

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

**Методические указания
для выполнения лабораторной работы**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

Методические указания для выполнения лабораторной работы

ТОМСК
2022

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО учебно-методическим советом
кафедры общей и экспериментальной физики физического факультета

Протокол № 13/22 от «11» июля 2022 г.

Председатель учебно-методического совета

В.П. Демкин

Работа посвящена изучению явления вращения плоскости поляризации света в оптически неактивном веществе, помещенном в магнитное поле.

Методические указания рассчитаны для студентов физических специальностей очной формы обучения.

СОСТАВИТЕЛЬ: *профессор В.П. Демкин*

РЕЦЕНЗЕНТ: *доцент Н.И. Федяйнова*

© Демкин В.П., 2022

© Томский государственный университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ	5
II. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	12
2.1. Описание экспериментальной установки	12
2.2. Порядок выполнения работы	13
2.3. Обработка результатов измерений	14
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	15

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

Цель работы:

Исследование вращения плоскости колебаний линейно поляризованного света в продольном магнитном поле.

Задачи:

1. Определить зависимость угла поворота плоскости колебаний светового вектора для разных длин волн.
2. Вычислить постоянную Верде.
3. Вычислить теоретическое значение постоянной Верде для разных длин волн.
4. Сравнить теоретические и экспериментальные значения постоянной Верде. Сделать выводы.

Приборы и принадлежности:

- Блок питания.
- Источник света.
- Набор светофильтров.
- Электромагнит.
- Образец.
- Два поляризатора.
- Линза.
- Экран.
- Измеритель магнитной индукции.
- Датчик Холла.
- Мультиметр.
- Переключатель направления тока.

Порядок теоретической подготовки к выполнению работы:

Изучить теоретический материал и законспектировать в тетрадь ответы на контрольные вопросы.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом, является вращение плоскости поляризации. Вещества, обладающие способностью вращать плоскость поляризации света, называются оптически активными веществами. Явление естественного вращения плоскости поляризации света было обнаружено французским физиком Араго в 1811 г. Пропуская линейно поляризованный свет сквозь кристалл кварца вдоль оптической оси, он заметил, что плоскость поляризации света поворачивается на некоторый угол относительно первоначального положения.

В 1846 году М. Фарадей обнаружил, что естественное оптически неактивное вещество, помещенное в постоянное магнитное поле, вращает плоскость поляризации, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля. Опыты самого Фарадея, а затем более точные опыты Верде показали, что угол поворота плоскости поляризации φ пропорционален длине пути l света в веществе и индукции B магнитного поля:

$$\varphi = V \cdot l \cdot B, \quad (1)$$

где коэффициент V называется постоянной Верде или магнитной вращательной способностью. Этот коэффициент зависит от рода вещества, его физического состояния и длины световой волны.

Направление магнитного вращения плоскости поляризации определяется направлением внешнего магнитного поля и не зависит от направления распространения света. Знак вращения условно считают положительным, если для наблюдателя, смотрящего по направлению магнитного поля, вращение происходит по часовой стрелке. В этом случае говорят, что вращение происходит вправо. Подавляющее большинство веществ вращает плоскость поляризации вправо.

Магнитное вращение обнаруживают все вещества, но в различной степени. Наибольшей магнитной вращательной способностью обладают некоторые сорта стекла, у которых для длины волны соответствующей желтой линии натрия ($\lambda = 589$ нм), постоянная V доходит до значения 0,1 угл. мин./см Э). Это означает, что при напряженности магнитного поля $H = 1$ Э (79,6 А/м) и $l = 1$ см плоскость поляризации поворачивается всего на одну десятую долю угловой минуты. Очень сильное вращение плоскости поляризации

наблюдается в ферромагнитных материалах Fe, Co, Ni). Для них, однако, угол поворота φ не пропорционален B .

Если тела обладают естественной оптической активностью, то при внесении в магнитное поле их естественная способность вращать плоскость поляризации световой волны, складывается со способностью вращать в магнитном поле. Следует, однако, учитывать, что при естественном вращении направление вращения зависит от направления распространения света.

Феноменологическое объяснение эффекта Фарадея аналогично тому, какое дал Френель явлению естественной оптической активности. Согласно Френелю, любую плоско – поляризованную волну можно разложить на две, распространяющиеся в этом же направлении циркулярно поляризованные волны той же частоты с круговым правым и левым вращением. Вращение плоскости поляризации происходит потому, что эти циркулярно поляризованные волны распространяются в оптически активном веществе с разными фазовыми скоростями, и соответственно, показатели преломления для них будут разные.

Если скорости распространения волн, поляризованных по правому и левому кругу, различны в оптически активном веществе, то после прохождения светом в среде расстояния l фазы волн с правой и левой круговой поляризацией, могут быть найдены из соотношений:

$$\varphi_{\Pi} = \omega \left(t - \frac{l}{v_{\Pi}} \right), \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{Л}} = \omega \left(t - \frac{l}{v_{\text{Л}}} \right), \quad (3)$$

где v_{Π} и $v_{\text{Л}}$ – скорости волн, поляризованных по правому и левому кругу, соответственно, в оптически активной среде.

Результирующий угол φ поворота вектора напряженности электрического поля E может быть определен, как следует из рис.1, соотношением

$$\varphi = \frac{\varphi_{\Pi} - \varphi_{\text{Л}}}{2}, \quad (4)$$

или с учетом формул (2) и (3):

$$\varphi = \frac{\omega l}{2} \left(\frac{1}{v_{II}} - \frac{1}{v_{JI}} \right), \quad (5)$$

Выражая фазовые скорости волн через показатели преломления:

$$v_{II} = \frac{c}{n_{II}} \text{ и } v_{JI} = \frac{c}{n_{JI}}, \text{ получаем}$$

$$\varphi = \frac{\omega l}{2c} (n_{II} - n_{JI}). \quad (6)$$

Учитывая, что $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, окончательно получаем

$$\varphi = \frac{\pi l}{\lambda} (n_{II} - n_{JI}), \quad (7)$$

где λ - длина волны в вакууме.

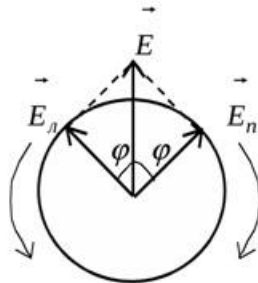


Рис. 1. Представление линейно поляризованного света в виде суперпозиции двух волн, поляризованных по правому и левому кругу

Формула (7) показывает, что оптическая активность веществ объясняется их анизотропной структурой. Оптически активными являются как анизотропные кристаллы, обладающие кубической симметрией, так и некоторые жидкости (скипидар, никотин), их пары, а также растворы (водные растворы сахара и глюкозы, и растворы камфары в бензоле).

От естественной (спонтанной) оптической активности отличают искусственную, или наведенную (индуцированную) оптическую активность, возникающую в результате определенных внешних

воздействий. Особо важное место среди них занимает магнитное поле. Оптически неактивные вещества под действием внешнего магнитного поля приобретают способность вращать плоскость поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося вдоль направления поля, т.е. вещества становятся оптически активными.

Опыты Фарадея, а затем более точные и полные исследования французского математика М. Верде показали, что в случае не очень сильных магнитных полей для изотропных немагнитных веществ (пара- и диамагнетиков) угол поворота плоскости поляризации пропорционален длине пути l линейно-поляризованного монохроматического света в веществе и величине магнитной индукции внешнего продольного постоянного магнитного поля (закон Верде) (формула (1)).

Коэффициент $V(\lambda)$ называется постоянной Верде, или удельным магнитным вращением. Постоянная Верде определяется свойствами среды и зависит от длины света (λ), а также от температуры.

Зависимость постоянной Верде от длины волны света описывается следующей эмпирической формулой:

$$V(\lambda) = \frac{\pi(n^2 - 1)}{\lambda n} \left(A - \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \right), \quad (8)$$

где $A, B, \lambda_0^2, n = n(\lambda)$ – константы, определяемые экспериментально.

Для объяснения механизма эффекта Фарадея необходимо учесть действие электромагнитной волны на излучающие электроны.

С точки зрения классической электронной теории оптические электроны в атомах рассматриваются как осцилляторы с единственной собственной частотой ω_0 . Лоренц в электронной теории дисперсии показал, что зависимость показателя преломления световой волны определяется формулой:

$$n(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{2m\epsilon_0} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (9)$$

где N – концентрация атомов; e, m – заряд и масса электрона. При истолковании эффекта Фарадея необходимо учесть влияние внешнего магнитного поля на движение оптического электрона. В качестве вынуждающей силы F в уравнении движения электрона

вместо $F = eE$, будет фигурировать сила $F = eE + e[vB]$, где второе слагаемое является силой Лоренца. Она вызывает прецессию электрона вокруг направления магнитного поля с частотой $\omega_L = \frac{eB}{2m}$.

Таким образом, во внешнем магнитном поле при движении светового луча вдоль магнитного поля происходит «расщепление» собственных частот осциллятора (Эффект Зеемана) на две компоненты круговой поляризации: $\omega_{\pm} = \omega_0 \pm \omega_L$, где ω_L называется ларморовской частотой. Тогда при наблюдении вдоль магнитного поля в спектре излучения появляются две частоты $\omega_0 + \omega_L$ и $\omega_0 - \omega_L$ вместо одной ω_0 , проявляющейся в отсутствие поля. Заметим, что во всех случаях направление прецессии определяется только направлением магнитного поля и не зависит от направления распространения света. Следовательно, знак эффекта Фарадея определяется только направлением магнитного поля, т.е. вращение происходит в одну и ту же сторону по отношению к наблюдателю вне зависимости от того, распространяется ли излучение вдоль магнитного поля или против него.

Показатель преломления $n(\omega)$, являющийся функцией частоты, будет различным для право- и лево-поляризованных компонент излучения, и эти волны будут распространяться с различной скоростью. Таким образом, право- и лево-поляризованные волны приобретут некоторую разность фаз, что соответствует повороту плоскости поляризации линейно поляризованного излучения, прошедшего магнитооптически активную среду (рис.2). На рис.2 поворот плоскости поляризации в эффекте Фарадея соответствует положительному углу вращения φ .

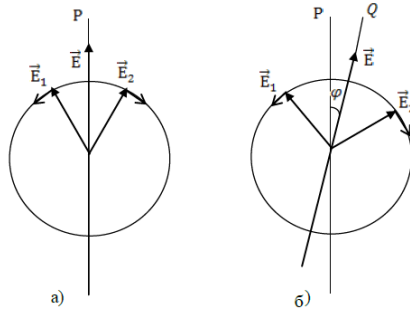


Рис. 2. Поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света

Две волны, возникающие в результате расщепления одной, оказываются поляризованными: первая по правому, вторая по левому кругу.

Скорость распространения для правой волны оказывается немного больше, чем в отсутствие поля; для левой, наоборот меньше.

Следовательно, показатель преломления для право-поляризованной компоненты излучения n_+ оказывается меньше, чем для лево-поляризованной компоненты n_- . Так как частота прецессии ω_L мала по сравнению с частотой используемого видимого света ω_0 , то можно записать

$$n_+ - n_- = n(\omega_0 + \omega_L) - n(\omega_0 - \omega_L) = -2\omega_L \frac{dn}{d\omega}. \quad (10)$$

Подставив вместо ω_L ее выражение, получим

$$n_+ - n_- = -\frac{e}{m} \frac{dn}{d\omega} B, \quad (11)$$

откуда для угла поворота на единицу длины находим

$$\varphi = \frac{\pi}{\lambda} (n_+ - n_-) = -\frac{\pi e}{\lambda m} \frac{dn}{d\omega} B. \quad (12)$$

Учитывая соотношение $\omega \frac{dn}{d\omega} = -\lambda \frac{dn}{d\lambda}$ и $\omega = -\frac{2\pi c}{\lambda}$, получаем окончательно

$$\varphi = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} B = VB, \quad (13)$$

где постоянная Верде равна

$$V = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda}. \quad (14)$$

В видимой области света значение $\frac{dn}{d\lambda}$ всегда отрицательно.

Если учесть также знак заряда электрона, то из формулы (14) следует, что постоянная Верде V всегда положительна, и вращение плоскости поляризации должно происходить всегда вправо, если наблюдение происходит в направлении поля. Этот вывод в основном подтверждается на опыте. Но бывают исключения, когда вращение происходит в противоположную сторону. Уже этот факт показывает, что классическая электронная теория не дает исчерпывающего описания явления магнитного вращения плоскости поляризации.

II. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Описание экспериментальной установки

Внешний вид экспериментальной установки показан на рисунке 3. От источника питания постоянное напряжение подается на лампу и на электромагнит. На катушки электромагнита напряжение подается через переключатель направления тока, что позволяет изменять направление вектора магнитной индукции поля, генерируемого электромагнитом. Между полюсами электромагнита устанавливается образец – стеклянный цилиндр длиной 30 мм.



Рис. 3. Экспериментальная установка для изучения эффекта Фарадея

Оптическая схема установки приведена на рисунке 4.

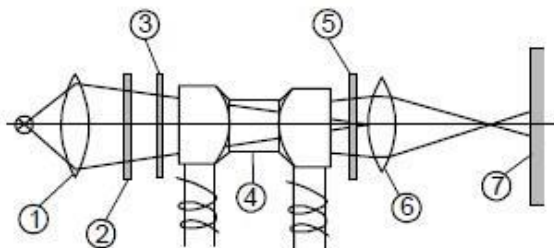


Рис. 4. Оптическая схема установки для изучения эффекта Фарадея
1 – конденсор, 2 – светофильтр, 3 – поляризатор, 4 – образец, 5 – анализатор, 6 – собирающая линза, 7 – экран

Свет от источника (лампа накаливания) попадает на конденсор (1), который формирует параллельный пучок лучей. После светофильтра (2) монохроматический пучок поляризуется поляризатором (3). Плоскополяризованный монохроматический пучок света проходит через образец (4). При включении магнитного поля плоскость поляризации луча поворачивается. Угол поворота определяется при помощи анализатора (5). Линза (6) служит для получения четкого изображения на экране (7).

2.2. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку согласно рис. 3. Включить блок питания.
2. Поместить светофильтр на пути пучка света.
3. Установить плоскость поляризатора на 90° , а плоскость анализатора – на 0° . При этом на экране наблюдается полное затемнение.
4. Повернуть анализатор против часовой стрелки до тех пор, пока на экране не появится светлое пятно. Записать показания шкалы анализатора со знаком «минус».
5. Вернуть анализатор в положение «0», а затем повернуть по часовой стрелке до тех пор, пока на экране снова не появится светлое пятно. Записать показания шкалы анализатора со знаком «плюс».
6. Вычислить среднее арифметическое полученных значений. Полученное число покажет положение анализатора, при котором плоскости поляризации поляризатора и анализатора перпендикулярны.
7. Если полученное число отлично от нуля, скорректировать положение поляризатора на эту величину (с учетом знака).
8. Подать на катушки электромагнита ток 1 А. Повторить пп. 3, 4, 5. Полученное число покажет угол поворота плоскости поляризации в магнитном поле.
9. Изменить направление тока в катушках переключателем направления тока. Повторить измерения. Угол поворота плоскости поляризации при обоих направлениях тока записывать со знаком «плюс».
10. Повторить пп. 7, 8 для нескольких значений тока. Данные занести в таблицу 1.
11. Повторить измерения для разных светофильтров.
12. При выполнении работы соблюдайте правила техники безопасности работы с электрическими приборами.

Таблица 1

Зависимость угла поворота плоскости поляризации
от магнитной индукции при $\lambda = const$

I, A	$B, Tл$	$\varphi_1, град$	$\varphi_2, град$	$\varphi, град$	$\varphi, рад$

2.3. Обработка результатов измерений

1. Вычислить угол поворота плоскости поляризации для каждого значения тока как среднее арифметическое величин φ_1 и φ_2 . Перевести значения углов в радианную меру.

2. Для каждого значения тока I вычислить значение величины магнитной индукции B по формуле:

$B = 0,064 * I$, где ток измеряется в амперах, магнитная индукция – в тесла.

3. Построить график зависимости $\varphi = f(B)$. Эта зависимость является линейной. Согласно формуле (9), тангенс угла наклона прямой на графике равен произведению $V(\lambda) * l$, где $V(\lambda)$ – постоянная Верде, l – длина образца.

4. Вычислить постоянную Верде, приняв $l = 30$ мм.

5. По формуле (10) вычислить теоретические значения постоянной Верде для каждой длины волны. Принять следующие значения констант:

$A = 15,71 * 10^{-7}$ рад/Тл, $B = 6,34 * 10^{-19}$ рад*мЗ/Тл, $\lambda_0 = 156,4$ нм, $n = 1,84$ при $\lambda = 525$ нм, $n = 1,80$ при $\lambda = 580$ нм и при $\lambda = 595$ нм.

6. Вычислить относительную ошибку определения постоянной Верде по формуле:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \varphi}{\varphi} + \frac{\Delta B}{B}. \quad (15)$$

Относительная ошибка определения магнитной индукции равна 10%. Абсолютная ошибка определения угла равна $\Delta \varphi = 10^0$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой световая волна?
2. Какой свет называется поляризованным?
3. Что такое линейно поляризованный свет? Как его можно получить?
4. Что называется циркулярно право- и лево- поляризованными волнами? Поясните фразу: «линейно поляризованный свет может быть разложен на циркулярно право- и лево-поляризованные волны».
5. Что такое оптически активные вещества?
6. В чем состоит эффект Фарадея?
7. Что такое постоянная Верде?
8. От чего зависит постоянная Верде?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Т. 4. Оптика : учебное пособие для студентов физических специальностей вузов / Изд. 3-е, стер. – Москва : Физматлит, 2006. - 792 с. : ил.
2. Бутиков Е.И. /Под.ред. Н.И. Калитеевского. – М.: Высшая школа, 1986. – 512 с. : ил.
3. А.Н. Матвеев. Оптика: Учебное пособие для физ. специальностей вузов. -М.: Высшая школа, 1985. – 351 с. : ил.

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано в печать 12.12.2022 г.

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 529-849.

E-mail: rio.tsu@mail.ru

Заказ № 5279 от «8» декабря 2022 г. Тираж 30 экз.

