

Лабораторная работа № 16

ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Приборы и принадлежности: сахариметр СУ-4, соленоид, кювета с исследуемым веществом, источник постоянного тока РС-24М.

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.

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 пропорционален длине пути l света в веществе и напряжённости H магнитного поля:

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

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 ещё 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 $H = 1 \text{ Э}$ ($76,6 \text{ А/м}$) и $l = 1 \text{ см}$ 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 H .

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:

Линейно поляризованная световая волна разделяется в веществе на две волны с равными амплитудами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 и частотой ω , поляризованных соответственно по правому и левому кругу, а скорости распространения волн V_+ и V_- различны. Поскольку амплитуды и частоты круговых составляющих одинаковы, геометрическая сумма \vec{E} векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 в каждый момент времени будут лежать в одной и той же плоскости P (см. рис. 1а).

Если скорости распространения круговых волн различны, то при прохождении пути l в веществе один из векторов (\vec{E}_1 или \vec{E}_2) отстанет по фазе при своем вращении от другого вектора (см. рис. 1б). В результате плоскость P' , в которой лежит результирующий вектор \vec{E}' , повернется относительно первоначальной плоскости на угол φ :

$$\varphi = \frac{\omega}{2} l \left(\frac{1}{V_+} - \frac{1}{V_-} \right) \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{\omega}{2c} l (n_+ - n_-) \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, а $n_+ = \frac{c}{V_+}$ и $n_- = \frac{c}{V_-}$ – показатели преломления соответствующих круговых волн. На этом аналогия между двумя

явлениями заканчивается. Природа этих явлений различна. Истинную природу магнитного вращения плоскости поляризации следует искать в прямом воздействии магнитного поля на движение электронов в атомах [1].

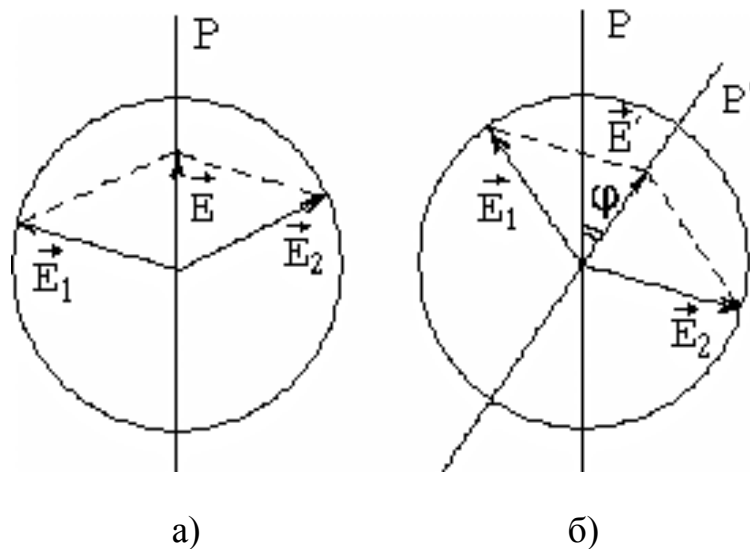


Рис. 1. Графическое представление эффекта Фарадея

Рассмотрим атом, в котором электрон вращается вокруг ядра с угловой скоростью ω . Если такой атом поместить в магнитное поле, то на электрон будет действовать дополнительно сила Лоренца:

$$F = \frac{e}{c}(\vec{V} \times \vec{H}), \quad (3)$$

где e – заряд электрона, \vec{V} - его линейная орбитальная скорость. Эта сила направлена перпендикулярно к плоскости, проведенной через \vec{V} и \vec{H} . Она вызывает прецессию электрона вокруг направления магнитного поля с частотой

$$\omega_n = -\frac{e}{2mc}H, \quad (4)$$

благодаря чему изменяется частота излучения атома. Тогда при наблюдении вдоль магнитного поля в спектре излучения появляются две частоты $\omega + \omega_n$ и $\omega - \omega_n$ вместо одной ω , проявляющейся в отсутствие поля.

Заметим, что во всех случаях направление прецессии определяется только направлением магнитного поля и не зависит от направления распространения света. Две волны, возникающие в результате расщепления одной, оказываются поляризованными: первая по правому, вторая по левому кругу. Скорость распространения, а значит и показатель преломления, для левой волны оказывается немного больше, чем в отсутствие поля; для правой, наоборот меньше. Так как частота прецессии ω_l мала по сравнению с частотой используемого видимого света ω , то можно записать

$$n_+ - n_- = n(\omega + \omega_l) - n(\omega - \omega_l) = 2\omega_l \frac{dn}{d\omega}. \quad (5)$$

Подставив вместо ω_l его выражение, имеем

$$n_+ - n_- = -\frac{e}{mc} \cdot \frac{dn}{d\omega} \cdot H, \quad (6)$$

откуда для угла поворота на единицу длины находим

$$\varphi = \frac{\pi}{\lambda} (n_+ - n_-) = -\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{e}{mc} \cdot \frac{dn}{d\omega} \cdot H, \quad (7)$$

или, так как $\omega \frac{dn}{d\omega} = -\lambda \frac{dn}{d\lambda}$ и $\omega = 2\pi c / \lambda$, получаем окончательно

$$\varphi = \frac{e\lambda}{2mc^2} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot H = V \cdot H. \quad (8)$$

В видимой области света значение $\frac{dn}{d\lambda}$ всегда отрицательно. Если учесть также знак заряда электрона, то формула (8) позволяет сделать вывод, 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.

Описание лабораторной установки.

Лабораторная установка для изучения магнитного вращения плоскости поляризации собрана на базе стандартного поляризационного прибора-сахариметра СУ-4. Оптическая схема сахариметра изображена на рис.2.

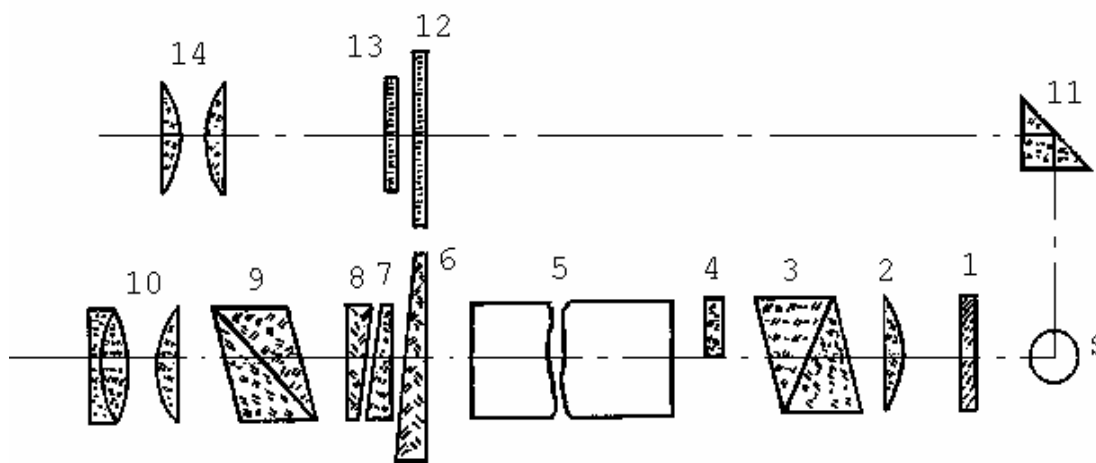


Рис. 2. Оптическая схема сахариметра

Лучи от источника света S проходят через светофильтр 1, конденсор 2 и попадают в поляризатор 3. Плоско поляризованный световой поток проходит через полутеневую пластинку 4, разделяющую его на две половины и попадает в кювету с исследуемым веществом 5, далее через кварцевый компенсатор 6,7,8, поляроид-анализатор 9 в зрительную трубу 10, с помощью которой производятся наблюдения.

Толщина кварцевой полутеневой пластинки рассчитана таким образом, что свет при выходе из нее поворачивает плоскость поляризации на небольшой угол. Поэтому поле зрения сахариметра состоит из двух частей, разделенных тонкой линией и называемых полями сравнения. Наличие полутеневой

пластинки позволяет достичь большей точности в установке нулевого положения поля зрения, поскольку человеческий глаз более чувствителен к оценке разности освещенностей, нежели к величине светового потока. В качестве нулевого значения в приборах с полутеневой пластинкой принимается равенство затемнений (полутени) обеих половин поля зрения.

Компенсатор сахариметра предназначен для компенсации поворота плоскости поляризации, вызванного исследуемым веществом. Он состоит из подвижного левовращающего клина 6, соединенного со шкалой 12, неподвижного правовращающего клина 8 и стеклянного контр-клина 7, вводимого для того, чтобы луч света, проходя через кварцевые клинья, не изменял своего направления. Нулевая отметка шкалы соответствует положению компенсатора, при котором положение обоих клиньев скомпенсировано.

Если теперь на пути луча света поместить оптически активное вещество, то оно повернет плоскость поляризации на некоторый угол и яркость полей сравнения станет различной. Перемещая подвижный кварцевый клин 6 относительно неподвижного 8, можно добиться такой суммарной толщины клиньев, при которой угол поворота плоскости поляризации вещества компенсируется (угол поворота плоскости поляризации клиньями равен по величине, но противоположен по знаку углу вращения вещества). Яркость полей сравнения в этом случае станет одинаковой. Перемещение подвижного кварцевого клина передается на шкалу 12, смещение которой относительно нониуса 13 наблюдается с помощью лупы 14. На шкалу нанесены деления, соответствующие углу вращения плоскости поляризации в градусах Международной сахарной шкалы Венцке $^{\circ}S$. $100^{\circ}S$ этой шкалы соответствуют $34,62$ угловым градусам.

Для исследования магнитного вращения плоскости поляризации на кювету с исследуемым веществом намотана многовитковая катушка (соленоид). Катушка питается постоянным током от выпрямителя ВС24-М. Изменяя величину и направление тока, протекающего через соленоид, можно изменять величину и направление магнитного поля внутри соленоида и, следовательно,

исследовать полевую зависимость магнитного вращения испытуемого образца. Численное значение напряженности поля можно найти по формуле $H = k \cdot I$, где I – сила тока в амперах, $k = 47,2$ Э/А – постоянная соленооида, ее значение определяется при градуировке катушки.

Общий вид лабораторной установки для определения магнитного вращения плоскости поляризации показан на рис.3.

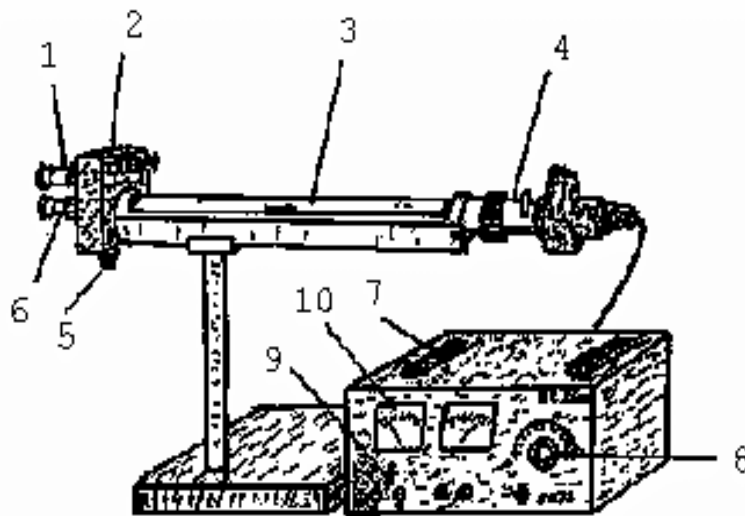


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки

Здесь 1 – лупа шкалы, 2 – измерительная головка, 3 – кюветное отделение, 4 – осветительный узел, 5 – рукоятка клинового компенсатора, 6 – зрительная труба с диоптрийной насадкой, 7 – выпрямитель ВС24-М, 8 – рукоятка изменения силы тока, 9 – переключатель полярности тока, 10 – амперметр.

Порядок выполнения работы.

Обработка результатов измерений.

1. Визуально ознакомиться с лабораторной установкой, проверить ее комплектность. Рукоятку регулятора тока выпрямителя вывести в крайнее левое (против часовой стрелки) положение.

2. Вставить вилку шнура электропитания выпрямителя в сеть 220 В и включить выпрямитель.

3. Установить окуляр зрительной трубы на максимальную резкость изображения вертикальной линии раздела полей сравнения.

4. Установить лупу шкалы на максимальную резкость изображения штрихов и цифр шкалы и нониуса.

5. Медленно вращая рукоятку компенсатора, установить одинаковую освещенность полей сравнения и произвести отсчет по шкале и нониусу с точностью $0,05^{\circ}S$. Результат измерений записать в таблицу. Подобные измерения проделать не менее 3-х раз (смещая рукоятку компенсатора, а затем снова, добиваясь одинаковой освещенности).

!!! Отсчет показаний при помощи нониуса поясняется рисунком 4.

а) Показано положение нониуса и шкалы, соответствующее отсчету $+16,70^{\circ}S$ (нуль нониуса расположен правее нуля шкалы на 16 полных делений и в правой части нониуса с одним из делений шкалы совмещается его деление, соответствующее отсчету 0,70).

б) Показано положение шкалы и нониуса, соответствующее отсчету $-3,25^{\circ}S$ (нуль нониуса расположен левее нуля шкалы на 3 полных деления и в левой части нониуса с одним из делений шкалы совмещается его деление, соответствующее отсчету 0,25).

6. Установить последовательно по амперметру выпрямителя значения силы тока $\pm 1,0$ А; $\pm 1,5$ А; $\pm 2,0$ А; $\pm 2,5$ А; $\pm 3,0$ А; $\pm 3,5$ А; $\pm 4,0$ А и повторить измерения п. п. 5, не менее 3-х раз. Результаты записать в таблицу.

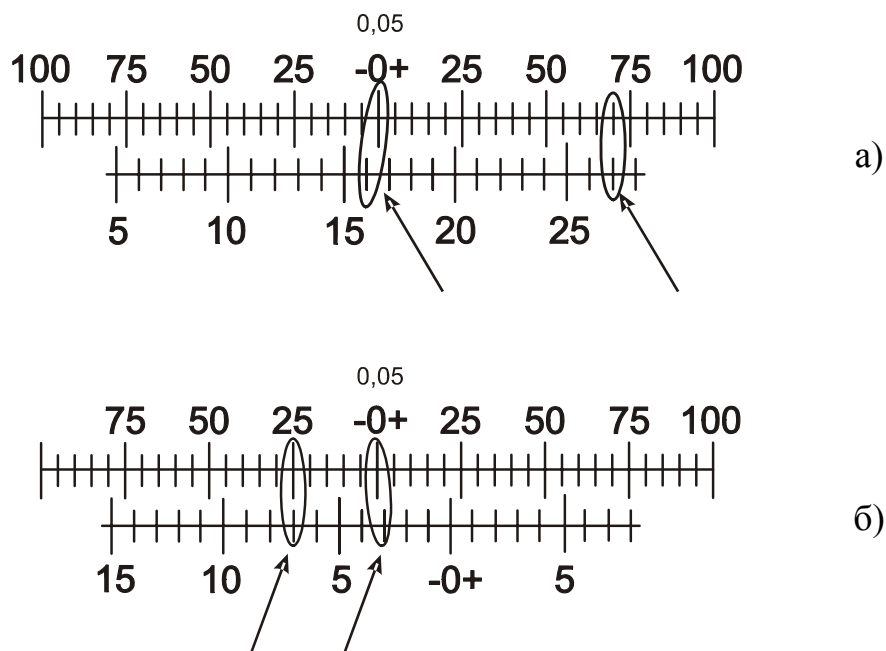


Рис. 4. Внешний вид шкалы прибора

!!! Для изменения направления тока в соленоиде на лицевой панели выпрямителя установлен переключатель «Полярность».

!!! При необходимости произвести дополнительную фокусировку поля зрения.

7. Для каждого из заданных значений силы тока в соленоиде вычислить угол поворота плоскости поляризации:

$$\varphi = \frac{|\phi_+| + |\phi_-|}{2},$$

где ϕ_+ и ϕ_- – средние значения отсчетов по шкале и нониусу при прямом и обратном направлении тока. Результаты записать в таблицу.

8. Вычислить величину напряженности магнитного поля внутри соленоида, соответствующую заданным значениям силы тока:

$$H(\text{Э}) = 47,2 I(\text{А}).$$

Результаты записать в таблицу.

Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики // СПб.: Издательство "Лань", 2006, т.3, §§ 258, 285-290, 295, 296.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики // М.: Физматлит, Издательство МФТИ, 2002, т.4, §§ 75-78, 94, 95.