

Лабораторная работа № 4.10

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЗАКОНЫ МАЛЮСА И БРЮСТЕРА

Цель работы

- Исследование характера поляризации лазерного излучения и экспериментальная проверка законов Малюса и Брюстера.

Теория эксперимента

Поперечные волны обладают особым, присущим только им, свойством, известным под названием поляризация. Под этим понимается пространственное соотношение между направлением распространения светового луча и направлением колебания вектора напряженности электрического \vec{E} или магнитного \vec{H} поля. Теория Максвелла для электромагнитной волны утверждает только, что векторы напряженности электрического и магнитного полей лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, но не накладывает никаких ограничений на их поведение в этой плоскости. Друг относительно друга вектора \vec{E} и \vec{H} ориентированы взаимно перпендикулярно. Поэтому для описания колебаний в световой волне достаточно указывать один из них. Исторически таким вектором выбран вектор напряженности электрического поля \vec{E} , который также называют световым.

Если при распространении световой волны направление колебаний электрического вектора \vec{E} бессистемно, хаотически изменяется с равной амплитудой и, следовательно, любое его направление в плоскости, перпендикулярной распространению волны, равновероятно, то такой свет называют неполяризованным, или естественным. Если колебания электрического вектора фиксированы строго в одном направлении, свет называется линейно-или плоскополяризованным. В этом случае плоскость, образованная направлением распространения электромагнитной волны и направлением

колебаний вектора напряженности электрического поля, называется плоскостью поляризации электромагнитной волны.

Если конец электрического вектора описывает эллипс или окружность, поляризация будет соответственно эллиптической или круговой (циркулярной). Для анализа поляризации света применяются устройства, называемые поляризаторами. С технической стороны поляризаторы могут быть самых разных типов: кристаллические, пленочные, отражательные и т.п. Но независимо от конкретного устройства, поляризатор пропускает свет с определенной ориентацией вектора \vec{E} . Таким образом, прошедший через поляризатор свет всегда линейно поляризован.

Широкое распространение для получения плоско-поляризованного света имеют поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма – селективного поглощения света в зависимости от направления колебаний электрического вектора световой волны. Сильным дихроизмом обладают кристаллы турмалина. В данной работе для получения плоско-поляризованного света применяются поляроиды – пленки на которые нанесены кристаллики герпатита – двоякопреломляющего вещества с сильно выраженным дихроизмом в видимой области.

Поляризаторы можно использовать и в качестве анализаторов – для определения характера и степени поляризации интересующего нас света. Пусть на анализатор падает линейно-поляризованный свет, вектор \vec{E}_1 которого составляет угол ϕ с плоскостью пропускания P (рис.1), где направление светового пучка перпендикулярно к плоскости рисунка). Анализатор пропускает только ту составляющую вектора \vec{E}_1 , которая параллельна его плоскости пропускания P , т.е. $E_2 = E_1 \cos \phi$. Интенсивность пропорциональна квадрату модуля светового вектора ($I \sim E^2$), поэтому интенсивность прошедшего света:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \phi \quad (1)$$

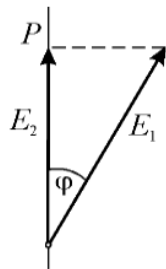


Рис. 1. Закон Малюса

где I_1 интенсивность падающего плоско-поляризованного света. Это соотношение было установлено в 1810 г. французским физиком Этьеном Луи Малюсом и носит название закона Малюса.

Одной из количественных характеристик поляризации является **степень поляризации** P . Для ее определения измеряется интенсивность прошедшего света при вращении поляризатора вокруг направления светового пучка. Определяются максимальная I_{max} и минимальная I_{min} интенсивности (соответствующие двум ортогональным ориентациям поляризатора) и вычисляется величина P по формуле:

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2)$$

Поляризация света наблюдается при отражении и преломлении света на границе прозрачных изотропных диэлектриков. Если угол падения естественного света на границу раздела двух прозрачных диэлектриков отличен от нуля, то отраженный и преломленный пучки оказываются частично-поляризованными (рис.??). В отраженном свете преобладают колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к плоскости падения, а в преломленном свете — параллельные плоскости падения.

Степень поляризации обеих волн (отраженной и преломленной) зависит от угла падения. Соответствующую зависимость в 1815 г. установил шотландец Дэвид Брюстер. Как показали опыты, отраженный луч оказывается полностью поляризованным (колебания вектора в нем перпендикулярны плоскости падения) в случае, когда угол между отраженным и преломленным лучом равен 90° . Прошедший луч поляризован частично и содержит преимущественно параллельную составляющую вектора \vec{E} .

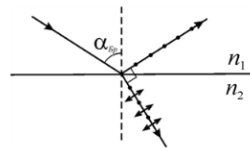


Рис. 2. Поведение света на границе раздела двух сред

Объяснение эффекту Брюстера дал в 1823г. один из создателей волновой теории света французский физик Огюст Френель. Он до-

казал, что коэффициенты отражения для света, поляризованного параллельно и перпендикулярно плоскости падения, равны

$$R_{\parallel} = \left(\frac{\tan \alpha - \beta}{\tan \alpha + \beta} \right)^2; \quad (3)$$

$$R_{\perp} = \left(\frac{\sin \alpha - \beta}{\sin \alpha + \beta} \right)^2. \quad (4)$$

Значение угла, соответствующего полной поляризации отраженного луча, определяется из закона преломления:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin 90^\circ - \alpha} = \tan \alpha, \quad (5)$$

т.е.

$$\tan \alpha_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (6)$$

Соответствующий угол падения называют углом Брюстера.

Если на границу раздела двух диэлектриков под углом Брюстера падает плоско-поляризованный свет (например, от лазера) с направлением колебаний вектора \vec{E} в плоскости падения волны, то интенсивность отраженной волны становится близкой к нулю. Однако коэффициент отражения при этом равен

$$\frac{(n_{21}^2 - 1)^2}{(n_{21}^2 + 1)^2}, \quad (7)$$

что для границы раздела воздух–стекло равно примерно 0,15. Поэтому получать таким образом линейно-поляризованный свет энергетически невыгодно.

Степень поляризации преломленной волны при угле падения, равном углу Брюстера, достигает максимального значения, однако эта волна остается лишь частично поляризованной со степенью поляризации

$$P = \frac{(n^2 - 1)^2}{2(n^2 + 1)^2 - (n^2 - 1)^2}. \quad (8)$$

Для границы воздух–стекло степень поляризации прошедшего

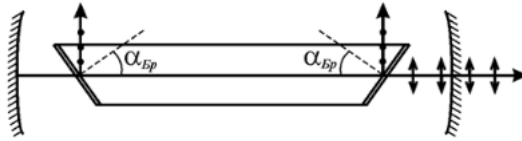


Рис. 3. Принципиальная схема лазера

света всего 8%, повысить ее можно путем ряда последовательных отражений и преломлений. Это осуществляют с помощью, так называемой стопы Столетова, состоящей из нескольких одинаковых и параллельных друг другу пластинок, установленных под углом Брюстера к падающему свету. При достаточно большом числе пластинок проходящий через эту систему свет будет практически полностью линейно-поляризованным. Интенсивность прошедшего через такую стопу света (в отсутствие поглощения) будет равна половине падающего на стопу естественного света.

Эта идея нашла высокоэффективное использование в лазерах, где торцы разрядной трубки представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера к оси трубки (рис.3).

Поэтому излучение, распространяющееся вдоль оси трубки между зеркалами и поляризованное в плоскости падения на пластинки, многократно проходит сквозь них практически беспрепятственно, не испытывая отражения. В результате из лазера выходит луч, поляризованный в этой плоскости, что и показано на рисунке. Для другой составляющей излучения, плоскость поляризации которой перпендикулярна плоскости падения, из-за отражений коэффициент усиления оказывается меньше единицы и генерация отсутствует. Таким образом, излучение лазера оказывается линейно поляризованным.

Описание установки

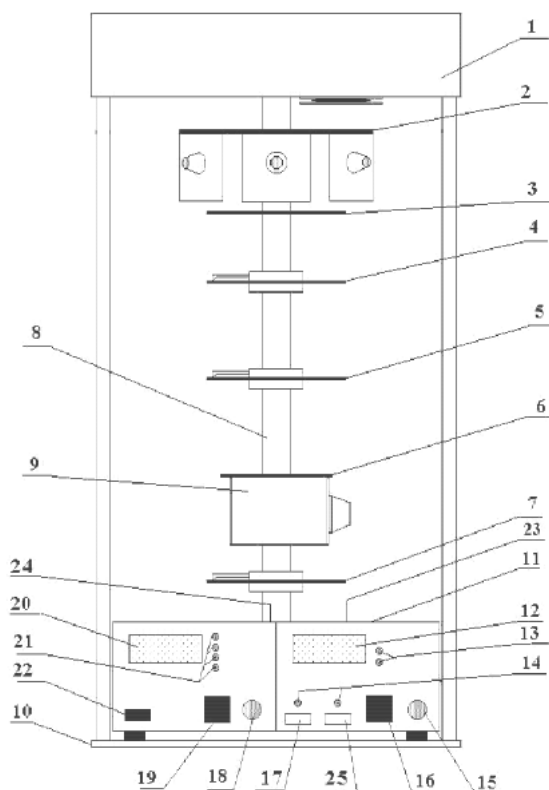


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Механический блок состоит из основания 10, на котором установлены и закреплены электронный блок 11, стойка 8, служащая вертикальной оптической скамьей и блок осветителей 1. Источниками освещения служат полупроводниковый лазер и лампа накаливания. На стойке смонтированы следующие оптические узлы:

- Турель 2, на которой смонтированы объекты исследования для работ по интерференции и дифракции. Каждый из объектов закреплен на вращающейся втулке, ось которой совпадает с серединой объекта. Втулка снабжена указателем, а основание – угломерной шкалой и пиктограммой объекта исследования.
- Защитный экран 3 предназначен для защиты от отраженного от дифракционного элемента лазерного луча.
- Поляризатор 4 закреплен на турел и во вращающейся обойме со стрелкой - указателем и транспортом. При выполнении работ, в которых не требуется поляризатор, турель поляризатора может поворачиваться и выводиться из поля зрения.
- Анализатор 7, выполнен аналогично 4.
- Двухлучепреломляющий одноосный образец 5, используемый в работах по поляризации света, конструктивно выполнен аналогично 4.
- Блок 6 для измерения угла Брюстера состоит из стеклянной пластинки с поворотным устройством и отсчетной вертикальной шкалой 9, закрепленной на стойке 8.

Электронный блок содержит следующие органы управления, коммутации и индикации: 2 – индикаторы измерений блока амперметра-вольтметра; 13 – индикатор режима измерений блока амперметра-вольтметра; 14 – индикаторы включенного источника; 15 – регулятор накала белого осветителя; 16 – кнопка переключения режима измерений блока амперметра-вольтметра; 17 – кнопка включения лазера; 18 – ручка установки относительной интенсивности J/J_0 ; 19 – кнопка переключения фотоприемников; 20 – индикатор относительной интенсивности излучения; 21 – индикаторы включенного фотоприемника; 22 – кнопка «Сеть»; 23 – окно фотоприемников белого осветителя; 24 – окно фотоприемника лазерного излучения; 25 – кнопка включения лампы.

Порядок выполнения работы

При проведении эксперимента необходимо учитывать то, что в анализаторе теряется часть световой энергии. Поэтому закон Малюса будет иметь следующий вид:

$$I_{\text{пр}} = kI \cos^2 \phi, \quad (9)$$

где $I_{\text{пр}}$ - интенсивность света, прошедшего через анализатор, I — интенсивность плоско-поляризованного падающего света, k — коэффициент пропускания, который можно найти по следующим формулам:

$$k_{\parallel} = \frac{I_{\text{max}}}{I}; \quad (10)$$

$$k_{\perp} = \frac{I_{\text{min}}}{I}, \quad (11)$$

где I_{max} , I_{min} - максимальная и минимальная интенсивности прошедшего света, найденная при вращении анализатора.

Упражнение 1. Проверка закона Малюса

1. Включите установку кнопкой 22. Кнопкой 19 выбора фотоприемников выберите фотоприемник 4. Включите лазер (кнопка 17). Убедитесь, что излучение беспрепятственно достигает фотоприемника. Время непрерывной работы лазера не должно превышать 15 минут!
2. Ручкой установки относительной интенсивности 18 установите значение I_0 в диапазоне 1,5 — 1,6. Запишите это значение, оно соответствует интенсивности излучения лазера $I_{\text{п}}$ еще не ослабленной поляроидом.
3. Установите поляроид 7 (рис.4). Вращая установленный анализатор от 150° справа через 0° до 150° слева, снимите зависимость интенсивности I луча, прошедшего через анализатор, от угла поворота через каждые 10° . Измерения повторить

не менее 2 раз. Данные измерений оформить в виде таблицы. Усреднить полученные значения.

4. Отключите лазер (кнопка 17). Спомощью кнопки 19 выберите фотоприемник 3, подключите белый осветитель (кнопка 25). Поверните турель 2 так, чтобы на пути света было свободное место. Убедитесь, что свет свободно проходит до приемника.
5. Ручкой установки относительной интенсивности 18 установите значение интенсивности источника белого света I'_0 диапазоне 1,5 — 1,6. Запишите это значение.
6. Введите поляризатор (4). Запишите значение I' относительной интенсивности света, прошедшего через поляризатор. Сравните его со значением I'_0 .
7. Вращая поляризатор, найдите максимальное и минимальное значения интенсивности прошедшего света.
8. Установите поляризатор в нулевое положение, введите анализатор и снимите зависимость интенсивности луча, прошедшего через анализатор, от угла поворота аналогично пункту 3.

Упражнение 2. Определение угла Брюстера

1. Установите на пути лазерного луча устройство для определения угла Брюстера. Включите лазер, выберите фотоприемник 4. Время непрерывной работы лазера не должно превышать 15 минут!
2. Установить поляризатор 4 в положение 00(анализатор должен быть убран). Теперь после поляризатора распространяется свет, плоскость колебаний светового вектора E , в котором лежит в плоскости падения его на стеклянную пластинку.
3. Вращая стеклянную пластинку вокруг горизонтальной оси с помощью расположенных на ее оси ручек наблюдайте за

изменениями интенсивности луча лазера, отраженного на вертикальную шкалу. По минимуму интенсивности **отраженного** луча определите угол Брюстера. Запишите полученное значение и сравните его с табличным.

4. В диапазоне углов наклона стеклянной пластинки от 30° до 65° с шагом 2° запишите интенсивность прошедшего света. Измерения повторите в прямом и обратном направлении. Оформите в виде таблицы.
5. Установите пластинку под углом Брюстера. Поляризатор установите под углом 45° . Введите анализатор. Найдите интенсивность прошедшего света при положениях анализатора 0° и 90° .
6. Не меняя угла поворота пластинки установите приспособление для измерения угла Брюстера и анализатор на пути белого света. Отключите лазер, включите источник белого света, выберите фотоприемник 3. Вращая анализатор, найдите максимальную и минимальную интенсивность прошедшего света. Поляризатор 4 не используется.

Обработка результатов

Обработка результатов упражнения 1

1. Найдите по данным п.1 упражнения 1 найдите степень поляризации лазерного излучения с помощью формулы 2.
2. Найдите максимальное значение интенсивности излучения, прошедшего сквозь поляризатор I_{max} , соответствующее углу ϕ_m . Получите нормированные значения относительной интенсивности $I_{отн} = \frac{I}{I_{max}}$. Это значение будет лежать в пределах от 0 до 1. Результаты занесите в таблицу.
3. Постройте график зависимости нормированной интенсивности $I_{отн}$ от угла поворота поляроида ϕ в полярных координатах, для чего из начала координат проведите с помощью

транспортира вспомогательные линии (оси) с шагом в 10. Выберите масштабную единицу (прочертите единичную окружность). Затем на каждой оси отметьте точкой соответствующее значение нормированной интенсивности. Соедините полученные экспериментальные точки аппроксимирующей кривой.

4. На той же координатной плоскости постройте график зависимости $\cos^2(\phi - \phi_m)$ от угла поворота поляроида ϕ . Сравните полученные зависимости. Укажите вид поляризации лазерного излучения.
5. Найдите коэффициенты пропускания использованного поляроида для параллельной и перпендикулярной ориентации его плоскости пропускания по отношению направлению колебаний вектора \vec{E} в излучении лазера: $k_{\parallel} = \frac{I_{max}}{I_n}$ и $k_{\perp} = \frac{I_{min}}{I_n}$.
6. Найдите степень поляризации излучения белого источника.
7. На той же координатной плоскости по данным п.8 постройте зависимость для белого света.
8. Найдите степень линейной поляризации белого света, прошедшего через поляризатор.

Обработка результатов упражнения 2

1. Вычислите по формуле 6 показатель преломления стекла.
2. Найдите степень поляризации света после прохождения его через пластинку по данным п.4. Сравните с расчетом по формуле (8).
3. Найдите степень поляризации белого света после прохождения его через пластинку по данным п.6. Сравните с результатом, полученным в п. 2 и в п.5 упражнения 1, а также с расчетом по формуле (8).

Контрольные вопросы

1. Чем отличается линейно-поляризованный свет от естественного?
2. Чем отличается линейно-поляризованный свет от света, поляризованного по кругу?
3. Чему равна степень поляризации циркулярно-поляризованного света?
4. Можно ли имея в распоряжении поляризатор и анализатор определить тип поляризации света (линейная, круговая, эллиптическая).
5. Как зависит угол Брюстера от показателя преломления первой среды?
6. Как зависит угол Брюстера от показателя преломления второй среды?
7. Какова связь между углами Брюстера при падении света на границу воздух–стекло со стороны воздуха и со стороны стекла?
8. Из формул Френеля (3) выведите формулу (7).
9. Из формул (2) и (5) выведите формулу для степени поляризации прошедшего излучения, если на границу раздела под углом Брюстера падает естественный свет.