

Лабораторная работа 3-05

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ

А.А. Докучаева, В.А. Докучаева

Цель работы

Изучение эффекта Фарадея – вращения плоскости колебаний линейно поляризованного света в продольном магнитном поле. Определение постоянной Верде.

Теоретическое введение

По волновой теории свет – это переменное электромагнитное поле. Составляющие световой волны – векторы напряженности электрического поля \vec{E} и магнитного поля \vec{H} , синфазны и перпендикулярны друг к другу и к направлению скорости распространения волны \vec{V} : $\vec{E} \perp \vec{H} \perp \vec{V}$. Уравнение плоской монохроматической бегущей волны имеет вид:

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz), \\ \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kz) \end{cases}, \quad (5.1)$$

где \vec{E}_0 и \vec{H}_0 - амплитуды напряженности электрического и магнитного полей, соответственно; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - циклическая частота, T – период колебаний; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; t – время; z – координата.

Если вектор \vec{E} колеблется в одной плоскости, то свет называется *линейно* или *плоско* поляризованным (на рис.5.1 – это плоскость XOZ), а сама плоскость называется

плоскостью колебаний, а для магнитного поля \vec{H} плоскость YOZ называется плоскостью поляризации. Однако, существуют и другие виды поляризации света: эллиптически поляризованный и циркулярно поляризованный свет, который можно

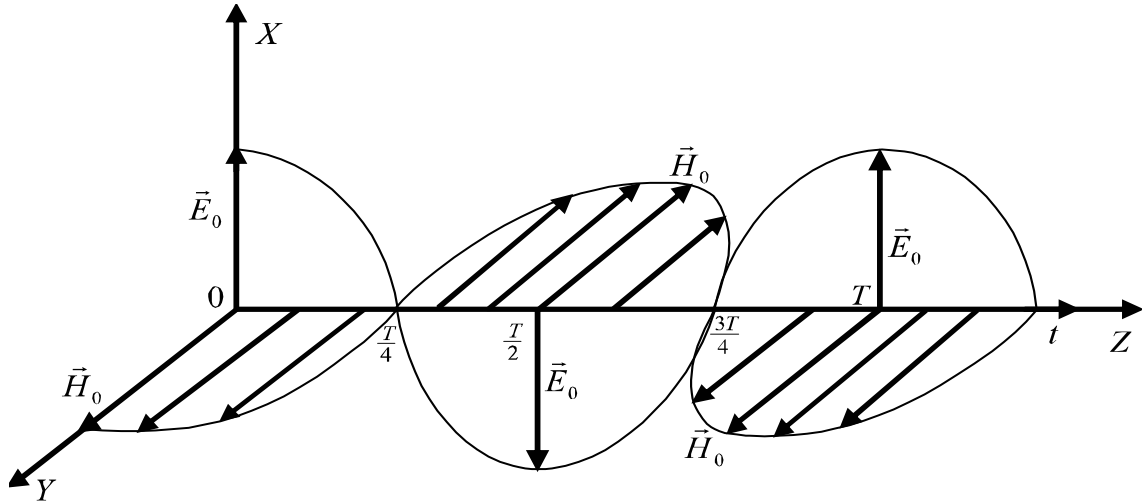


Рис.5.1. График зависимости колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} от времени.

получить при сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний \vec{E}_x и \vec{E}_y с разностью фаз $\pm \frac{\pi}{2}$ и одинаковыми амплитудами.

Уравнение циркулярно поляризованной волны:

правое вращение \vec{E} :

$$E_x = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)} \quad E_y = E_0 e^{i\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) + \frac{\pi}{2}\right]} = iE_0 e^{i\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)} \quad (5.2)$$

левое вращение \vec{E} :

$$E_x = E_0 e^{i\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)} \quad E_y = E_0 e^{i\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) - \frac{\pi}{2}\right]} = -iE_0 e^{i\omega\left(t - \frac{z}{v}\right)} \quad (5.3)$$

Таким образом, циркулярно поляризованный свет – это такой свет, в котором вектор напряженности электрического поля \vec{E} , не меняясь по величине, изменяет свое положение в пространстве так, что конец вектора \vec{E} описывает окружность в плоскости, перпендикулярной к скорости распространения волны. Если вектор \vec{E} поворачивается по часовой стрелке относительно направления распространения z , то свет называется *циркулярно правополяризованным*; если \vec{E} поворачивается относительно z против часовой стрелки, то *циркулярно левополяризованным* (рис. 5.2).

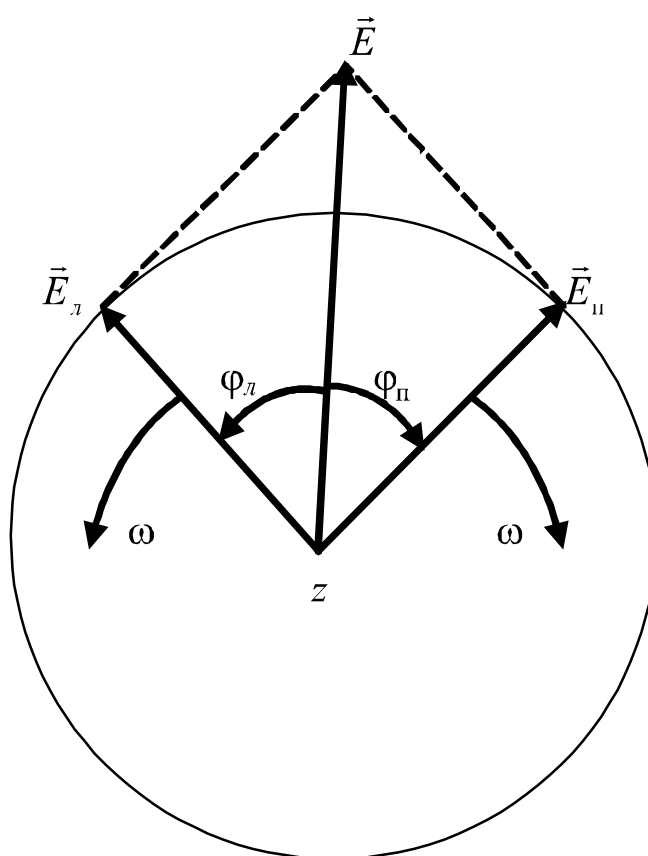


Рис.5.2. Разложение \vec{E} плоско поляризованного света на \vec{E}_{\parallel} и \vec{E}_{\perp} циркулярно поляризованного света. E – напряженность электрического поля, ω – циклическая частота, φ – угол поворота.

В данной лабораторной работе рассматривается вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света при прохождении его через прозрачный аморфный образец в продольном магнитном поле, что было обнаружено экспериментально Майклом Фарадеем. Это сложное

явление впервые объяснил Френель, который показал, что линейно поляризованный свет можно представить как сумму двух волн: циркулярно правополяризованной составляющей и циркулярно левополяризованной составляющей света, что аналитически запишется в виде:

$$\vec{E} = E_0 e^{i\omega(t - \frac{z}{v})} \pm i E_0 e^{i\omega(t - \frac{z}{v})} \quad (5.4)$$

Если предположить, что скорость распространения света через прозрачный образец, помещенный в магнитное поле для циркулярно левополяризованного и циркулярно правополяризованного света разная $V_n \neq V_l$, то и время прохождения образца для них будет разное, тогда и угол поворота \vec{E}_n и \vec{E}_l будет разный (рис.5.3).

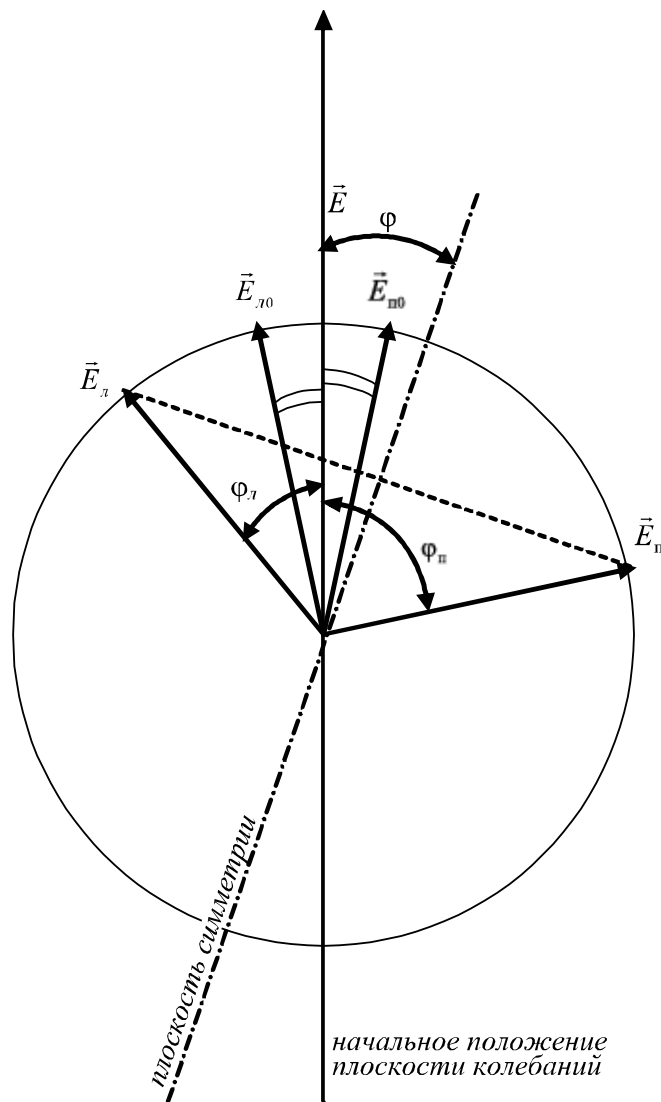


Рис.5.3. Поворот плоскости колебаний линейно поляризованного света на угол φ при прохождении через образец.

В результате плоскость колебаний вектора \vec{E} результирующей плоско поляризованной волны повернется по отношению к направлению плоскости колебаний в исходной волне на угол φ , равный

$$\varphi = \frac{\varphi_{пр} - \varphi_{лев}}{2} \quad (5.5)$$

Электромагнитная теория света объяснила поворот плоскости колебаний линейно поляризованного света, разложенного на правополяризованную и левополяризованную циркулярные составляющие, что они распространяются в образце с разными скоростями. Но почему скорости разные? Этот вопрос подробно рассмотрел М. Борн в 1915 г., используя молекулярную теорию строения вещества. Для вещества со сложными асимметричными молекулами, существующими в двух модификациях, являющимися зеркальным отражением друг друга, плоскость колебаний света поворачивается, т.к. скорости распространения двух вышеуказанных волн – разные. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

При прохождении электромагнитной волны в веществе его электроны совершают вынужденные колебания. Запишем уравнение вынужденных колебаний электрона в электрическом поле световой волны:

$$m\ddot{r} + k\dot{r} = e\vec{E}, \quad (5.6)$$

где, $e\vec{E}$ - вынуждающая сила; m , e – масса и заряд электрона; \vec{r} – радиус - вектор (вектор перемещения электрона); k – коэффициент упругости.

Решение этого уравнения с учетом свойств среды приводит к формуле Зельмейера для показателя преломления среды:

$$n^2 = 1 + \frac{e^2 N}{\epsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (5.7)$$

где n – показатель преломления вещества; m , e – масса и заряд электрона; N – число молекул в единице объема; ϵ_0 – электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ω – циклическая частота падающего на вещество света; ω_0 – частота собственных колебаний электрона.

В данной лабораторной работе прозрачный аморфный стеклянный образец с двумя модификациями асимметричных молекул находится во внешнем магнитном поле \vec{H} . Считая, что $H \gg H_{\text{света}}$, получим, что вынуждающая сила, действующая на электрон среды вместо $e\vec{E}$ будет равна:

$$\vec{F}_{\text{вын.}} = e\vec{E} + e\mu_0 [\vec{v} \vec{H}], \quad (5.8)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля световой волны; \vec{H} – напряженность внешнего магнитного поля; \vec{v} – скорость электрона; μ_0 – магнитная постоянная ($\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Тогда уравнение вынужденных колебаний электрона будет иметь вид:

$$m\ddot{r} + k\dot{r} = e\vec{E} + e\mu_0 [\vec{v} \vec{H}] \quad (5.9)$$

Решение этого уравнения для циркулярно левополяризованной волны и правополяризованной волны сложно. Приведем только результат. Показатель преломления в этом случае будет равен:

$$n_{n,l}^2 = 1 + \frac{e^2 N}{\epsilon_0 m \left[(\omega_0^2 - \omega^2) m \frac{e\mu_0 \omega}{m} H \right]} \quad (5.10)$$

Знаки «-» и «+» в знаменателе формулы (5.10) означают, что показатели преломления для двух циркулярно поляризованных волн – правой и левой – разные, а т.к. показатель преломления равен отношению скоростей распространения света в вакууме и среде, то отсюда следует что $V_n \neq V_l$, что и требовалось объяснить.

Таким образом, при прохождении через вещество вдоль магнитного поля *правополяризованные* и *левополяризованные* составляющие линейного поляризованного света распространяются с различными скоростями (им соответствуют разные показатели преломления). Поскольку $n_n \neq n_l$, появляется разность фаз (разность хода) двух световых волн. В результате плоскость колебаний линейно поляризованного монохроматического света при прохождении в веществе пути l поворачивается на некоторый угол $\Delta\varphi$. При не очень сильных магнитных полях угол поворота описывается соотношением:

$$\Delta\varphi = V(\lambda)\lambda\bar{B}, \quad (5.11)$$

где l - длина пути; \bar{B} - среднее значение величины магнитного поля в среде (векторы \vec{B} и \vec{H} связаны между собой как $\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$); $V(\lambda)$ - постоянная Верде, которая определяется свойствами среды и зависит от длины волны λ света, а также от температуры.

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

$$V(\lambda) = \frac{\pi(n^2 - 1)}{\lambda n} \left(A + \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \right), \quad (5.12)$$

где $A, B, \lambda_0, n = n(\lambda)$ – некоторые константы, определяемые экспериментально:

$$A = 15,71 \cdot 10^{-7} \text{ рад/Тл}, \quad B = 6,34 \cdot 10^{-19} \text{ рад} \cdot \text{м}^2 / \text{Тл}$$

$$\lambda_0 = 156,4 \text{ нм}; \quad n_n = 1,84 \text{ при } \lambda = 440 \text{ нм}, \quad n_l = 1,80 \text{ при } \lambda = 660 \text{ нм} .$$

Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 5.4.

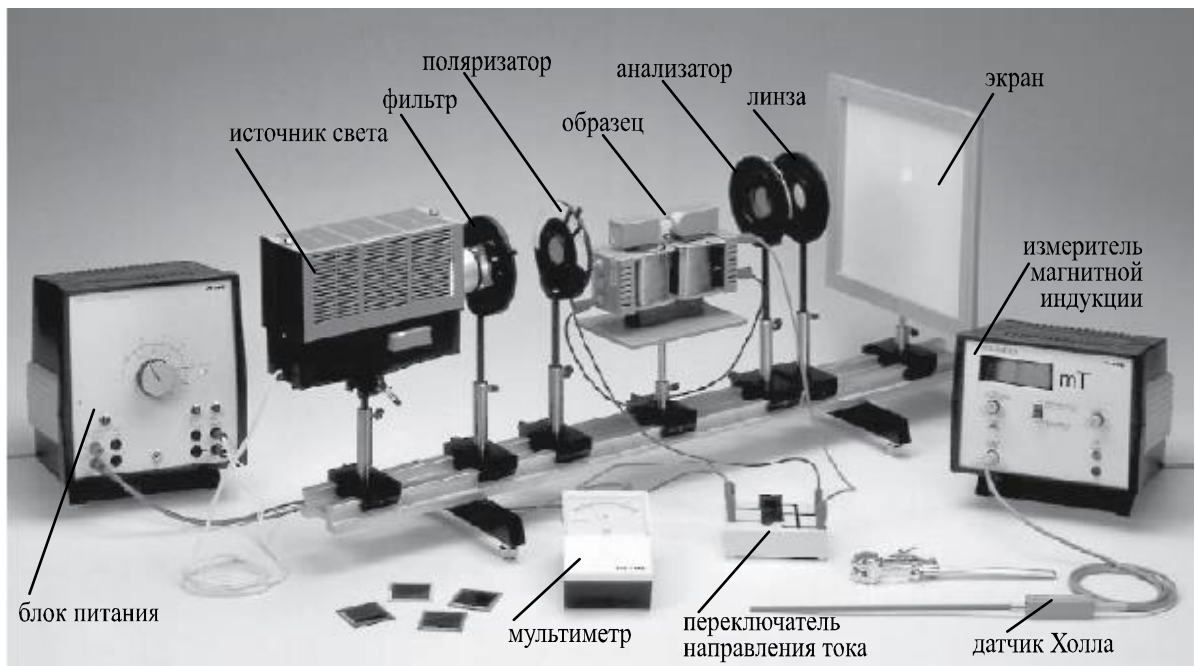


Рис.5.4. Экспериментальная установка для изучения эффекта Фарадея.

От источника питания (слева на рисунке) подается напряжение на лампу и на электромагнит – через мультиметр и переключатель направления электрического тока через катушки электромагнита. Образец – стеклянный стержень – помещается между поляризатором и анализатором. Он устанавливается между полюсами электромагнита. Оптическая схема установки показана на рис. 5.5.

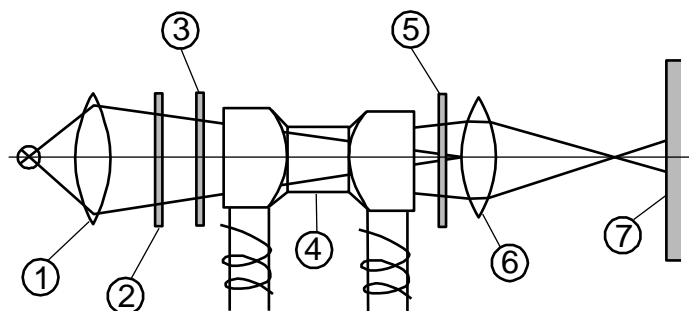


Рис.5.5. Оптическая система. 1 – конденсор; 2 – светофильтр; 3 – поляризатор; 4 – образец; 5 – анализатор; 6 – линза ($f = 15$ см); 7 – полупрозрачный экран.

Магнитная индукция измеряется цифровым тесламетром (справа на рис.5.4). Рядом показан датчик Холла.

Технические данные всех приборов необходимо занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Технические данные приборов

Название прибора	Пределы измерений	Число делений	Цена деления	Класс точности	Абсолютная приборная погрешность

Порядок выполнения работы

При выполнении работы необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и охраны труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Внимание! Электрический ток, пропущенный через катушки, не должен превышать 3А. Установку включает лаборант!

1. Определение средней максимальной магнитной индукции \bar{B}_{\max} и угла поворота $\Delta\varphi$ плоскости колебания \vec{E}

1.1. Выставить нуль градусов на верхней шкале анализатора (рис. 5.4). Добиться погашения светового пятна на экране поворотом поляризатора (под руководством лаборанта).

1.2. Выставить определенный ток в катушке электромагнита. На экране появится световое пятно. Поворачивая анализатор, необходимо добиться погашения светового пятна на экране.

1.3. По верхней шкале анализатора отсчитать угол поворота.

1.4. Водя датчиком Холла (рис. 5.4) вверх, вниз по образцу, необходимо произвести измерение максимальной магнитной индукции $\bar{B}_{1 \max}$ при токах 1, 2 и 3 А, считывая показания по измерителю магнитной индукции. При этом датчик Холла должен быть параллелен образцу.

1.5. Выставить ток I в катушке равным нулю.

1.6. С помощью переключателя направления тока (рис. 5.4) изменить направление магнитного поля в катушке.

1.7. Аналогичным образом произвести измерения угла поворота по верхней шкале анализатора, поворачивая его в противоположную сторону при тех же значениях тока.

1.8. С помощью измерителя магнитной индукции (рис. 5.4) фиксировать значение $\bar{B}_{2 \max}$ в образце. Результаты измерения занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Углы поворота φ и максимальные значения магнитной индукции \bar{B}_{\max} при заданных токах

I, A	$\varphi_1, \text{град}$	$B_{1 \max}, \text{мТл}$	$\varphi_2, \text{град}$	$B_{2 \max}, \text{мТл}$	$\Delta\varphi, \text{град}$	\bar{B}_{\max}
1						
2						
3						

1.9. При каждом значении тока в катушке определить значение угла $\Delta\varphi$ по формуле (5.13) и среднее значение максимальной магнитной индукции по формуле (5.14).

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (5.13)$$

$$\bar{B}_{\max} = \frac{B_{1\max} + B_{2\max}}{2} \quad (5.14)$$

1.10. Построить график зависимости \bar{B}_{\max} (мТл), от величины тока I (А), в катушке по трем точкам. Сравните его с графиком, приведенным на рис. 5.6.

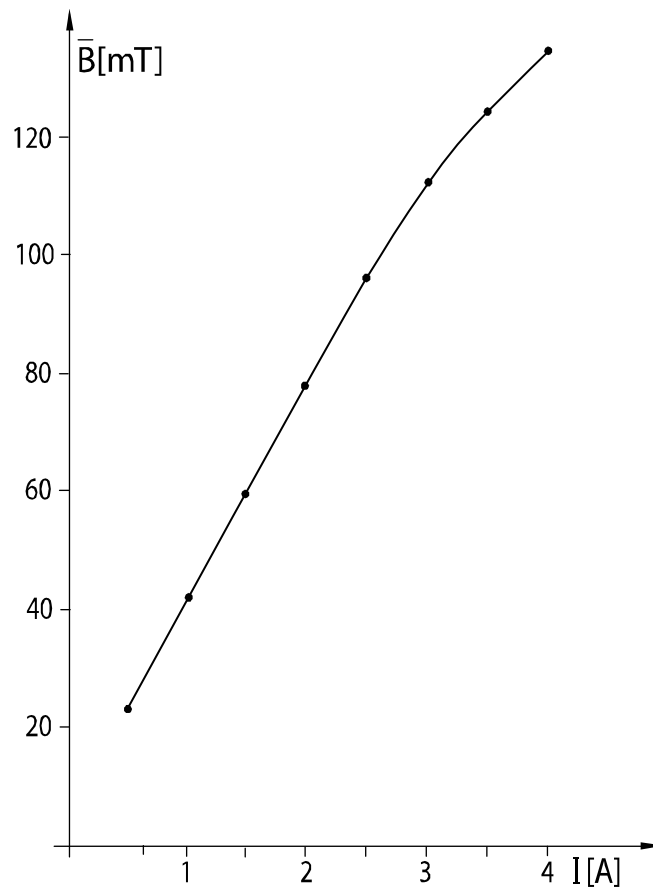


Рис.5.6. Зависимость среднего значения величины магнитной индукции между полюсами электромагнита от тока от 0 А до 4,0 А

1.11. Связь между средней величиной магнитной индукции \bar{B} в катушке и средним значением ее максимальной величины \bar{B}_{\max} выражается формулой

$$\bar{B} = \frac{\bar{B}_{\max}}{1,5} \quad (5.15)$$

Для каждого значения тока в катушке рассчитать среднее значение магнитной индукции \overline{B} по формуле (5.15), результаты занести в табл. 5.3.

2. Расчет постоянной Верде

2.1. Провести измерения с четырьмя разными светофильтрами (светофильтр устанавливает лаборант) при трех значениях тока в катушке.

2.2. Рассчитать $V(\lambda)$ по формуле (5.16). Данные занести в табл. 5.3.

$$V(\lambda) = \frac{\Delta\varphi}{l \cdot \overline{B}} \quad (5.16)$$

Таблица 5.3

Зависимость постоянной Верде от длины волны

I, A	$\overline{B},$ мТл	$\lambda_1 = 505 \text{ нм}$		$\lambda_2 = 525 \text{ нм}$		$\lambda_3 = 580 \text{ нм}$		$\lambda_4 = 595 \text{ нм}$	
		$\Delta\varphi_1$	V_1	$\Delta\varphi_2$	V_2	$\Delta\varphi_3$	V_3	$\Delta\varphi_4$	V_4

2.3. Построить график зависимости постоянной Верде от длины волны λ для каждого среднего значения магнитной индукции поля \overline{B} .

Библиографический список

а) основой

1. Савельев И.В. Курс общей физики в 5 кн. Кн.4. Волны. Оптика. М.: АСТ, 2006, с.188 –192.

Астрель,

2. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. Основные законы. 5-е изд., испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010, с.189 – 193.

3. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. М.: МИСиС, «Учеба», 2007, 108 с.

б) дополнительный

4. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. М.: Физматлит, 2004, Т.3, с. 650 – 655.

5. *Ландсберг Г.С.* Оптика: учеб. пособие для студ. физических спец. вузов. – 99е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003, 848 с.

Контрольные вопросы

1. Что такое световая волна?
2. Какой свет называется линейно поляризованным?
3. В чем суть эффекта Фарадея?
4. Чем отличается право циркулярно поляризованный свет от лево циркулярно поляризованного света?
5. Можно ли линейно поляризованный свет разложить на циркулярно поляризованные составляющие?
6. От чего зависит угол поворота плоскости колебания \vec{E} световой волны в эффекте Фарадея?
7. Откуда следует, что скорость распространения света вдоль магнитного поля в образце право- и лево- циркулярно поляризованных волн разная?
8. Как зависит угол поворота плоскости колебаний \vec{E} от напряженности продольного магнитного поля и длины образца?
9. Что такое «постоянная Верде»?