с одним из веществ (раствор сахара или кварц).

Измерения.

1. Установить в держатель любой из светодиодов и подключить питание.

2. Вращением анализатора добиться максимально возможного затемнения поля зрения. Записать соответствующее значение угла ориентации φ_0 анализатора.

3. Вставить в ячейку **Я** любой из исследуемых образцов: кварц с известной толщиной или раствор сахара с известной концентрацией. Вращая анализатор, вновь добиться полного затемнения поля зрения. Значение угла поворота φ_1 анализатора записать в тетрадь.

4. Аналогичные измерения провести и с остальными тремя светодиодами.

Табл.2. Измерение дисперсии кварца

№	цвет	d (мм)	φ_0 (град)	φ_1 (град)	$(\varphi_1 - \varphi_0)$ (град)	λ (нм)	$1/\lambda^2$ (нм ⁻²)	α (град/мм)
1	красный							
2	желтый							
3	зеленый							
4	синий							

Обработка результатов.

1. Определить с помощью формулы (2) или (3) (в зависимости от исследуемого образца) удельное вращение для длины волны I_i каждого из светодиодов. На установке указаны длины волн только трех светодиодов, для четвертого длина волны определяется самостоятельно по графику (см. п. 2).

2. Построить график зависимости удельного вращения плоскости поляризации от $\frac{1}{I^2}$. На этот же график нанести значение, полученное с исследуемым образцом в первом упражнении для желтой линии натрия ($I \approx 589$ нм). В соответствии с теорией данная зависимость должна быть линейной.

С помощью графика по измеренному значению удельного вращение определить неизвестную длину волны $I_{\text{неизв}}$ одного из светодиодов.

Литература.

1. Бутиков Е.И. Оптика. – СПб.: Невский диалект, 2003. §2.9.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1985. §94.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Физматлит, 2003. Глава XXX.

Контрольные вопросы.

1. Какие вещества называют оптически активными? Приведите примеры.

2. Какие волны называют линейно поляризованными и поляризованными по кругу?

3. Как можно представить линейно поляризованную волну в виде совокупность волн с круговой поляризацией? Выведите формулу (1).

4. От каких характеристик веществ зависит удельное вращение плоскости поляризации? Поясните формулы (2) и (3).

5. Опишите устройство простейшего и полутеневого поляриметров и объясните принцип работы.

6. Почему в полутеновом поляриметре существуют два положения анализатора, при которых будет наблюдаться равномерно засвеченное поле? Какое из положений следует выбирать для работы?

7. Установим мысленно на пути волны, вышедшей из кюветы с оптически активным веществом, зеркало так, чтобы отраженная от него волна вновь прошла через кювету. Каким будет состояние поляризации волны после повторного прохождения? Почему?

8. Изобразите примерный вид графика зависимости удельного вращение раствора сахара или кварца от длины волны.

9. Какая картина будет наблюдаться в поляриметре, если в качестве источника света взять обычную лампу накаливания? Как она будет изменяться при вращении анализатора?

Приложение. О поляризации электромагнитных волн.

Из электромагнитной теории света, базирующейся на системе уравнений Максвелла, следует, что световые волны поперечны. Это означает, что в распространяющейся в вакууме или изотропной среде бегущей электромагнитной волне в любой момент времени и в любой точке пространства вектора напряженности электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ и магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ образуют с волновым вектором \mathbf{k} правую тройку векторов (рис. 1). В общем случае, если в некоторой точке задано направление распространения волны (вектор \mathbf{k}), то в плоскости, ортогональной к \mathbf{k} , могут присутствовать все возможные направления колебаний взаимно перпендикулярных векторов³ $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ и $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$. Если направление и величина $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ хаотически изменяются с течением времени, то такой свет принято называть *естественным* (пример: излучение обычной электрической лампочки). На рис. 2 приведены «мгновенные фотографии» вектора $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ естественного света в т.А, сделанные в разные моменты времени. Отметим, что при этом $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ всегда остается в плоскости, перпендикулярной к \mathbf{k} .

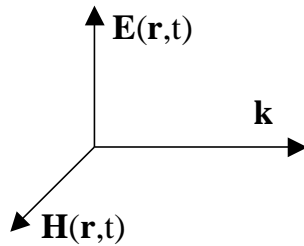


Рис. 1. Взаимное расположение векторов в бегущей электромагнитной волне

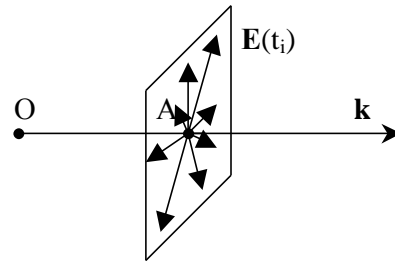


Рис. 2. Поведение вектора $\mathbf{E}(t)$ в естественном свете (О-источник света).

Однако поведение вектора $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ можно определенным образом упорядочить. Пусть, например, луч естественного света падает из вакуума на плоскую границу раздела с диэлектриком таким образом, чтобы угол падения q и показатель преломления диэлектрика n были связаны соотношением (рис. 3):

$$\operatorname{tg} q = n.$$

В этом случае в отраженном свете будет присутствовать только одно направление колебания $\mathbf{E}_{\text{отр}}(\mathbf{r}, t)$: перпендикулярно к плоскости падения, образованной падающим лучом и нормалью к поверхности в точке падения. Угол q называют углом Брюстера, или углом полной поляризации отраженного света (подробнее см. в литературе).

³ Так как векторы напряженностей электрического и магнитного полей в бегущей волне однозначно связаны друг с другом, в дальнейшем речь будет идти только о векторе $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$.

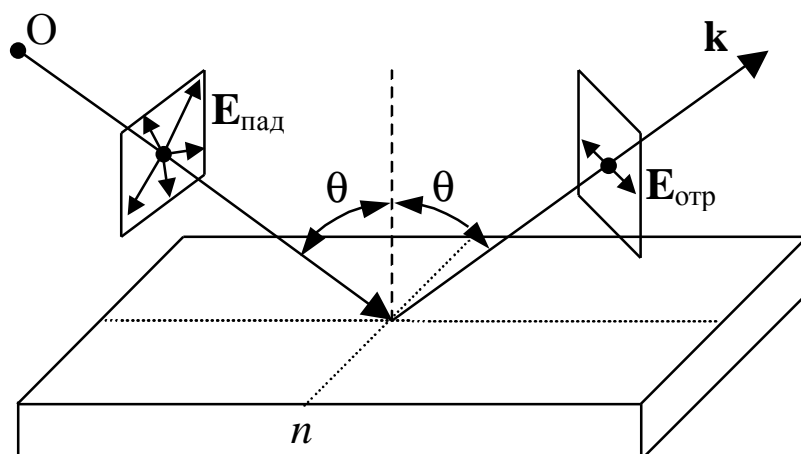


Рис. 3. Поляризация света при отражении от пластины диэлектрика под углом Брюстера.

Волна, в каждой точке которой конец вектора $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ движется вдоль прямой линии, перпендикулярной к \mathbf{k} , называют *линейно поляризованной*, или *плоско поляризованной*. Плоскость, образованную векторами $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ и \mathbf{k} , называют *плоскостью поляризации*.

Существуют различные поляризационные приспособления, или *поляризаторы*, для получения линейно поляризованного света из естественного. В основе работы этих приборов лежат следующие физические явления: двойное лучепреломление, дихроизм (дихроичное поглощение), отражение и рассеяние света. В последнее время в поляризационных измерениях используются в основном поляризаторы, работа которых основана на первых двух оптических явлениях. В частности, в полутеневом поляриметре применена призма Николя, сделанная особым образом из анизотропного кристалла исландского шпата. Направляя на нее пучок естественного света, на выходе получают линейно поляризованный свет. Часто в качестве поляризаторов используются пленочные (дихроичные) поляроиды. Они представляют собой растянутые полимерные пленки, у которых поглощение света зависит от направления колебаний вектора $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$. Эти полимерные материалы практически полностью пропускают одну из компонент поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ в волне и поглощают перпендикулярную к ней компоненту. В результате после прохождения через поляроид излучение линейно поляризовано в плоскости пропускания поляроида.

Пусть пучок естественного света интенсивностью I_0 проходит последовательно через два поляроида – поляризатор П и анализатор А (рис. 4), плоскости пропускания которых образуют угол α . Найдем зависимость интенсивности прошедшего света $I(\alpha)$ от α . Так как в естественном свете присутствуют все возможные направления колебаний вектора $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, то после прохождения первого поляроида, называемого в этом случае *поляризатором*, излучение станет линейно поляризованным с интенсивностью $I_1 = I_0/2$. Плоскость пропускания второго поляроида (называемого *анализатором*) повернута на угол α относительно плоскости поляризации падающей на него волны, поэтому через него пройдет только соответствующая компонента вектора $E_2 = E_1 \cdot \cos \alpha$.

Так как интенсивность $I \sim E^2$, то в результате получим:

$$I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \alpha$$

Данная зависимость носит название *закона Малюса*.

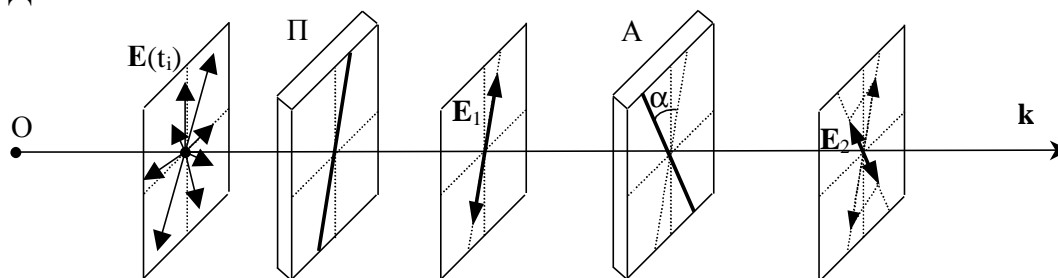


Рис. 4. Прохождение естественного света через поляризатор П и анализатор А (плоскости пропускания П и А выделены сплошными линиями)

Если для световой волны задано направление распространения, то в общем случае ее можно представить как суперпозицию двух линейно поляризованных волн, для которых направления поляризации взаимно перпендикулярны. Для естественного света характерно хаотическое изменение амплитуд и фаз каждой из этих волн. Если же амплитуды обеих волн постоянны, а частоты одинаковы, то в зависимости от разности фаз будут наблюдаться различные состояния поляризации волны – линейная, эллиптическая, круговая.

Пусть, к примеру, вдоль оси z распространяются две линейно поляризованные (вдоль осей x и y) монохроматические волны:

$$E_x(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz);$$

$$E_y(z, t) = b \cdot \sin(\omega t - kz + j),$$

где a и b – амплитуды волн, j – разность фаз между ними.

Поведение результирующего вектора $\mathbf{E}(z, t)$ существенным образом зависит от значения j . Если $j = 0$, то обе компоненты будут изменяться синфазно, результирующая волна окажется также линейно поляризованной, причем тангенс угла между плоскостью поляризации и осью x будет равен b/a (рис. 5а). Если $j = \pi/2$, то вектор $\mathbf{E}(z, t)$ будет вращаться в плоскости xOy по часовой стрелке с угловой скоростью ω , а его конец будет описывать эллипс с полуосями a и b , ориентированными вдоль осей x и y соответственно (рис. 5б). Такую волну называют *эллиптически поляризованной*.

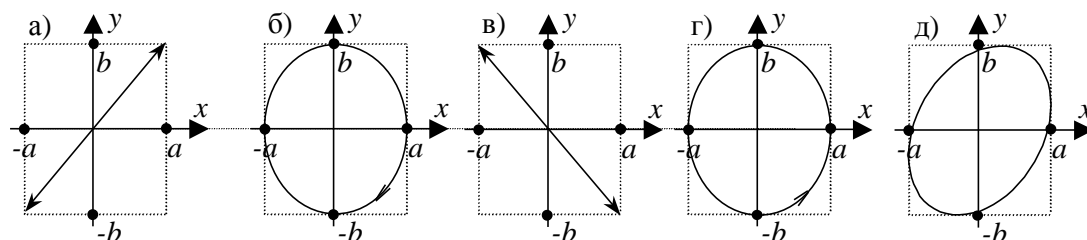


Рис. 5. Сложение двух волн, поляризованных вдоль осей x и y в зависимости от разности фаз:

а) $j = 0$; б) $j = \pi/2$; в) $j = \pi$; г) $j = 3\pi/2$ д) j – произвольно.

На рис 5в-5г приведены случаи, когда $j = p$ и $j = 3p/2$ соответственно. В зависимости от направления вращения вектора $\mathbf{E}(z, t)$ различают *право поляризованную* (по часовой стрелке, если смотреть навстречу волне, рис. 5б) и *лево поляризованную* (против часовой стрелки, рис. 5г) волны.

В общем случае произвольного значения разности фаз j получается эллиптически поляризованная волна с всевозможными размерами полуосей эллипса, их ориентацией и направлением вращения вектора $\mathbf{E}(z, t)$. Но при этом эллипс обязательно вписан в прямоугольник размером $2a$ на $2b$ (рис. 5д).

Если $a=b$ и $j = p/2$ или $j = 3p/2$, то эллипс вырождается в окружность, и получившиеся волны называют *поляризованными по кругу*, или *циркулярно поляризованными*. При этом первая волна будет право поляризованной, вторая – лево поляризованной.

Представим теперь, что в одном направлении (вдоль оси z) распространяются две циркулярно поляризованные волны одинаковой амплитуды, но с различными направлениями вращения: правая и левая. Математически каждую из них можно представить в виде:

правая	левая
$E_{1x}(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz);$ $E_{1y}(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz + p/2) =$ $= a \cdot \cos(\omega t - kz),$	$E_{2x}(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz);$ $E_{2y}(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz + 3p/2) =$ $= -a \cdot \cos(\omega t - kz),$

Волна $\mathbf{E}(z, t)$, являющаяся суперпозицией этих волн, запишется в виде:

$$E_x(z, t) = E_{1x}(z, t) + E_{2x}(z, t) = 2a \cdot \sin(\omega t - kz);$$

$$E_y(z, t) = E_{1y}(z, t) + E_{2y}(z, t) = 0,$$

т.е. будет линейно поляризованной вдоль оси x . Таким образом, линейно поляризованную волну можно представить как совокупность двух циркулярно поляризованных волн с различными направлениями вращения вектора \mathbf{E} .

Если между циркулярно поляризованными волнами появится разность фаз y (к примеру, $E_{2x}(z, t) = a \cdot \sin(\omega t - kz + y)$, аналогично и для $E_{2y}(z, t)$), то можно заметить, что волна $\mathbf{E}(z, t)$ останется линейно поляризованной, но ее плоскость поляризации повернется на угол $y/2$.

Разность фаз между волнами и, как следствие, поворот плоскости поляризации, можно получить, пропуская линейно поляризованную волну через слой оптически активного вещества (кварц, раствор сахара и др.).