

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики, электротехники и автоматики

Лабораторная работа № 56

ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА
ЗАКОНОВ БРЮСТЕРА И МАЛЮСА

Методические указания
к лабораторным работам по физике
для студентов всех направлений подготовки

Казань

2020

УДК 535
ББК 22.34
С 36

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов всех специальностей. Лабораторная работа №56 «ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНОВ БРЮСТЕРА И МАЛЮСА»/ Сост.: В.И.Сундуков, Э.М.Ягунд, Казань: КГАСУ, 2020 г.- 10 с.

Данные методические указания являются составной частью методического обеспечения аудиторной и самостоятельной работы студентов всех специальностей. В работе рассмотрены некоторые вопросы теории поляризации света. Приводится описание экспериментальной установки, на которой проверяются законы Малюса и Брюстера и изложена методика проведения эксперимента.

Стр.10, рис. 8, табл.1.

Рецензент
доцент кафедры теплоэнергетики В.Н. Енюшин

УДК 535
ББК 22.34

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2020 г.
© Сундуков В.И., 2020
© Ягунд Э.М., 2020

Цель работы: Ознакомление с теорией поляризации света. Проверка закона Брюстера и определение относительного показателя преломления стекла. Сравнение полученных экспериментальных зависимостей силы света от угла между поляризатором и анализатором с законом Малюса.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ.

1. Электромагнитная природа света

Согласно теории Максвелла, свет представляет собой электромагнитные волны, в которых происходит периодическое изменение (колебание) напряжённости E электрического поля и индукции B магнитного поля волны. Уравнение плоской монохроматической электромагнитной волны, распространяющейся вдоль координатной оси x , имеет вид:

$$E = E_m \cos(\omega t - \kappa x),$$

$$B = B_m \cos(\omega t - \kappa x),$$

где E_m и B_m — амплитудные значения напряжённости электрического и индукции магнитного полей соответственно, $\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота колебаний, ν — частота колебаний, $\kappa = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны. Направления колебаний векторов \vec{E} и \vec{B} взаимно перпендикулярны и перпендикулярны к скорости v распространения световой волны (рис. 1). Поэтому световая волна является поперечной. Принято называть *плоскость, в которой колеблется напряжённость \vec{E} электрического поля, плоскостью поляризации*.

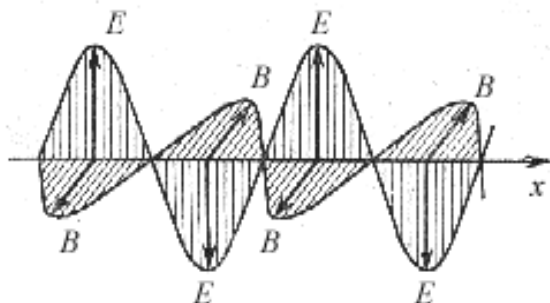


Рис. 1

упоминаться не будет.

Опытным путём установлено, что физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света обусловлены электрическим полем световой волны. Поэтому в дальнейшем будет говорить лишь о напряжённости \vec{E} электрического поля, а об индукции \vec{B} магнитного поля

2. Явление поляризации света

Доказательством поперечности световых волн, следовательно, и любых электромагнитных волн, является поляризация света. Выясним, в чём же заключается это явление?

Световая волна, испускаемая светящим телом, представляет собой наложение огромного количества волн, излучаемых отдельными атомами. Атомы излучают свет независимо друг от друга. Поэтому плоскости поляризации в таких волнах имеют произвольную ориентацию в пространстве. Следовательно, в световой волне, излучаемой обычными (естественными) источниками света, колебания вектора \vec{E}

происходят во всевозможных направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны (рис. 2) (стрелками показаны амплитуды E_m колебаний напряжённости электрического поля). Световая волна, в которой колебания вектора \vec{E} совершаются в различных направлениях (рис. 2), называется **естественной** или **неполяризованной**.

Если с помощью каких-либо приспособлений удаётся добиться преобладания колебаний вектора \vec{E} в каком-нибудь направлении, то такой свет называется частично поляризованным. Если же колебания напряжённости электрического поля происходят только в одной плоскости, то такой свет называют **плоско поляризованным** (рис. 3).

Итак, явление поляризации света заключается в преобразовании естественного света в поляризованный свет.

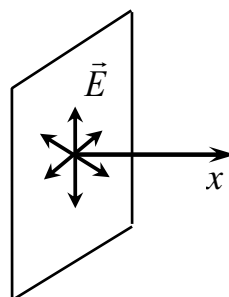


Рис. 2

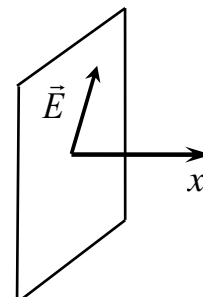


Рис. 3

2. Закон Малюса

Устройства, служащие для получения плоско поляризованного света, называются **поляризаторами**. Те же устройства, применяемые для исследования поляризации света, называют **анализаторами**. Характерной особенностью этих устройств является то, что они полностью пропускают световые волны, в которых вектор электрической напряжённости параллелен определённой плоскости, и поглощают волны, в которых вектор \vec{E} перпендикулярен к этой плоскости. В случае поляризатора эта плоскость называется **плоскостью пропускания поляризатора**, а в анализаторе — **плоскостью пропускания анализатора**. Найдём интенсивность света I_A , прошедшего через поляризатор и анализатор, поставленных так, что плоскость пропускания поляризатора $ПП$ и плоскость пропускания анализатора $АА$ составляют собой некоторый угол α

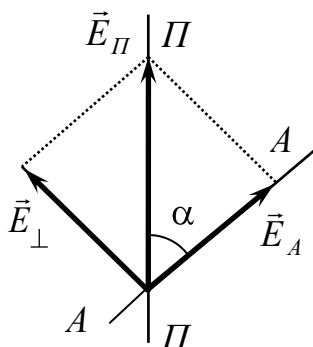


Рис. 4

(рис. 4). Поляризатор пропускает свет, в котором вектор электрической напряжённости \vec{E}_\parallel параллелен плоскости пропускания поляризатора $ПП$. Обозначим через E_\parallel модуль вектора \vec{E}_\parallel , а интенсивность этого света через I_\parallel . Разложим \vec{E}_\parallel на вектор \vec{E}_A , параллельный плоскости пропускания анализатора $АА$, и вектор \vec{E}_\perp , перпендикулярный к ней. Составляющая \vec{E}_\perp будет задержана анализатором, а составляющая \vec{E}_A пройдёт через него. Из рис. 4 видно, что модуль E_A этого вектора равен:

$$E_A = E_\parallel \cos \alpha. \quad (1)$$

Известно, что интенсивность волны пропорциональна квадрату её амплитуды. Поэтому для данного случая запишем:

$$I_A = aE^2, \quad I_\parallel = aE^2, \quad (2)$$

где a — некоторый коэффициент пропорциональности. Возводя обе части равенства (1) в квадрат и умножая на a , с учётом (2) получаем:

$$I_A = I_{\Pi} \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

Соотношение (3) называют законом Малюса: *интенсивность света, прошедшего через анализатор, равна произведению интенсивности света, прошедшего через поляризатор, на квадрат косинуса угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.*

Из формулы (3) видно, что наибольшая интенсивность I_A , равная I_{Π} , получается при $\alpha = 0$. В этом случае говорят, анализатор и поляризатор параллельны. При $\alpha = \pi/2$, $I_A = 0$, т.е. свет через анализатор не проходит. Анализатор и поляризатор в этом случае называют скрещенными.

4. Закон Брюстера

Пусть на границу раздела двух диэлектриков с показателями преломления n_1 и n_2 падает естественный свет под некоторым углом падения φ . (Показателем преломления n называется отношение скорости света c в вакууме к скорости света v в среде, т.е. $n = c/v$. Относительным показателем преломления n_{21} называют отношение показателя преломления n_2 второй среды к показателю преломления n_1 первой, т.е. $n_{21} = n_2/n_1$). При этом часть света отражается, а часть его преломляется. Опытным путём установлено, что отражённый и преломлённый свет при этом будут частично поляризованными. В отражённом свете преобладают колебания электрической напряжённости \vec{E} , перпендикулярные к плоскости падения луча, а в преломлённом свете — колебания вектора \vec{B} , происходящие в плоскости падения (рис. 5). (На рис. 5 точками обозначены колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к плоскости падения, чёрточками — колебания вектора \vec{E} , происходящие в плоскости падения). **Плоскостью падения** называется плоскость, проходящая через падающий луч и нормаль к границе раздела сред, проведённую в точке падения луча. Исследования, проведённые Брюстером, показали, что степень поляризации света зависит от угла падения. При этом он обнаружил, что отражённый свет будет полностью поляризован, если тангенс угла падения равен относительному показателю преломления этих сред, т.е.

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{Б}} = n_{21}. \quad (4)$$

Угол $\varphi_{\text{Б}}$, при котором отражённый свет будет полностью поляризован, называется **углом Брюстера** или **углом полной поляризации**. Следует отметить, что при падении естественного света под углом Брюстера в отражённом свете будут присутствовать лишь колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к плоскости падения, а в преломлённом — преимущественные колебания вектора \vec{E} в плоскости падения. При этом степень поляризации достигает максимального значения, но полностью поляризованным свет не будет.

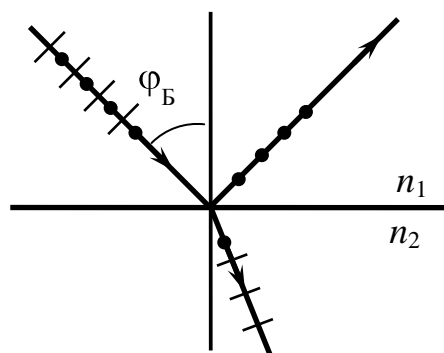


Рис. 5

Отражение под углом Брюстера даёт простейший способ получения плоско поляризованного света.

5. Двойное лучепреломление

При падении света на некоторые кристаллы световой луч разделяется на два луча. Это явление было открыто в 1669 г. Бартолини и получило название двойного лучепреломления. Двойное лучепреломление наблюдается во всех прозрачных кристаллах, кроме кристаллов, относящихся к кубической системе. Однако лучи, проходящие через двулучепреломляющий кристалл, не всегда испытывают двойное лучепреломление. *В кристаллах имеется одно или два направления, вдоль которых свет распространяется, не претерпевая двойного лучепреломления.* Эти направления называют **оптической осью кристалла**. Понятие оптической оси кристалла отличается от понятия оси, принятого в геометрии. Оптическая ось кристалла не является одной какой-либо особой прямой в кристалле, подобной, например, оптической оси линзы или оси симметрии тела. В какое бы место кристалла ни падали лучи, двойное лучепреломление не происходит, если лучи падают параллельно направлению оптической оси.

Кристаллы, в которых существует только одна оптическая ось, называются **одноосными**, а две оси — **двуосными**. Рассмотрим лишь одноосные кристаллы, так как они имеют наибольшее практическое применение.

Пусть на грань кристалла, имеющего форму параллелепипеда, нормально падает узкий пучок естественного света. Оптическая ось кристалла составляет с гранью параллелепипеда некоторый угол, не равный 90° . Оптическая ось в кристалле изображена двусторонней стрелкой (рис. 6).

В результате двойного лучепреломления образуется два луча. Обозначим их буквами o и e . Луч o удовлетворяет закону преломления света, справедливому для изотропных сред. Поэтому его называют **обыкновенным**. Луч e , вопреки закону преломления, меняет своё направление, хотя угол падения и равен нулю. В общем случае он не лежит даже в плоскости падения, т.е. ведёт себя необычно по сравнению с лучом o и поэтому называется **необыкновенным**. Следует отметить, что названия обыкновенный и необыкновенный луч имеют смысл только внутри кристалла, так как вне кристалла различить их нельзя.

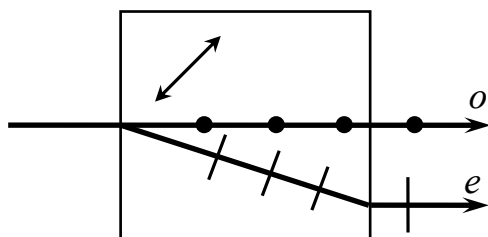


Рис. 6

Обыкновенный и необыкновенный лучи плоско поляризованные, колебания электрической напряжённости \vec{E} в этих лучах происходят во взаимно перпендикулярных направлениях. (На рис. 6 точками обозначены колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к плоскости рисунка, черточками — колебания вектора \vec{E} , параллельные ей).

6. Поляризаторы света

Имеются различные виды поляризаторов света. Рассмотрим те, которые получили наиболее широкое распространение.

Поляризационные призмы состоят из двух призм, изготовленных из одноосного кристалла с одинаковой или различной ориентацией оптических

осей. Эти призмы склеиваются между собой прозрачными веществами. Для изготовления подобных призм используются исландский шпат, кварц и другие кристаллы, которые склеиваются между собой канадским бальзамом, льняным маслом, глицерином и другими материалами.

Рассмотрим принципиальное устройство одной из поляризационных призм (рис. 7). Из какого-либо одноосного кристалла вырезаются две призмы ABD и BCD , причём оптическая ось кристалла составляет определённый угол с гранями AD и BC . Эти призмы склеиваются по грани BD клеем.

Луч света, падая на грань AB кристалла, разделяется на обыкновенный o и необыкновенный e .

Двугранные углы ADB и CBD равны между собой и подбираются так, чтобы необыкновенный луч e проходил через слой клея, а обыкновенный o претерпевал на нём полное внутреннее отражение. Затем обыкновенный луч поглощается в оправе призмы. В результате свет, выходящий из призмы, будет плоско поляризованным. (На рис. 7 двусторонней стрелкой показана оптическая ось кристалла, точками и чёрточками — колебания вектора \vec{E} в световом луче, происходящие перпендикулярно и параллельно плоскости падения, соответственно).

2. Турмалин. Для многих кристаллов поглощение света зависит от направления колебания электрической напряжённости. Это явление также используется для получения плоско поляризованного света. К таким кристаллам относится и турмалин. Пластика турмалина толщиной в 1 мм практически полностью поглощает обыкновенный луч и пропускает лишь необыкновенный. Различная степень поглощения двупреломляющим кристаллом обыкновенного и необыкновенного лучей называется **дихроизмом**. Явление дихроизма в различной степени присуще и другим кристаллам. Недостатком турмалина в качестве поляризатора является окрашенность проходящего света и сравнительная дороговизна.

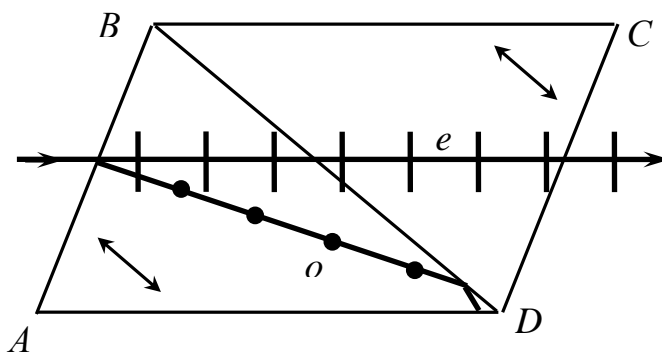


Рис. 7

Различная степень поглощения двупреломляющим кристаллом обыкновенного и необыкновенного лучей называется **дихроизмом**. Явление дихроизма в различной степени присуще и другим кристаллам. Недостатком турмалина в качестве поляризатора является окрашенность проходящего света и сравнительная дороговизна.

3. Поляроиды — это плёночные поляризаторы, состоящие из полимерной пленки, например, целлулоида, в которую введены одинаково ориентированные дихроичные кристаллики, например, герпатита — бисульфата йодистого хинина. Ориентация кристалликов достигается растяжением плёнки. Преимущество поляроидов состоит в их сравнительной дешевизне и возможности придать им большую площадь, но они менее прозрачны, чем исландский шпат.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Как уже указывалось (см. теоретическую часть), при отражении света на границе раздела двух диэлектриков происходит поляризация света. При этом в отражённом свете преобладают колебания напряжённости \vec{E} , происходящие перпендикулярно к плоскости падения. При падении света под углом Брюстера

отражённый свет будет плоско поляризованным. Отсюда следует, что интенсивность, колебание вектора \vec{E} в котором происходит в плоскости падения, должна зависеть от угла падения. При этом при падении света под углом Брюстера интенсивность такого света равна нулю. Итак, угол Брюстера можно найти, исследуя зависимость интенсивности I света, в котором колебание вектора \vec{E} происходит в плоскости падения, от угла падения φ .

Для проверки закона Малюса естественный свет пропускается последовательно через поляризатор и анализатор. Изменяя угол α между плоскостью пропускания поляризатора и анализатора, изучаем зависимость интенсивности света I , прошедшего через анализатор, от $\cos^2\alpha$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

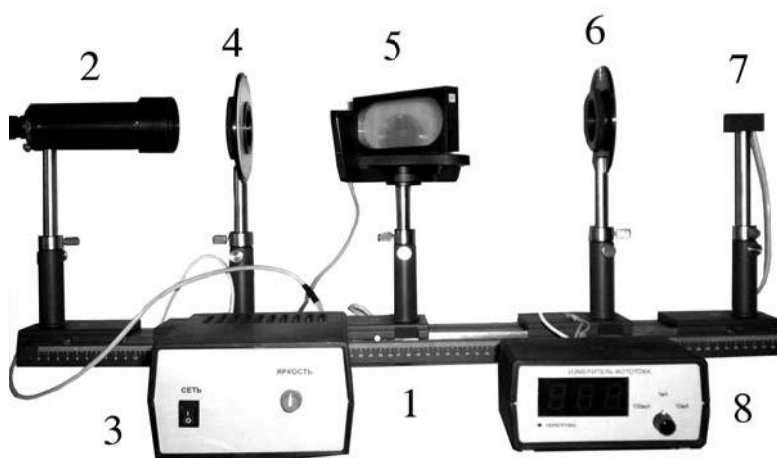


Рис.8. Лабораторная установка.

Лабораторная установка (Рис.8) смонтирована на оптической скамье (станине) длиной 120 см (1). На скамье с помощью рейтеров (подставок) закрепляются в необходимом порядке отдельные элементы оптической схемы: осветитель (2) с регулируемым источником питания (3), поляризатор (4), зачернённая стеклянная пластина (5), анализатор (6), фотоэлемент (7). Стеклопластина установлена на угломерном столике, позволяющем изменять угол падения света, фотоэлемент (7) подключен к измерителю интенсивности света (8) и используется только при изучении закона Малюса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Определение угла Брюстера при отражении света.

Для выполнения эксперимента нужно проделать следующее.

1. Убедиться, что на оптической скамье собрана схема, состоящая из осветителя (2), поляризатора (4), зачернённой стеклянной пластинки (5). Анализатор (6) и фотоэлемент (7) можно отодвинуть вправо.

2. Ручку «Яркость» на передней панели блока питания осветителя (3) поставить в среднее положение.
3. Включить блок питания осветителя. Клавиша включения последнего находится на его задней панели.
4. Установить на вращающейся шкале поляризатора угол 90^0 .
5. Угломерный столик с зачернённой стеклянной поверхностью развернуть таким образом, чтобы угол падения света был около 45^0 . Постараться увидеть отражение осветителя от стеклянной пластинки, поместив свой глаз в соответствующее место. Угол отражения равен углу падения.
6. После того, как увидели отражение, приступите к повороту столика сначала в одну сторону, потом в другую. При этом необходимо постоянно следить за отражением осветителя в стеклянной пластинке.
7. При некотором угле падения должно наблюдаться уменьшение интенсивности света. Добиться, чтобы отражение приходилось на середину стеклянной пластинки, а интенсивность отражённого света была минимальной. Это положение соответствует углу Брюстера.
8. Измерьте этот угол по шкале. Запишите его значение и рассчитайте относительный показатель преломления по соответствующей формуле.

Задание 2. Экспериментальная проверка закона Малюса.

Для выполнения эксперимента нужно проделать следующее.

1. Убрать зачернённую стеклянную пластинку (5) с оптической скамьи.
2. Пододвинуть поближе к анализатору (4) поляризатор (6) и фотоэлемент (7).
3. Включить измеритель интенсивности света, переключателем подобрать необходимую его чувствительность.
4. Установить на поворотных угломерных шкалах поляризатора и анализатора углы 0^0 .
5. Поворачивая анализатор (6) в пределах от 0 до 90^0 , записывать значения интенсивности света в относительных единицах через каждые 15^0 .
6. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

| φ, град | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
|----------------------|---|----|----|----|----|----|----|
| $\cos^2 \varphi$ | | | | | | | |
| $I_{\text{отн.ед.}}$ | | | | | | | |
| $I_{\text{норм}}$ | | | | | | | |

7. В положении 90^0 интенсивность прошедшего света равна нулю, хотя часто показания измерителя отличны от нуля. Это обусловлено «плаванием» нуля усилителя и посторонней подсветкой фотоэлемента. Поэтому полученные по-

казания нужно дополнительно обработать. Из всех значений, соответствующим разным углам, необходимо вычесть показания прибора, соответствующие 90^0 и записать полученные значения в последнюю строку.

8. Построить график зависимости отнормированных значений I_{ϕ} от $\cos^2 \varphi$.

9. Отключить от сети установку и показать полученные результаты преподавателю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа света с точки зрения волновой теории?
2. Что называется плоскостью поляризации?
3. В чём заключается явление поляризации света?
4. Закон Малюса (с выводом).
5. Закон Брюстера.
6. В чём заключается явление двойного лучепреломления и какое оно имеет отношение к поляризации света?
7. Что такое оптическая ось кристалла?
8. Какие лучи называются обыкновенными и необыкновенными?
9. Какие типы поляризаторов вам известны?