

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В. Дю,
М. Г. Кистенева

Изучение вращения плоскости поляризации

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Оптическое материаловедение»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата
12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика»

Томск
2023

УДК 535.565
ББК 22.343
Д 95

Рецензент:

Смирнов С.В., профессор каф. ФЭ, д-р техн. наук, профессор

Авторы:

В. Дю, М. Г. Кистенева

Дю, Валерия

Д 95 Изучение вращения плоскости поляризации: Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Оптическое материаловедение» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика» / В. Дю, М. Г. Кистенева. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 12 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Изучение поворота плоскости поляризации» для студентов, обучающихся по дисциплине «Оптическое материаловедение» по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика».

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 02-23 от 22.02.2023 г.

УДК 535.565
ББК 22.343

© Дю В., Кистенева М. Г., 2023
© Томск. гос. ун-т. систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

Оглавление

1 Введение.....	4
2 Теоретическая часть.....	4
2.1 Поляризация.....	4
2.2 Поляризатор.....	6
2.3 Оптическая активность.....	7
3 Описание экспериментальной установки.....	10
4 Задание.....	10
5 Порядок выполнения работы.....	11
6 Контрольные вопросы.....	12
Литература.....	12

1 Введение

Явление вращения плоскости поляризации света занимает важное место и в принципиальном, и в практическом отношении. Целью работы является исследование оптической активности в кристалле силиката висмута, определение длины кристаллического образца и значения его удельного вращения.

2 Теоретическая часть

2.1 Поляризация

Из электромагнитной теории света следует, что плоские световые волны являются поперечными (рис. 2.1).

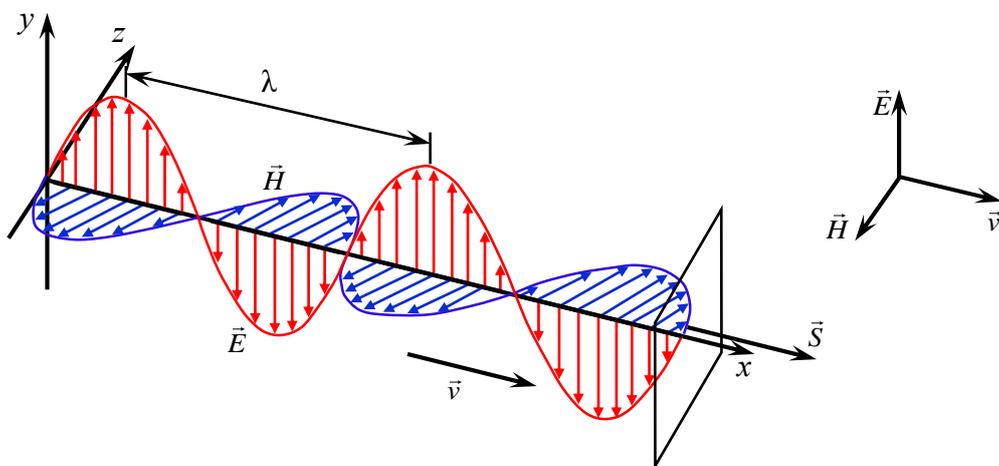


Рисунок 2.1 – Плоская световая волна

В неполяризованном свете, испускаемом обычными источниками (лампы накаливания, солнце), имеются колебания, совершающиеся в различных направлениях, перпендикулярных к лучу. В таких световых волнах, исходящих из различных элементарных излучателей (атомов), векторы \vec{E} имеют различные ориентации, причём все эти ориентации равновероятны, что обусловлено большим числом атомных излучателей. неполяризованный (естественный) свет (рис. 2.2) может испускаться лишь огромным числом элементарных излучателей. Электромагнитная волна от отдельного элементарного излучателя (атома, молекулы) всегда поляризована.

Если под влиянием внешних воздействий (поляризатора) на свет или внутренних особенностей источника света (лазер) появляется предпочтительное, наиболее вероятное направление колебаний, то такой свет становится частично поляризованным. Его можно рассматривать как смесь естественного света и поляризованного.

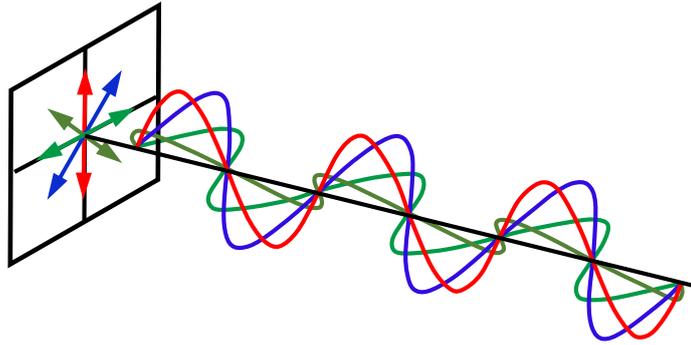


Рисунок 2.2 – Неполаризованный свет

Электромагнитная волна, у которой направления колебаний электрического вектора \vec{E} и магнитного \vec{H} упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованной* волной. Плоскость, проходящая через вектор \vec{E} и направление распространения волны, называется *плоскостью поляризации*.

Если колебания вектора \vec{E} (как и \vec{H}) происходят только в одной проходящей через луч плоскости, т.е. если эта плоскость не меняет во времени своей ориентации, то волна называется плоско-поляризованной или линейно-поляризованной (рис. 2.3,а).

Если в каждой фиксированной точке пространства конец вектора \vec{E} описывает круг или эллипс, то этот свет имеет *круговую* или *эллиптическую* поляризацию (рис. 2.3,б и в).

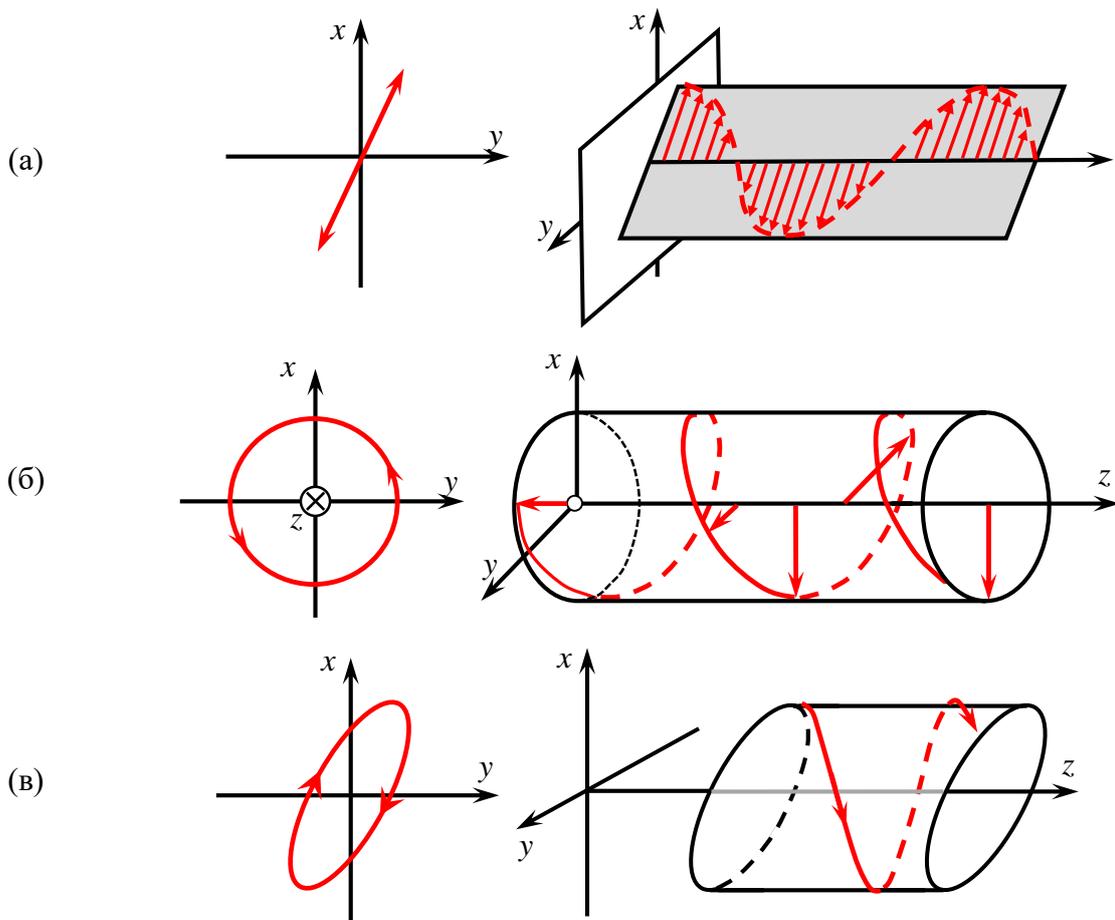


Рисунок 2.3

В фиксированный момент времени, при линейной поляризации конец вектора \vec{E} колеблется по гармоническому закону по линии колебаний, при круговой и эллиптической поляризации конец вектора \vec{E} описывает соответственно окружность и эллипс с центром на луче в плоскости, перпендикулярной лучу. Круговая и эллиптическая поляризации бывают правой и левой в зависимости от направления движения конца вектора \vec{E} вокруг луча (направленного на наблюдателя). На основании принципа суперпозиции для напряжённости электрического поля неполяризованный свет можно представить в виде суперпозиции двух взаимно перпендикулярных колебаний, у которых разность фаз δ за время наблюдения хаотически меняется.

Эллиптическая поляризация является наиболее общим случаем поляризации электромагнитной волны. Она возникает при любой постоянной разности фаз δ . При разности фаз $\delta = \pm\pi/2$ получается эллипс, приведённый к осям координат. При равенстве амплитуд колебаний, если $\delta = \pi/2$ или $\delta = m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) эллиптическая поляризация вырождается, соответственно, в круговую или линейную поляризации, которые можно рассматривать как частные случаи эллиптической поляризации.

2.2 Поляризатор

Линейно поляризованный свет можно получить из естественного с помощью приборов, называемых поляризаторами (рис. 2.4). Поляризаторами называются устройства для управления поляризацией волны. Эти устройства свободно пропускают колебания, параллельные лишь одной плоскости, которая называется плоскостью поляризатора (yy'), и полностью задерживают колебания, перпендикулярные к этой плоскости, то есть выделенный свет будет линейно поляризованным. Если пропустить через такой прибор Π_1 пучок естественного света, то на выходе он будет линейно поляризованным, а интенсивность его составит половину интенсивности естественного света I_0 .

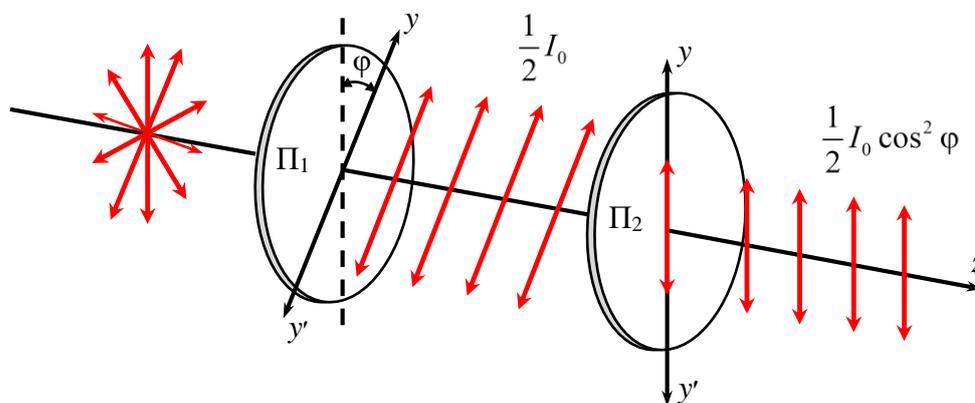


Рисунок 2.4 – Система из двух поляризаторов

При вращении анализатора Π_2 вокруг направления луча на угол φ интенсивность выходящего света будет изменяться от I_{min} до I_{max} по закону Малюса

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi .$$

Если падающий пучок света линейно поляризован, то при положении прибора, когда его плоскость поляризации (yy') ортогональна плоскости колебаний волны, свет через прибор не пройдёт, то есть $I_{min} = 0$. Для частично поляризованного света – $I_{min} \neq 0$.

2.3 Оптическая активность

Явление вращения плоскости поляризации имеет место в разных материалах, получивших название естественно-активных. Объяснение этого явления можно получить, рассматривая задачу взаимодействия поля световой волны с молекулами или атомами вещества, если принять во внимание конечные размеры молекул и их структуру.

Отношение линейных размеров молекул (атомов) к длине световых волн имеет порядок 10^{-3} ; для многих оптических проблем можно считать это отношение бесконечно малым. Т.е., можно полагать, что поле, действующее на электрон в атоме, равно просто $E_0 \sin(\omega t)$, хотя поле волны, распространяющейся в направлении оси z , есть $E_0 \sin(\omega t - kz)$ и, значит, для каждого момента времени t поле в разных точках молекулы, соответствующих различным значениям z , различно.

Проблема вращения плоскости поляризации заставляет принимать во внимание размеры молекул при взаимодействии с видимым светом, длины волн которого в тысячи раз больше этих размеров. Это можно выразить более формальным образом. Дипольный момент, индуцируемый в молекуле, определяется значением напряжённости поля \vec{E} не в одной точке, а в области с размерами, сопоставимыми с протяжённостью молекулы. То же заключение относится и к связи между \vec{E} и вектором индукции \vec{D} . Таким образом, вследствие конечности размеров молекул связь между \vec{E} и \vec{D} оказывается нелокальной, т.е. значение \vec{D} в какой-либо точке зависит от значения вектора \vec{E} в некоторой её окрестности.

Вращение плоскости поляризации представляет собой простейший и наиболее сильный пример эффектов пространственной дисперсии, его величина определяется отношением $l/\lambda \approx 10^{-3}$ (l – линейный размер молекулы (атома), λ – длина волны). Остальные эффекты пространственной дисперсии слабее, так как зависят уже от $(l/\lambda)^2$.

Явление вращения плоскости поляризации было открыто Араго (1811 г.) при изучении двойного преломления в кварце, в котором оно выражено заметно. Хотя в настоящее время известны вещества, вращающая способность которых в несколько раз больше, чем у кварца (например, киноварь), но кварц и до настоящего времени остаётся классическим объектом для демонстрации явления и используется во многих приборах для исследования вращательной способности.

При прохождении через кварц плоскость поляризации света поворачивается на некоторый угол. Угол поворота плоскости поляризации для разных длин волн света различен, т.е. имеет место вращательная дисперсия. Кварцевая пластинка толщиной 1 мм вращает плоскость поляризации на следующие углы:

для красного света	15°
для желтого света	21°
для зеленого света	27°
для синего света	33°
для фиолетового света	51°

Для данной длины волны угол поворота пропорционален толщине пластинки. Вращательную способность твёрдых веществ характеризуют величиной угла ρ , на который поворачивает плоскость поляризации пластинка толщиной 1 мм. Таким образом,

$$\theta = \rho d, \quad (2.1)$$

где θ – угол поворота;

ρ – коэффициент, зависящий от длины волны, природы вещества и температуры;

d – толщина пластинки в мм.

Для растворов Ж. Био (1831 г.) обнаружил следующие закономерности: угол поворота плоскости поляризации θ прямо пропорционален толщине d слоя раствора и концентрации C активного вещества:

$$\theta = [\rho]Cl. \quad (2.2)$$

Коэффициент пропорциональности $[\rho]$, аналогично коэффициенту для кристаллов, характеризует природу вещества и носит название *постоянной вращения*. Постоянная вращения обратно пропорциональна квадрату длины волны:

$$\rho \sim \frac{1}{\lambda^2}, \quad (2.3)$$

поэтому при пропускании поляризованного света через раствор оптически активного вещества плоскости поляризации волн различной длины будут поворачиваться на разные углы. В зависимости от положения анализатора через него проходят лучи различной окраски. Это явление называется *вращательной дисперсией*.

Опыт показывает, что направление вращения (знак) меняется при изменении направления распространения света. Поэтому, если поляризованный свет, прошедший через кристалл, отражается от зеркала и вторично проходит через тот же кристалл, то направление плоскости восстанавливается.

В соответствии с этим принято направление вращения устанавливать для наблюдателя, смотрящего *навстречу* световому пучку. Оптически активное вещество (жидкость или твёрдое тело) называют *правым* (правовращающим, положительным), когда вращение плоскости поляризации осуществляется по часовой стрелке. Если вращение происходит против часовой стрелке, то вещество называют *левым* (левовращающим, отрицательным). Многие химические соединения существуют как в правой, так и в левой формах.

Исследования показали, что объяснение явления вращения плоскости поляризации света в естественно-активных веществах можно получить, рассматривая общую задачу взаимодействия электромагнитной световой волны с молекулами или атомами веществ, если только принять во внимание конечные размеры молекул и их структуру. Эта задача очень сложна. В своё время О. Френель (1817 г.) представил описание этого явления, сведя его к особому типу двойного лучепреломления. В основе рассуждений Френеля лежит гипотеза, согласно которой скорость распространения света в активных веществах различна для волн, поляризованных по левому и по правому кругу. Когда плоскополяризованный свет входит в кристалл, он разделяется на правую и левую волны с круговой поляризацией. Если кристалл обладает хиральностью, то эти две волны распространяются с различными скоростями и вскоре расходятся по фазе. При выходе из кристалла волны с круговой поляризацией рекомбинируют и образуют плоскополяризованную волну, но при этом её плоскость поляризации будет повернута на некоторый угол θ .

Представим плоскополяризованную волну как суперпозицию двух волн, поляризованных по кругу вправо и влево с одинаковыми амплитудами и периодами. Если оба вектора \vec{E}_L и \vec{E}_R вращаются с одинаковой скоростью $v_L = v_R$, соответственно, то геометрическая сумма их в каждый момент времени будет лежать в одной и той же плоскости P (рис. 2.5, а).

Предположим для определённости, что $v_L < v_R$. Т.к. левая волна распространяется с меньшей скоростью, то до какой-либо точки внутри среды она дойдёт с некоторым отставанием по фазе по сравнению с правой, в результате чего плоскость Q , в которой лежит результирующий вектор \vec{E} , будет поворачиваться относительно первоначальной плоскости P (рис. 2.5, б) на угол θ .

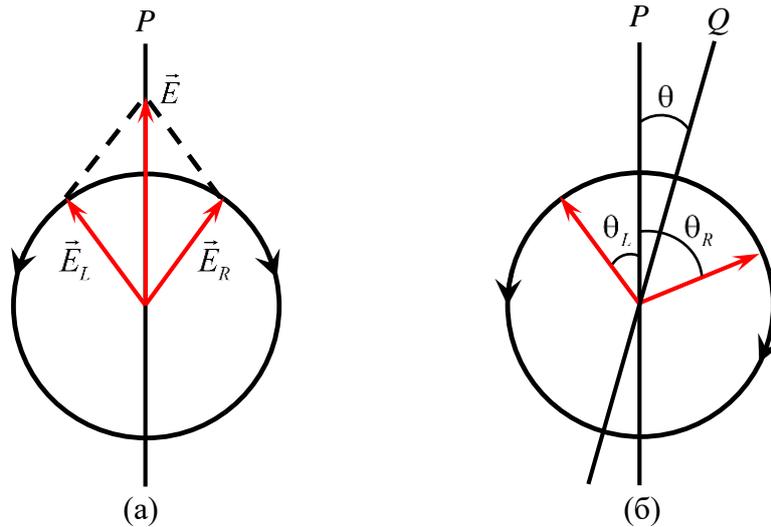


Рисунок 2.5 – К общей теории вращения плоскости поляризации

Различие в скоростях света с разным направлением круговой поляризации обуславливается асимметрией молекул, либо асимметричным размещением атомов в кристалле. Итак, результирующее плоское колебание будет направлено по Q , т.е. плоскость поляризации света повернулась вправо на угол θ , так что

$$\theta_R - \theta = \theta_L + \theta$$

или

$$\theta = \frac{\theta_R - \theta_L}{2}. \quad (2.4)$$

Для аналитического решения той же задачи запишем выражение угла поворота светового вектора в функции времени t и глубины проникновения z для правого и левого лучей:

$$\theta_R = \omega \left(t - \frac{z}{v_R} \right), \quad (2.5)$$

$$\theta_L = \omega \left(t - \frac{z}{v_L} \right), \quad (2.6)$$

где $v_R = \frac{c}{n_R}$ и $v_L = \frac{c}{n_L}$ – фазовые скорости распространения правого и левого циркулярно-поляризованных лучей соответственно;

n_R и n_L – показатели преломления.

Угол поворота плоскости поляризации θ (рис. 2.5,б) на глубине $z = d$ равен

$$\theta = \frac{\theta_R - \theta_L}{2} = \frac{\omega d}{2c} (n_L - n_R) = \frac{\pi d}{\lambda_0} (n_L - n_R) = \rho d, \quad (2.7)$$

так как

$$\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{T \cdot c} = \frac{2\pi}{T \cdot \lambda_0},$$

где λ_0 – длина волны в вакууме.

Формула (2.7) показывает, что в веществах, для которых $n_L > n_R$, плоскость поляризации поворачивается вправо ($\varphi_R > \varphi_L$), а в веществах, для которых $n_L < n_R$, – влево ($\varphi_R < \varphi_L$) в соответствии с данными Френеля.

Особенностью оптически активных веществ является то, что их молекулы не имеют центра и плоскости симметрии. Молекулы таких веществ могут существовать в виде двух зеркально симметричных изомерных форм – оптических изомеров. Один из оптических изомеров вращает плоскость поляризации вправо, другой – влево. Вещество в целом будет вращать плоскость поляризации света, в том случае, если концентрации оптических изомеров различны. Оптически активные кристаллы также существуют в виде двух модификаций: право- и левовращающей. Обе модификации отличаются друг от друга внешней формой и внутренней кристаллической структурой. Обе модификации не конгруэнтны, т.е. правая не может быть наложена на левую и наоборот.

У кварца $\rho = 18,8$ град/мм при $\lambda = 0,63$ мкм откуда $n(L) - n(R) = 6,6 \cdot 10^{-5}$. Это небольшое значение по сравнению с собственным двойным лучепреломлением $n_e - n_o = 1,553 - 1,544 = 0,009$, то есть приблизительно 1% – типичным числом для многих анизотропных материалов. По этой причине оптическую активность сложно наблюдать в присутствии двойного лучепреломления. Большинство экспериментов выполняют вдоль оптических осей или же в оптически изотропных материалах, где двойное лучепреломление равно нулю.

3 Описание экспериментальной установки

Для наблюдения вращения плоскости поляризации в кристалле силиката висмута собирается установка по схеме, изображённой на рисунке 3.1. Установка состоит из источника монохроматического излучения (1) с длинами волн $\lambda_i = 407, 532$ и 650 нм, поляризатора (2), кассеты 3 с кристаллическими образцами силиката висмута (рисунок 3.2), анализатора (4) и фотоприёмника (5).

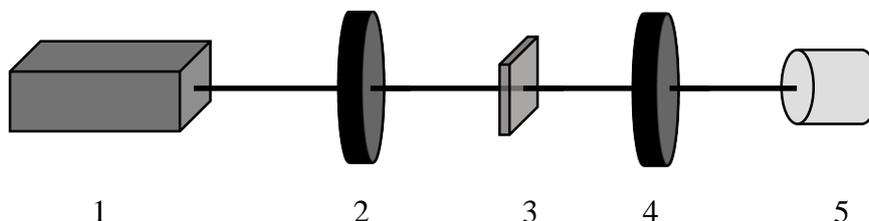


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки

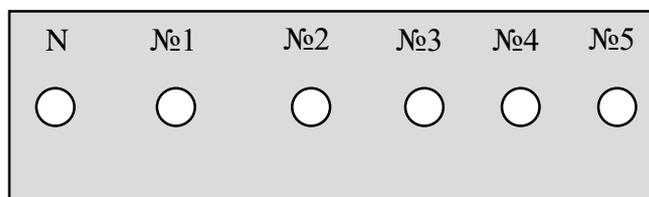


Рисунок 3.2 – Кассета с кристаллическими образцами силиката висмута

4 Задание

4.1 Наблюдать вращение плоскости поляризации света в кристалле.

4.2 Получить экспериментальную зависимость угла поворота плоскости поляризации от коэффициента оптической активности для трёх значений длин волн монохроматического излучения.

4.3 Определить толщину кристалла силиката висмута.

4.4 Получить экспериментальную зависимость угла поворота плоскости поляризации от толщины кристалла силиката висмута для заданного значения длины волны монохроматического излучения.

4.5 Определить постоянную вращения кристалла для заданного значения длины волны монохроматического излучения.

5 Порядок выполнения работы

5.1 Перед началом работы все выключатели на установке вывести в положение «Выключено». Подключить источник монохроматического излучения к сети и включить его, нажав на зелёную кнопку (532 нм). Убедиться, что световой луч проходит через центры поляризатора и анализатора, и попадает на фотоприёмник. Фотоприёмник подключить к вольтметру. Включить вольтметр.

5.2 С помощью пластинки с известной ориентацией поляризации установить поляризатор 2 (рис. 3.1) таким образом, чтобы на выходе из него свет был поляризован горизонтально (максимальная интенсивность света на фотодиоде 5). Анализатор 4 установить в положение, при котором будет проходить только вертикальная составляющая света. Если поляризатор и анализатор установлены верно, то на выходе из последнего будет наблюдаться минимум интенсивности проходящего света.

5.3 Между поляризатором и анализатором установить кассету с образцами силиката висмута так, чтобы световой луч проходил через окно N.

5.4 Повернуть анализатор 4 до получения минимального значения интенсивности проходящего света. Определить угол поворота анализатора θ . Полученное значение записать в таблицу 5.1. Вернуть анализатор в исходное положение.

5.5 Повторить п. 5.4 для остальных образцов.

Таблица 5.1

№ образца	d , мм	θ , град.
N		
1		
2		
...		
5		

5.6 Между поляризатором и анализатором установить кристаллический образец N.

5.7 Повторить п. 5.4 для всех длин волн лазера. Данные занести в таблицу 5.2.

5.8 Выключить лазер.

Таблица 5.2

λ , нм	ρ , град/мм	θ , град.
407		
532		
650		

5.9 Проверить соотношение (2.1), построив зависимость $\theta(d)$ (таблица 5.1) (экспериментальные точки должны укладываться на прямую). Для проведения прямой через экспериментальные точки воспользоваться методом наименьших квадратов.

5.10 Определить постоянную вращения ρ кристалла как

$$\rho = k = \frac{\Delta\theta}{\Delta d},$$

где k – угловой коэффициент прямой $\theta(d)$.

5.11 Сравнить полученное значение ρ по градуированному графику, который строится по данным таблицы 5.3. Оценить погрешность определения ρ .

5.12 Нанести экспериментальные точки на график в координатах ρ, θ (таблица 5.2). С помощью метода наименьших квадратов определить толщину кристаллического образца N и сравнить с табличным значением.

5.13 Оценить погрешность определения толщины кристалла N .

Таблица 5.3 – Экспериментальные значения ρ (град/мм) при 300 К

λ , нм	Кристаллы		λ , нм	Кристаллы	
	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$		$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$
420	80	89,83	720	15,87	14,2
450	60,2	60,09	750	14,4	12,45
500	42,2	40,6	770	13,9	11,94
550	31,6	30,2	824	11,6	10,12
600	25,2	23,8	882	9,99	8,96
650	20,38	19,3	-	-	-

6 Контрольные вопросы

- 6.1 Что такое поляризация?
- 6.2 Какие существуют типы поляризации?
- 6.3 Что такое плоскость поляризации?
- 6.4 Каким образом можно определить тип поляризации?
- 6.5 Дайте определение оптической активности.
- 6.6 Какие материалы обладают оптической активностью?
- 6.7 В каком случае активная среда называется правовращающей?
- 6.8 Каким образом можно получить линейно поляризованный свет?
- 6.9 Каким образом в данной работе определяется толщина кристалла?
- 6.10 Как О. Френель объяснил явление вращения плоскости поляризации света в естественно-активных веществах?

Литература

- 1 Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2010. 848 с.
- 2 Савельев И.В. Курс общей физики. Оптика. М.: Наука, 1998. 368 с.