

## *Получение и исследование поляризованного света.*

Цель работы: изучить явление поляризации света.

Решаемые задачи:

- получить линейно поляризованный свет;
- пронаблюдать изменения интенсивности света в зависимости от угла между осями поляризатора и анализатора;
- проверить справедливость закона Малюса;
- пронаблюдать прохождение плоскополяризованного света через кристаллическую пластинку, вырезанную из одноосного кристалла параллельно его оптической оси;
- определить вид поляризации света в зависимости от толщины пластинки и угла между направлением колебаний электрического вектора в поляризованном свете, падающем на пластинку, и осью пластинки.

Световые волны – являются поперечными: вектор напряжённости электрического поля  $\mathbf{E}$  колеблется в направлении, перпендикулярном лучу.

В естественном свете все направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$  относительно луча являются равновероятными, т.к. волна естественного света – это результат суперпозиции волн от большого количества излучающих атомов ( $\mathbf{E}_{ест}$  на Рис.1).

Поляризованным называется свет, в котором направление колебаний вектора  $\mathbf{E}$  каким-то образом упорядочено. Если вектор  $\mathbf{E}$  колеблется в одной плоскости (эта плоскость проходит также через волновой вектор  $\mathbf{k}$ ), то говорят, что свет является плоско- (или линейно-) поляризованным.

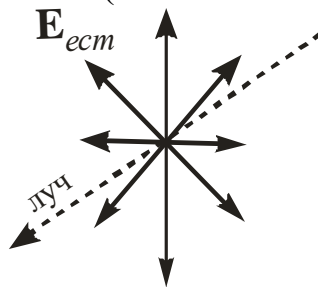


Рис. 1 Естественный свет (неполяризованный свет)

Для получения плоскополяризованного света используют поляризатор – оптический прибор, пропускающий только компоненту  $E_{\parallel}$ , параллельную плоскости, которую называют плоскостью пропускания поляризатора. Колебания, перпендикулярные этой плоскости, поляризатор задерживает.

Действие поляризатора основано на использовании одного из трёх физических явлений: двойного лучепреломления, линейного дихроизма и поляризации света, происходящей при отражении на границах раздела сред.

В данной работе в качестве поляризаторов используются поляроидные плёнки, поляроиды. Они представляют собой тонкие полимерные плёнки, в которые вкраплены ориентированные кристаллики герпатита. Кристаллы герпатита обладают ярко выраженным дихроизмом, заключающимся в

зависимости поглощения света от направления колебаний вектора  $\mathbf{E}$ : они пропускают одну составляющую ( $\mathbf{E}_{\parallel}$ ) и практически полностью поглощают перпендикулярную ей составляющую ( $\mathbf{E}_{\perp}$ ). Поляризующая плёнка помещается между двумя пластинками стекла для защиты от влаги и механических повреждений.

В результате такого селективного поглощения неполяризованный (естественный) свет, проходя сквозь поляроид, превращается в плоскополяризованный.

Направим на поляризатор плоскополяризованную волну с амплитудой  $E_0$ , у которой направление колебаний вектора  $\mathbf{E}_0$  составляет угол  $\varphi$  с плоскостью пропускания поляризатора. Из поляризатора выйдет волна с амплитудой  $E_{\parallel}$  (Рис. 2):

$$E_{\parallel} = E_0 \cos \varphi .$$

Интенсивность  $I$  прошедшей через поляризатор волны пропорциональна  $E_{\parallel}^2$ , т.е равна:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi ,$$

где  $I_0$  - интенсивность *поляризованного* света, падающего на поляризатор. Это соотношение называется законом Малюса.

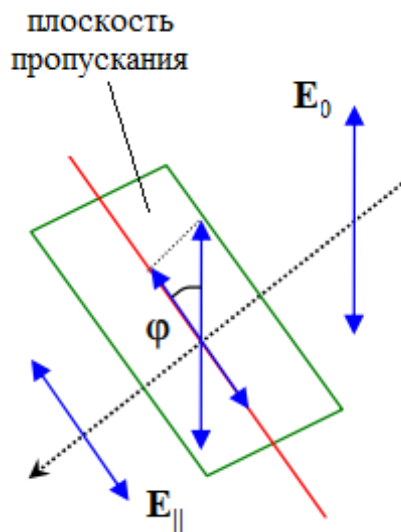


Рис. 2 К выводу закона Малюса



Э. Малюс (1775 - 1812)

Рассмотрим нормальное падение линейнополяризованной монохроматической волны на тонкую пластинку, вырезанную из одноосного кристалла, в котором оптическая ось направлена параллельно её грани. Т.е. свет падает перпендикулярно к её оптической оси (Рис. 3 Основные определения.

Главным сечением кристалла называется плоскость, в которой лежат падающий луч (вектор  $\mathbf{k}$ ) и оптическая ось кристалла  $OO'$ .

Линейнополяризованная волна, в которой вектор  $\mathbf{E}_0$  колеблется перпендикулярно плоскости главного сечения, называется обыкновенной

волной. Её скорость, а значит и показатель преломления  $n_o$ , не зависят от направления распространения.

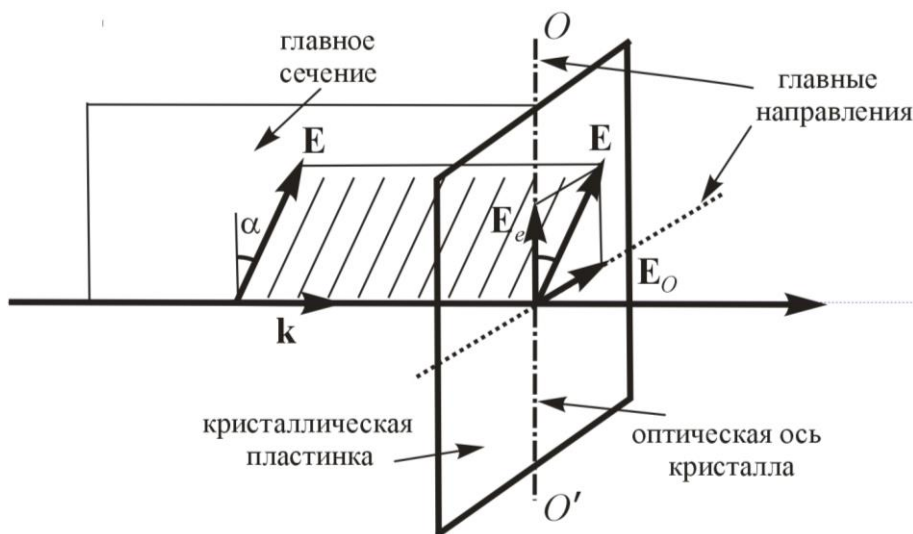


Рис. 3 Основные определения

Волна, в которой вектор  $\mathbf{E}_e$  колеблется в плоскости главного сечения, называется необыкновенной. Её скорость и показатель преломления  $n_e$  зависят от направления распространения

Внутри кристалла будут распространяться по одному направлению, но с различными скоростями две световые волны, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях, которые принято называть главными направлениями кристаллической пластинки.

Если толщина пластинки  $l$ , то на выходе из неё между обыкновенной и необыкновенной волнами набегит оптическая разность хода  $\Delta = l \cdot (n_o - n_e)$ , и соответствующая разность фаз составит:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l \cdot (n_o - n_e).$$

На выходе из кристалла результирующая напряжённость электрического поля будет складываться из напряжённостей полей обыкновенной и необыкновенной волн. Эти волны имеют одинаковую частоту, но сдвинуты по фазе на угол  $\varphi$ . Если смотреть навстречу лучу, то конец результирующего вектора  $\mathbf{E}$  непрерывно вращается, скользя по эллипсу. На Рис. 4 изображена схема такой эллиптически поляризованной волны, распространяющейся в направлении оси ОХ.

Форма эллипса и его ориентация относительно главных направлений (оптической оси и перпендикулярного ей) зависят от разности хода складывающихся волн. Эллиптическая поляризация - наиболее общий вид поляризации поперечных волн. Частными случаями эллиптической поляризации являются: линейная, когда длина одной из осей эллипса равна нулю, и круговая (циркулярная), когда оси эллипса одинаковы.

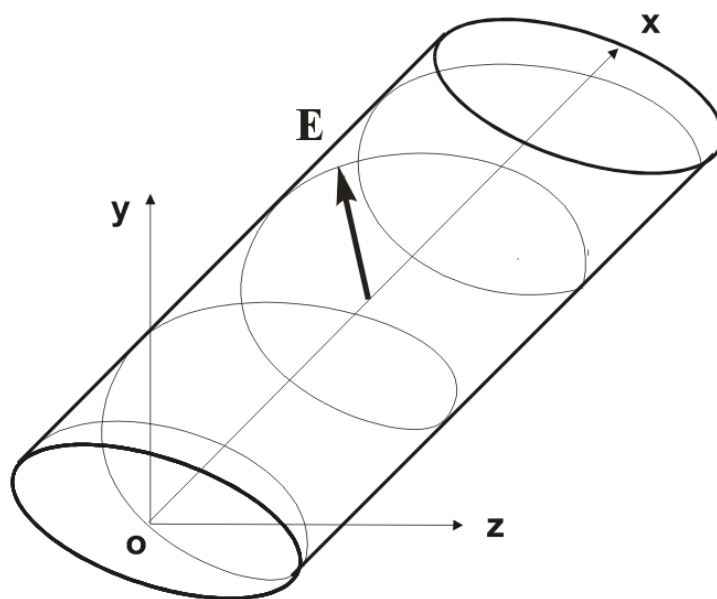


Рис. 4. Эллиптически поляризованная волна.

Кристаллическая пластинка, при прохождении которой разность оптических путей обыкновенной и необыкновенной волн составляет:

$$\Delta = l \cdot |n_o - n_e| = (2m + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad (1)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ , называется четвертьволновой пластинкой.

Если линейно поляризованный свет падает нормально на такую пластинку, то выходящий из нее свет будет в общем случае эллиптически поляризован. Оси эллипса будут параллельны главным направлениям пластинки. Если плоскость поляризации падающего на пластинку луча делит пополам угол между главными направлениями ( $\alpha = 45^\circ$ , Рис. 3) то свет, выходящий из пластинки в четверть волны, будет поляризованным по кругу.

Кристаллическая пластинка, вносящая разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами:

$$\Delta = l \cdot |n_o - n_e| = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $m = 0, 1, 2 \dots$ , называется полуволновой пластинкой.

На выходе из такой пластинки обыкновенный и необыкновенный лучи, складываясь, вновь дают линейно поляризованный свет, однако его плоскость поляризации окажется повернутой на угол  $2\alpha$  ( $\alpha$  - угол между плоскостью колебаний вектора  $\mathbf{E}$  в падающей волне и осью пластинки).

Как видно из соотношений (1) и (2) *четвертьволновая и полуволновая пластинки являются таковыми только для определенной длины волны света.*

Основной задачей данной работы является ознакомление с методами получения света с различными видами поляризации и со способами исследования состояния поляризации светового пучка.

Для волновых пластинок, которые используются в данной работе, необходимо использовать зелёный свет.

Оптические элементы и аппаратура (Рис. 5 и Рис. 6):

- ✓ оптическая скамья (1);
- ✓ светодиодные излучатели (красный, зелёный и синий) с блоком питания (2);
- ✓ собирающая линза с фокусным расстоянием 50 мм (3);
- ✓ поляроиды: поляризатор Р (4) и анализатор А (5);
- ✓ кристаллическая пластинка  $C_1$  (6);
- ✓ кристаллическая пластинка  $C_2$  (7);
- ✓ цифро-аналоговый мультиметр (8);
- ✓ селеновый фотоэлемент (9).

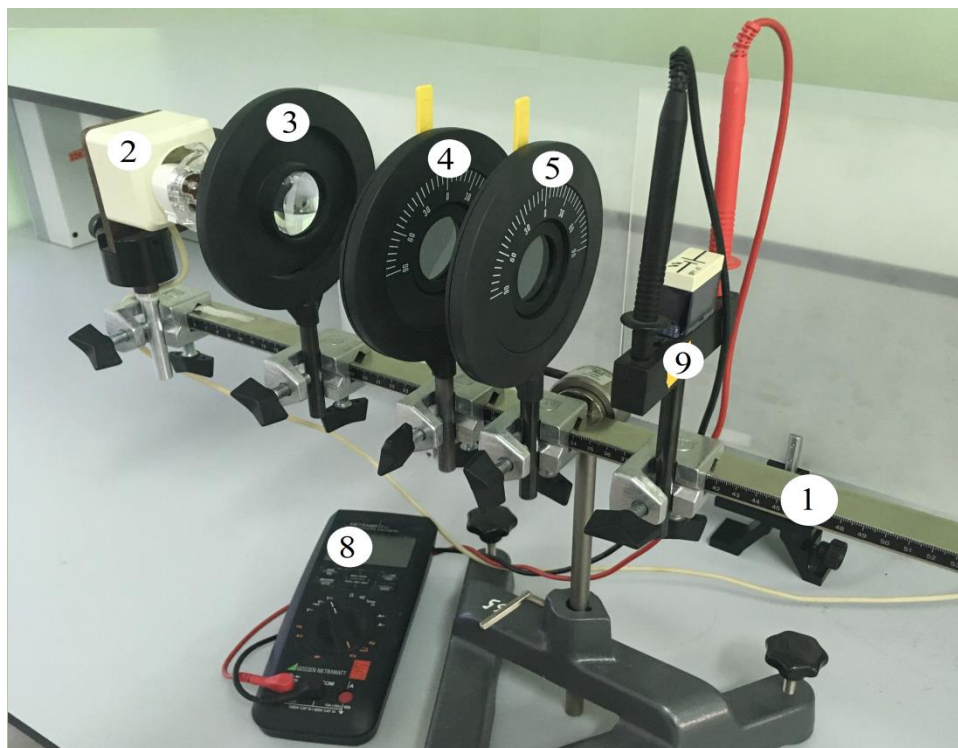


Рис. 5. Общий вид установки

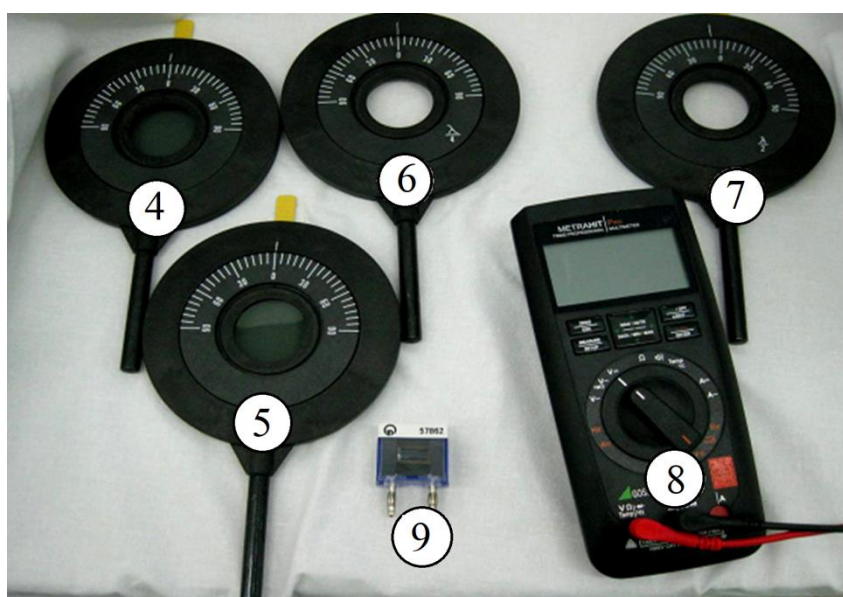


Рис. 6 Отдельные детали установки

## Порядок выполнения работы:

### Упражнение 1. Проверка закона Малюса.

1. Установить на расстоянии 8-10 см от края оптической скамьи линзу 3. На расстоянии 40 см от линзы установить фотоэлемент 9. Оптический центр линзы и центр входного окна фотоэлемента должны располагаться на высоте около 12 см от оптической скамьи. Эти две точки задают оптическую ось установки.
2. С другой стороны линзы установить блок светодиодных излучателей и включить его в сеть. Перемещая блок, установить зелёный светодиод так, чтобы сформированный линзой пучок света полностью проходил сквозь входное окно фотоэлемента. Включить мультиметр 8 и установить режим измерения постоянного напряжения. Мультиметр будет регистрировать фотоэдс, возникающую в фотоэлементе. **Эта величина пропорциональна интенсивности света, падающего на фотоэлемент.** Небольшим перемещением светодиода вдоль и поперёк оптической оси добейтесь максимального значения фотоэдс.
3. Перед фотоэлементом, вплотную к нему, установить анализатор А. При таком положении анализатора внешняя паразитная засветка фотоэлемента будет минимальной. Поверните анализатор на отметку  $0^0$ .
4. Вплотную к анализатору установить поляризатор Р. Поверните его на отметку  $0^0$ . В этом случае плоскости пропускания Р и А совпадают, и интенсивность света, проходящего через эту систему, максимальна ( $I_{\max}$ ). Зафиксируйте это значение. Поверните анализатор на  $90^0$ . В этом случае Р и А окажутся скрещенными, и интенсивность прошедшего света должна быть равной нулю. Однако мультиметр покажет ненулевое значение: оно соответствует фотоэдс, возникающей от внешней паразитной засветки фотоэлемента ( $I_{\min}$ ). При выполнении измерений из показаний мультиметра нужно вычитать это значение. Считается, что установка отъюстирована, если  $I_{\max} - I_{\min} > 10$  мВ.
5. Вращая анализатор с шагом 5 -  $10^0$ , измерить фотоэдс  $I$  для каждой ориентации анализатора. Провести эти измерения для углов поворота анализатора относительно поляризатора в пределах  $0 \leq \varphi \leq 180^0$  (угол  $\varphi$  следует отсчитывать от направления максимального пропускания поляризаторов). Внимание! При каждом измерении желательно, контролировать значение фоновой засветки  $I_{\min}$ , прикрывая светодиод черной бумагой.
6. Построить график зависимости  $(I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min})$  от угла  $\varphi$ .
7. Для сравнения с теоретическим законом на той же координатной сетке построить график функции  $y = \cos^2 \varphi$ . Можно ли утверждать, что закон Малюса выполняется?

Упражнение 2. Определение главных направлений кристаллической пластинки  $C_1$ .

1. Отодвиньте поляризатор Р от анализатора на 5 - 6 см. Поверните поляризатор до отметки  $0^\circ$ , а анализатор - до отметки  $90^\circ$  (скрещенное положение поляризаторов).
2. Установить между Р и А кристаллическую пластинку  $C_1$ . Последовательно поворачивая пластинку от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $5-10^\circ$ , измерить в каждом положении пластинки величину  $I$  и  $I_{\min}$ .
3. Построить график зависимости  $I - I_{\min}$  от угла поворота пластинки.
4. Найти по этому графику значения углов ориентации пластинки, при которых интенсивность прошедшего через систему света будет минимальной. Запишите эти углы: они определяют ориентацию главных направлений кристаллической пластинки.

Упражнение 3. Исследование поляризации света, вышедшего из пластинки  $C_1$ .

1. Поверните пластинку  $C_1$  так, чтобы одно из главных направлений составило угол  $\alpha = 30^\circ$  с направлением пропускания поляризатора. Вращая анализатор, измерьте зависимость фотоэда от угла поворота анализатора  $\varphi$  в пределах угла  $\varphi$  от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $5-10^\circ$  (положение пластинки при этом менять не нужно).
2. Построить график зависимости  $I - I_{\min}$  от  $\varphi$ .
3. Повернуть пластинку  $C_1$  так, чтобы одно из главных направлений составило угол  $\alpha = 45^\circ$  с направлением пропускания поляризатора, и повторить пункты 1 и 2.
4. Объясните полученные зависимости. Является ли пластинка  $C_1$  полуволновой? Четвертьволновой?

Упражнение 4. Исследование поляризации света, вышедшего из пластинки  $C_2$ .

1. Установить между Р и А кристаллическую пластинку  $C_2$ .
2. Определить главные направления этой пластинки (см. упражнение 2).
3. Поверните пластинку  $C_2$  так, чтобы одно из главных направлений составило угол  $\alpha = 45^\circ$  с направлением пропускания поляризатора. Измерить зависимость фотоэда от угла  $\varphi$  поворота анализатора в пределах  $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$  с шагом  $5-10^\circ$ .
4. Построить график зависимости  $I - I_{\min}$  от  $\varphi$ .
5. Является ли пластинка  $C_2$  полуволновой? Четвертьволновой?

Контрольные вопросы :

1. Виды поляризации света.
2. Закон Малюса.
3. Явление двойного лучепреломления.
4. Построение Гюйгенса для одноосных кристаллов.
5. Прохождение линейно поляризованного света через кристаллическую пластинку. Пластинки « $\lambda/2$ » и « $\lambda/4$ ».
6. Анализ поляризованного света.

7. Поляризационные приспособления (поляроиды, поляризационные и двоякопреломляющие призмы).

8. Эксперимент. Анализ результатов эксперимента.

9. Можно ли считать, что поляризаторы, используемые в работе, являются идеальными, т.е. они пропускают свет одной линейной поляризации и полностью задерживают свет ортогональной поляризации?

Рекомендуемая литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.7, М., Физматлит, 2021. Главы XVI, XVII, XVIII.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005. §62, §§75–79.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 5. Лань, 2022. Глава 6.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.3, С-Пб., Лань, 2022. §1.2, §§4.1–4.4.
5. Годжаев Н.М. Оптика., М., Высшая школа, 1977. Глава IX.

Составители: А.И.Фишман, И.Н.Грачева