

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПОЛЕВЫХ
ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В ВЕЩЕСТВАХ
С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ МАГНИТНОГО ПОРЯДКА.
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ
ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

Учебно-методическое пособие

Красноярск
СФУ
2019

УДК 537.632.4(07)
ББК 22.343.7я73
И889

И889 Исследование спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея в веществах с различными типами магнитного порядка. Методические указания к курсовой работе по общей физике: учеб.-метод. пособие / сост. А. Э. Соколов, О. С. Иванова, И. С. Эдельман. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 28 с.

Определены цели и задачи, решаемые в процессе выполнения и анализа результатов курсовой работы по исследованию спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея, указаны требования к уровню выполнения, порядок написания и оформления работы.

Предназначено для студентов очной и заочной формы обучения инженерных специальностей СФУ в соответствии с унифицированной программой по физике и федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования.

Печатается в соответствии с решением кафедры «Экспериментальной физики и инновационных технологий» и методического совета института ИФиРЭ.

**УДК 537.632.4(07)
ББК 22.343.7я73**

**Электронный вариант издания
см.: <http://catalog.sfu-kras.ru>**

© Сибирский федеральный
университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Магнитооптические явления	5
Эффект Зеемана.....	5
Эффект Фарадея.....	7
Феноменологическая теория эффекта Фарадея.....	8
Диамагнитный вклад.....	10
Парамагнитный вклад	11
Ферромагнитный вклад.....	12
Правила оформления и порядок выполнения курсовой работы.....	13
Цели и задачи, решаемые в процессе выполнения курсовой работы	14
Требования к уровню выполнения и содержанию курсовой работы.....	14
Требования к оформлению курсовой работы	17
Требования к структурным элементам текстового документа	18
Задания к выполнению курсовой работы	21
Образец оформления курсовой работы.....	23
Приложение	24
Библиографический список.....	25

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие «Исследование спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея в веществах с различными типами магнитного порядка» содержит краткие теоретические сведения о природе магнитооптической активности веществ, особое внимание уделено описанию эффекта Фарадея (ЭФ), экспериментальные спектры которого используются для выполнения заданий курсовой работы. Задания курсовой работы подобраны таким образом, чтобы показать возможности методов магнитооптической спектроскопии для исследования свойств веществ с различным типом магнитного упорядочения. Анализ экспериментально полученных спектральных зависимостей предполагает освоение определенного материала, работу в графическом редакторе с таблицами данных, построение графиков и нахождение из них определенных характеристик исследуемых образцов. Образцы, данные которых используются в работе, изготовлены в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург), в группе профессора С. А. Степанова, магнитооптические исследования проведены в лаборатории физики магнитных явлений в Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН (Красноярск) под руководством профессора д.ф.м.-н. И. С. Эдельман.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Эффект Зеемана

Область явлений, связанных с влиянием магнитного поля или спонтанной намагниченности на излучение и распространение электромагнитных волн оптического диапазона составляет предмет магнитооптики. В основе всех магнитооптических эффектов лежит эффект Зеемана, заключающийся в расщеплении внешним магнитным полем энергетических уровней атома, что приводит к соответствующему расщеплению спектральных линий. Расщепление уровней объясняется тем, что атом, обладающий магнитным моментом μ , приобретает в магнитном поле дополнительную энергию, и энергетические уровни расщепляются на $2J+1$ равноотстоящих подуровней, причем величина расщепления определяется квантовыми числами L , S , и J каждого уровня. До наложения поля, состояния, отличающиеся значениями квантового числа m_J , обладают одинаковой энергией, магнитное же поле снимает вырождение по m_J . На рис. 1(а) показано расщепление уровней и спектральных линий для перехода между состояниями с $L=1$ и $L=0$ ($P \rightarrow S$ переход). В отсутствии поля наблюдается одна линия, частота которой обозначена ω_0 . При внесении атома в магнитное поле, кроме линии с ω_0 , появляются две расположенные симметрично относительно нее линии с частотами $\omega_0 + \Delta\omega_0$, $\omega_0 - \Delta\omega_0$. На рис. 1 (б) показана схема для более сложного $D \rightarrow P$ перехода. Как и в предыдущем случае, первоначальная линия расщепляется на три компоненты: линию с частотой ω_0 и две расположенные симметрично относительно нее линии с частотами $\omega_0 + \Delta\omega$, $\omega_0 - \Delta\omega$. Это объясняется тем, что для магнитного квантового числа действует правило отбора, согласно которому возможны только переходы, при которых m_J либо остается неизменным, либо изменяется на единицу $\Delta m_J = 0, \pm 1$.

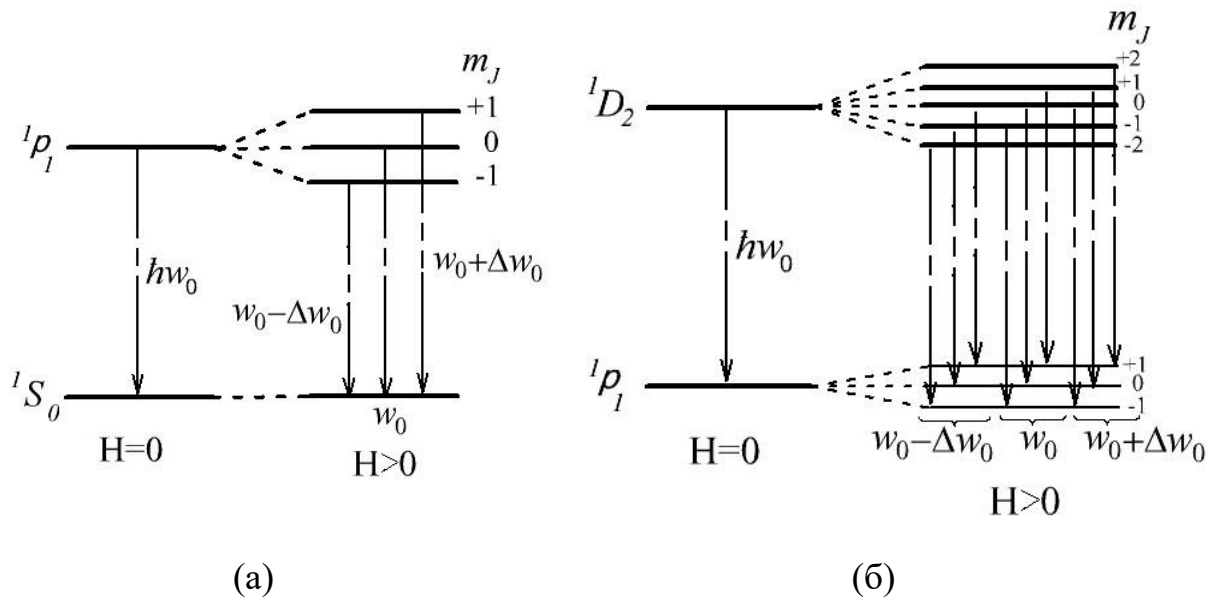


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта Зеемана:

(а) – расщепление уровней и возможные переходы между состояниями с $L=1$ и $L=0$ ($P \rightarrow S$ переход), (б) – расщепление уровней и $D \rightarrow P$ переходы

Величина расщепления пропорциональна величине приложенного магнитного поля. В обычно используемых магнитных полях она настолько мала, что ее нельзя измерить напрямую (так, величина расщепления для поля порядка 1Тл и частоты видимого света $3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ составляет 0.2 \AA). Поскольку компоненты расщепления имеют различную поляризацию по отношению к направлению наблюдения и к направлению внешнего магнитного поля, данное расщепление хорошо исследовать с помощью поляризационной оптики. Переходы между расщепленными уровнями происходят с поглощением фотонов правой и левой поляризации, что приводит к сдвигу по частоте спектров показателя преломления и коэффициента поглощения для волн различной поляризации. При наблюдении перпендикулярно магнитному полю все компоненты спектральной линии поляризованы линейно: параллельно полю H – π -компоненты, и перпендикулярно – σ -компонента. В естественном свете все направления колебаний электрического поля равновероятны, и его можно представить как сумму двух линейно поляризованных волн равной интенсивности, в которых колебания происходят, соответственно, параллельно (π -поляризация) и перпендикулярно плоскости падения (σ -поляризация) света. Если направление распространения электромагнитной волны совпадает с направлением приложенного магнитного поля, то при прохождении света в веществе, находящемся в этом поле, возникает различие скоростей и фаз волн, поляризованных по правому и левому кругу по отношению к направлению магнитного поля, и результирующая волна имеет эллиптическую поляризацию. В случае различия только скоростей результирующая волна приобретает круговую поляризацию.

Разница между коэффициентами преломления компонент волны поляризованных по правому и левому кругу называется эффектом магнитного кругового двупреломления, или **эффектом Фарадея**, что проявляется в повороте плоскости поляризации луча света, проходящего через прозрачную среду, находящуюся в магнитном поле.

Эффект Фарадея

Этот эффект, открытый М. Фарадеем в 1845 году, стал первым доказательством наличия прямой связи между магнетизмом и светом. Применение несложной оптической схемы, предложенной Фарадеем в середине XIX века (рис. 2), не перестает удивлять исследователей и сегодня, приводя к неожиданным открытиям при исследовании различных материалов.

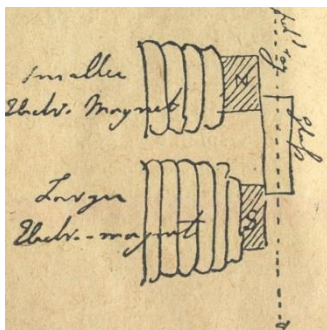


Рис. 2. Рисунок Майкла Фарадея: опыт по открытию явления вращения плоскости поляризации

При включении магнитного поля плоскость поляризации линейно поляризованного монохроматического света с длиной волны λ , прошедшего в среде путь l , поворачивается на угол:

$$\alpha = \frac{\pi l(n_+ - n_-)}{\lambda}, \quad (1)$$

где n_+ и n_- – показатели преломления для право- и лево- поляризованных компонент световой волны. В области не очень сильных магнитных полей разность $n_+ - n_-$ линейно зависит от напряжённости магнитного поля и в общем виде угол фарадеевского вращения описывается соотношением:

$$\alpha = V H l, \quad (2)$$

где V – постоянная Верде – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств вещества, длины волны излучения и температуры, H – напряженность внешнего магнитного поля, l – путь в веществе. Схематически вращение плоскости поляризации показано на рис. 3.

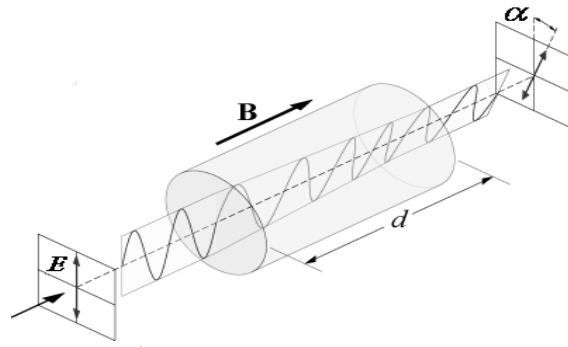


Рис. 3. Схематическое изображение вращения плоскости поляризации света.

Проведенное выше рассмотрение относится к диамагнитным веществам. В случае парамагнитных веществ магнитное поле приводит не только к расщеплению уровней, но и создает разность заселенностей компонент расщепления основного уровня. Поэтому эффект Фарадея обусловлен не только расщеплением уровней энергии в магнитном поле, но и изменением заселенности подуровней основного состояния, что приводит к различной величине показателей преломления и коэффициента поглощения для различной поляризации светового луча по отношению к направлению магнитного поля. Эта разность пропорциональна величине поля точно так же, как и намагниченность вещества. Поэтому по характеру полевой зависимости эффекта Фарадея можно судить о характере полевой зависимости намагниченности.

Феноменологическая теория эффекта Фарадея

С феноменологической точки зрения магнитооптические эффекты обусловлены влиянием внешнего магнитного поля на комплексную диэлектрическую проницаемость $\hat{\epsilon}$ вещества, которая характеризует отклик среды на воздействие электромагнитного поля. В простейшем случае изотропного материала, намагниченного вдоль оси z , тензор $\hat{\epsilon}$ описывается выражением:

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & i\epsilon_{xy} & 0 \\ -i\epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Диагональные компоненты при отсутствии магнитного дупреломления равны друг другу $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$. Действительная (ϵ'_{xx}) и мнимая (ϵ''_{xx}) части компоненты ϵ_{xx} связаны с измеряемым в эксперименте комплексным показателем преломления, $n = n - ik$, выражениями:

$$\begin{cases} \epsilon'_{xx} = n^2 - k^2 \\ \epsilon''_{xx} = 2nk \end{cases}, \quad (4)$$

где n – показатель преломления; k – показатель поглощения.

Эффект Фарадея (α_F) определяются выражением:

$$\alpha_F = -\frac{\pi}{\lambda} \left\{ \frac{k}{k^2+n^2} \varepsilon''_{xy} + \frac{n}{k^2+n^2} \varepsilon'_{xy} \right\}, \quad (5)$$

где λ – длина электромагнитной волны.

В соответствии с микроскопической теорией спектральная зависимость эффекта Фарадея описывается выражением:

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\hbar c} N_a \left\{ \frac{2\omega_{ja} \omega^2 [(\omega_{ja}^2 - \omega^2)^2 - \omega^2 \Gamma_{ja}^2] A}{\hbar [(\omega_{ja}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{ja}^2]^2} + \frac{\omega^2 (\omega_{ja}^2 - \omega^2)}{(\omega_{ja}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_{ja}^2} \left[\frac{C}{kT} \right] \right\} H_z l \quad (6)$$

где N_a – число молекул в состоянии a в единице объема, Γ_{ja} – приближенно совпадает с полушириной спектральной линии, ω – текущая частота электромагнитной волны, ω_{ja} – частота электронного перехода из состояния a в состояние j , H_z – напряженность магнитного поля вдоль оси Z , l – длина пути света в веществе. Константы A и C относятся к двум вкладам: диамагнитный вклад A пропорционален расщеплению электронных состояний в магнитном поле и не зависит от температуры; парамагнитный вклад C пропорционален разности заселенностей тепловых компонент расщепления основного состояния в магнитном поле и, поэтому, является функцией температуры.

Для ферромагнитных материалов зависимость эффекта Фарадея от величины внешнего магнитного поля усложняется вследствие наличия в них спонтанной намагниченности. Применительно к таким материалам величина эффекта определяется не магнитным полем, а величиной намагниченности образца M :

$$\alpha = K(\lambda, T) M(H) d, \quad (7)$$

где K – постоянная Кундта, d – толщина образца. Постоянная Кундта зависит от природы вещества, его температуры, и от длины волны проходящего света.

Диамагнетики в магнитном поле всегда имеют положительное вращение (т. е. вращение по часовой стрелке, если смотреть по направлению поля), парамагнетики – отрицательное, а ферромагнетики могут проявлять как положительное, так и отрицательное вращение.

Диамагнитный вклад

Диамагнетизм относится к чрезвычайно слабым магнитным явлениям, которые обнаруживаются в веществах, имеющих отрицательный знак магнитной восприимчивости величиной $\chi \sim -10^{-5}$. Причиной диамагнетизма веществ является электромагнитная индукция молекулярных токов, вызываемая в электронных оболочках атомов внешним магнитным полем. В молекуле (атоме) диамагнитного вещества спиновые и орбитальные моменты электронов на замкнутых оболочках всегда скомпенсированы таким образом, что их суммарный момент равен нулю. Однако во внешнем магнитном поле все электроны начинают прецессировать вокруг оси, совпадающей с направлением поля, с постоянной угловой скоростью ($v_0 = eH/2m_0c$). Индуцированный при этом магнитный момент в соответствии с правилом Ленца будет иметь направление, противоположное внешнему полю. Величина индуцированного момента прямо пропорциональна напряжённости магнитного поля, не зависит от температуры, и определяется лишь размерами замкнутых оболочек.

Явление диамагнетизма присуще всем веществам. Связь постоянной Верде V с ω в общем случае хорошо описывается первым слагаемым в выражении (6). Вдали от полосы поглощения, например, как это показано на рис. 4 (а), когда $\omega^2_{ja} - \omega^2 \gg \omega\Gamma_{ji}$ это слагаемое можно упростить к виду:

$$V = \frac{A\lambda}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)^2}, \quad (8)$$

где A – константа, λ – текущая длина волны, λ_0 – эффективная длина волны, соответствующая электронному переходу. В случае, когда осуществляется несколько переходов, λ_0 приблизительно соответствует переходу, дающему максимальный вклад в ЭФ. При этом величина $(\lambda/V)^{1/2}$ линейна по λ^2 и отрезок на оси длин волн, отсекаемый прямой $(\lambda/V)^{1/2} = f(\lambda^2)$, соответствует λ_0^2 , пример данной зависимости показан на рис. 4 (б).

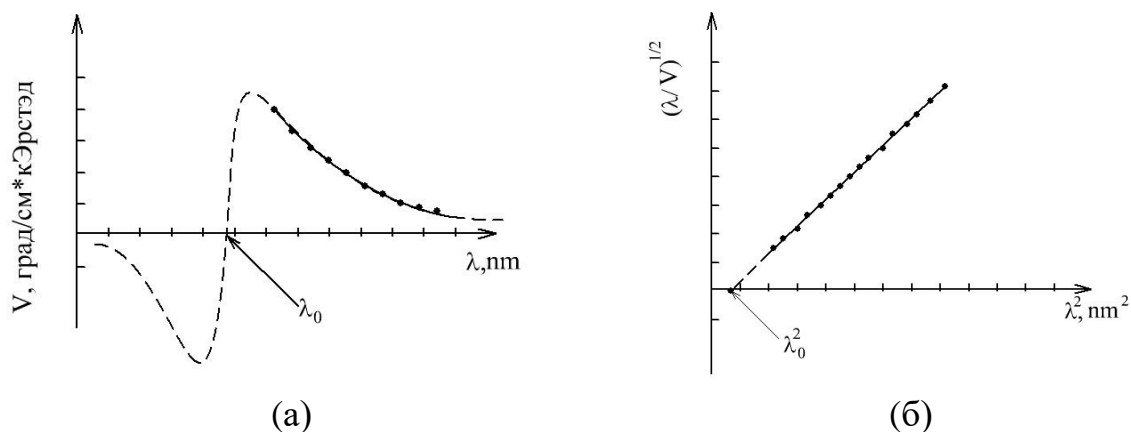


Рис. 4. а – общий вид спектральной зависимости эффекта Фарадея в области электронного перехода и положение на нем части спектра, далекого от области перехода; б – зависимость $(\lambda/V)^{1/2} = f(\lambda^2)$ диамагнитного вещества.

Парамагнитный вклад

Парамагнитный вклад, как упоминалось выше, обусловлен различием заселённостей магнитных подуровней основного состояния, возникающим в магнитном поле. Парамагнитное поведение проявляется в том, что под действием приложенного внешнего магнитного поля вещество приобретает в направлении поля небольшую намагничённость, при этом восприимчивость χ имеет положительные значения в пределах 10^{-5} – 10^{-2} . Характер зависимости парамагнитного вклада от температуры и от внешнего магнитного поля определяется соотношением между величиной магнитного расщепления уровней основного состояния ΔE (H) и тепловой энергией kT . В области малых магнитных полей или высоких температур $kT \gg \Delta E$ (H) парамагнитный вклад линейно зависит от магнитного поля и обратно пропорционален температуре. В области низких температур и сильных магнитных полей $\Delta E \geq kT$ парамагнитный вклад, подобно намагничённости, испытывает магнитное насыщение.

Парамагнетизм наблюдается в случаях, когда концентрация магнитных атомов или ионов в веществе сравнительно мала, и взаимодействием между их магнитными моментами можно пренебречь. Парамагнетик или образец, содержащий парамагнитные добавки, характеризуются отрицательным знаком ЭФ. Вклад невзаимодействующих парамагнитных ионов в ЭФ должен расти пропорционально их концентрации, а спектральная зависимость постоянной Верде V описываться вторым слагаемым в выражении (6), которое при условии $\omega_{ja}^2 - \omega^2 \gg \omega\Gamma_{ja}$ упрощается к виду:

$$V = \frac{C}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)}, \quad (9)$$

где C и λ_0 – константа и эффективная длина волны, связанные с парамагнитными ионами. Для участков спектра, далеких от электронных переходов, должна наблюдаться линейная зависимость величины α^{-1} или V^{-1} от квадрата длины световой волны. Пересечение прямой $\alpha^{-1} = V^{-1} = f(\lambda^2)$ с осью λ^2 соответствует длине волны λ_0 соответствующего перехода, пример данной зависимости показан на рис. 5.

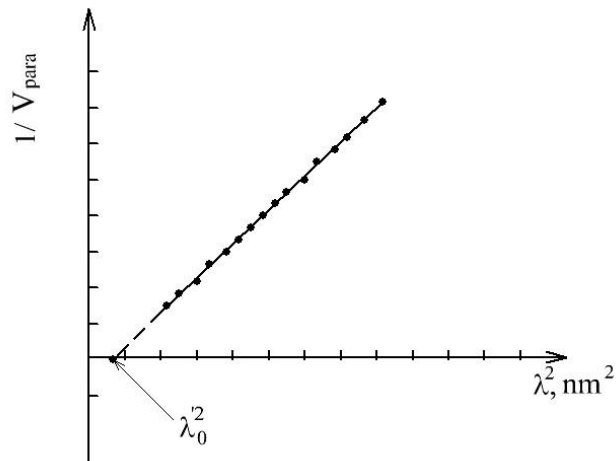


Рис. 5. Зависимость $V_{para}^{-1} = f(\lambda^2)$ парамагнитного вклада.

Ферромагнитный вклад

Взаимодействие света с намагниченными ферромагнетиками отличается целым рядом особенностей, в частности, разность заселенностей подуровней основного состояния возникает благодаря спонтанной намагниченности ферромагнетика, которая обусловлена обменным взаимодействием. Атомные магнитные моменты выстроены вдоль одного направления и намагниченность образца равна:

$$M = Nm, \quad (10)$$

где N – концентрация атомов в единице объема ферромагнетика, m – магнитный момент одного атома:

$$m = gJ\mu_B, \quad (11)$$

здесь g – фактор Ландэ, J – момент импульса атома, μ_B – магнетон Бора. Роль внешнего магнитного поля сводится к техническому намагничиванию ферромагнетика, и при достаточной величине этого поля вещество достигает магнитного насыщения. Следует отметить, что в состоянии полного магнитного насыщения вещество находится при $T = 0$. При повышении температуры хаотическое тепловое движение приводит к тому, что параллельность магнитных моментов нарушается, намагниченность уменьшается, и при достижении определенной температуры, когда энергия

теплового движения становится сравнима с энергией обменного взаимодействия, тепловое движение окончательно разрушает магнитный порядок, и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

Линейная связь между углом α и намагниченностью образца M приводит к тому, что ЭФ по полю также испытывает насыщение.

Если ЭФ в пара- и диамагнетиках связан, с электронными переходами, обеспечивающими край поглощения в ультрафиолетовой области спектра, и переходы другой природы (например, между d или f уровнями магнитного иона) вносят лишь слабые возмущения в ход спектральной кривой, то для ферромагнитных материалов электронные переходы между уровнями (диэлектрики) или зонами (металлы) определяют характер спектра ЭФ в видимой области. Поэтому, изучая специфические изменения интенсивности и поляризации света при его взаимодействии с намагниченным ферромагнетиком в зависимости от частоты света, можно обнаружить резонансные эффекты, обусловленные переходами такого типа.

Спектральная зависимость эффекта Фарадея для ферромагнитных материалов в общем случае описывается вторым слагаемым в выражении (6), аналогично парамагнетикам. С учетом температурной и полевой зависимости M_z . Ввиду того, что различные магнитные ионы характеризуются энергетическими уровнями, расположенными в разных областях спектра, при помощи магнитооптики можно изучить вклады подрешеток, связанных с отдельными ионами. Измерение магнитооптических эффектов является универсальным инструментом не только для определения магнитооптической активности соединений, но и для идентификации исследуемой фазы, поскольку каждое соединение характеризуется своим спектром.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Цели и задачи, решаемые в процессе выполнения курсовой работы

Курсовая работа – важный элемент в общей системе профессиональной подготовки специалистов и бакалавров. Проводится она на втором курсе, и ее главной целью является развитие у студентов навыков самостоятельной научно-исследовательской работы, углубление знаний, полученных при изучении теоретического курса общей физики, освоение методов и методик исследования по выбранным разделам общей и экспериментальной физики.

В процессе выполнения работы решаются следующие задачи:

- формирование представлений о современной физической картине мира;
- приобретение студентами навыков и умений экспериментальной работы по основным разделам физики;
- овладение навыками планирования и проведения физических экспериментов, теоретическими и экспериментальными методами решения физических задач;
- развитие навыков обработки экспериментальных данных с применением компьютерных технологий и умения делать заключения;
- формирование умений по подготовке отчетов и другой документации.

Требования к уровню выполнения и содержанию курсовой работы

На выполнении контрольной работы по физике учебным планом предусмотрено 36 часов (1 з. е.). Из них: 9 часов (0,25 з. е.) на изучение разделов теоретического цикла и 27 часов (0,75 з. е.) на подготовку к выполнению и защите КР.

Варианты заданий к контрольной работе, а также указания к их выполнению выдаются индивидуально каждому студенту преподавателем, ведущим лекционные и практические занятия.

В результате выполнения КР по общей физике студент должен:

Знать:

- основные физические явления и основные законы физики; границы их применимости, применение законов в важнейших практических приложениях;
- основные физические величины и физические константы, их определение, смысл, способы и единицы их измерения;
- фундаментальные физические опыты и их роль в развитии инноватики; назначение и принципы действия важнейших физических приборов, в том числе при решении прикладных аспектов атомной физики.

Уметь:

– объяснить основные наблюдаемые природные и техногенные явления и эффекты с позиций фундаментальных физических взаимодействий; указать, какие законы описывают данное явление или эффект;

– работать с приборами и оборудованием современной физической лаборатории;

– использовать различные методики физических измерений и обработки экспериментальных данных;

– использовать методы адекватного физического и математического моделирования при выполнении курсовой работы, а также применять методы физико-математического анализа к решению конкретных инновационных задач.

Владеть навыками:

– использования основных общезначимых законов и принципов в важнейших практических приложениях;

– применения основных методов физико-математического анализа для решения естественно-научных задач;

– правильной эксплуатации основных приборов и оборудования современной физической лаборатории, в том числе при выполнении курсовой работы «Прикладные аспекты атомной физики»;

– обработки и интерпретирования результатов эксперимента.

На основании полученных знаний, умений и навыков должна быть сформирована следующая *компетенция*:

– способность применять знания математики, физики и естествознания, химии и материаловедения, теории управления и информационных технологий в инновационной деятельности (ОПК-7)

Выбор и закрепление темы

В начале семестра, в течение которого должна быть выполнена КР, студент обязан:

1) ознакомиться с тематикой КР и выбрать тему;

2) встретиться с преподавателем, предложившим тему, и получить разрешение на работу (разрешение оформляется в виде резолюции преподавателя на заявлении студента);

3) обсудить с преподавателем (руководителем) порядок выполнения КР (оформляется в виде *план-графика*), который включает следующие пункты с указанием сроков исполнения:

– тема работы;

– инструктаж по технике безопасности;

– составление библиографического обзора по теме исследования;

– этапы накопления экспериментального материала и его обработки;

– проведение анализа;

– составление доклада.

План-график с подписями руководителя и студента составляется, как правило, в двух экземплярах, один из которых остается у руководителя, а другой – у студента.

Закрепление темы за студентом и назначение руководителя для оказания методической и научной помощи в работе производится распоряжением заведующего кафедрой физики.

Выполнение план-графика и текущий контроль

Основной формой работы является самостоятельная научно-исследовательская работа.

При составлении обзора студенты используют учебники по физике, научную литературу и статьи из периодической научной печати.

Контроль план-графика работы осуществляется руководителем при обсуждениях со студентами (студентом) хода выполнения поставленных физических задач на научных семинарах. Семинары рекомендуется проводить с группой студентов, работающих над одной общей темой или над разными темами общего направления, а также приглашать специалистов из организаций, на базе которых идёт реализация работы.

Семинар проводится по следующей форме.

1. Доклады студентов о полученных за месяц результатах работы, включая их анализ.

2. Обсуждение докладов. Ответы на вопросы.

3. Формулировка заключения по данному этапу работы. Выдача рекомендаций студентам в форме индивидуальных заданий (корректировка хода работы).

Руководитель темы, обращаясь ко всей аудитории или к отдельным студентам с вопросами, выясняет степень понимания излагаемого материала, уровень активности и внимания студентов.

Выполнение студентом задания, знание теоретического материала, умение анализировать и решать физические задачи характеризуют уровень развития каждого студента.

Лучшими формами текущего контроля являются индивидуальные собеседования при сдаче студентами индивидуальных заданий по курсовой работе.

Если степень готовности курсовой работы существенно ниже планируемой, что может привести в дальнейшем к срыву сроков ее выполнения, то руководитель информирует об этом заведующего кафедрой или выносит вопрос на заседание кафедры.

Заведующий кафедрой контролирует ход выполнения КР студентами путём опроса руководителей или назначения контрольных проверок наработанного материала не реже одного раза в месяц. График

контрольных проверок вместе с экраном выполнения КР вывешивается на доске объявлений кафедры.

Календарный график выполнения курсовой работы

№ п/п	Содержание работы	Сроки выполнения
1	Выбор темы и выдача задания на КР	февраль 20__ г
2	Составление плана работы совместно с руководителем	
3	Работа с научной и технической литературой, составление библиографического обзора, освоение методов проведения эксперимента	
4	1-й этап контроля преподавателем (готовность работы – 30 %)	март 20__ г
5	Выполнение расчётных или экспериментальных заданий по КР	
6	2-й этап контроля преподавателем (готовность работы – 60 %)	
7	Проведение дополнительных опытов и расчётов	апрель 20__ г
8	Представление собранного материала КР – 3-й этап контроля (готовность работы – 90 %)	
9	Оформление КР в виде текстового документа, предварительная оценка руководителем (готовность работы – 100 %)	май 20__ г
10	Защита КР в форме доклада	

Представление отчета и защита курсовой работы

После выполненной работы пишется отчет в соответствии с требованиями стандартов организации (СТО)[3].

Публичная защита студентом результатов самостоятельной научно-исследовательской работы (КР) происходит в назначенные дни защит в присутствии всей студенческой группы и преподавателя или с приглашением специалистов по данным направлениям исследований.

В процессе защиты проверяется умение студента подготовить и прочитать доклад, умение грамотно отвечать на вопросы.

Требования к оформлению курсовой работы

Структура курсовой работы

Курсовая работа должна содержать:

- текстовый документ (ТД);
- графический или иллюстрационный материал.

Текстовый документ (пояснительная записка) – документ, содержащий систематизированные данные о выполненной студентом проектной, научной или исследовательской работе с описанием процесса её выполнения и полученных результатов в виде текста и необходимых иллюстраций.

Оформление ТД должно соответствовать требованию СТО [1]. Минимальный объем – 10-15 листов (страниц) текста формата А4. ТД выполняется компьютерным набором на одной стороне листов белой нелинованной бумаги формата А4 (21см×29,7см) с использованием текстового редактора WORD и ему подобных. Используется гарнитура шрифта Times New Roman, 14 кегль, междустрочный интервал 1,5. В таблицах допускается уменьшение шрифта до 10 кегль с междустрочным интервалом 1,0.

Формирование ТД производится в соответствии со схемой его структурных элементов (в указанной ниже последовательности):

- титульный лист;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основная часть:
- литературный обзор;
- методы/методики исследований;
- результаты исследований с рисунками и схемами;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения (по необходимости).

Графическим материалом являются чертежи и схемы, выполненные в соответствии с требованиями Единой Системы Конструкторской Документации (ЕСКД), *Единой Системы Программной документации (ЕСПД)*, Системы Проектной Документации для Строительства (СПДС) и Единой Системы Технологической Документации (ЕСТД). Чертежи, схемы, рисунки могут представляться как на отдельных листах, используемых при публичной защите, так и в составе ТД.

Иллюстрационным материалом являются плакаты, макеты, образцы, действующие модели, программы и т. д.

Необходимость применения графического и иллюстрационного материала, а также количество и формат листов определяются заданием курсовой работы и условиями защиты.

Требования к структурным элементам текстового документа

Титульный лист. Содержание титульного листа приведено в приложении.

Реферат размещается на отдельном листе и по объему не превышает одну страницу.

Реферат должен содержать:

- сведения о количестве листов (страниц) ТД, количестве иллюстраций, таблиц, используемых источников, приложений, листов графического или иллюстрационного материала;

– текст реферата.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- полученные результаты и их новизну;
- степень внедрения результатов работы;
- область применения;
- экономическую эффективность или значимость работы;
- дополнительные сведения.

Если ТД не содержит сведений по отдельным, выше перечисленным структурным частям реферата, то в тексте они опускаются, при этом последовательность изложения имеющихся пунктов сохраняется.

Содержание должно отражать все материалы структуры ТД. В содержании перечисляют введение, заголовки разделов и подразделов основной части, заключение, список использованных источников, каждое приложение с указанием номеров листов (страниц), на которых они начинаются.

При наличии самостоятельных конструкторских, технологических, программных и иных документов, помещенных в ТД, их перечисляют в содержании с указанием обозначений и наименований.

Введение должно раскрывать основной замысел КР. Здесь дается обоснование проблемы, формулируются цель и задачи КР, а также перечисляются методы и средства решения поставленных задач.

Основная часть отражает процесс решения поставленных в КР задач и полученные результаты.

Основная часть ТД должна содержать следующие разделы:

- обоснование темы КР (литературный обзор);
- методы и методики проведения исследований;
- основное содержание и результаты выполненной работы;
- заключение и выводы по результатам проделанной работы.

Обоснование темы курсовой работы (литературный обзор) должно содержать:

- характеристику объекта исследования;
- анализ исследуемой проблемы, предметом которого могут быть результаты предыдущих исследований или разработок, степень решения проблемы, новые идеи и гипотезы, возможные подходы к решению проблемы;
- заключение о целесообразности разработки темы, которое может включать и экономическую оценку принятого решения.

Структура, объем, содержание и степень детализации разделов, отражающих основное содержание и результаты выполненной работы, определяются руководителем работы или заведующим кафедрой (в методических указаниях или иных документах).

В качестве дополнительных разделов могут быть рассмотрены вопросы охраны труда, охраны окружающей среды, расчет экономической эффективности принятых решений, результаты патентного поиска, описание изобретения и др. Степень детализации этих разделов и место их расположения в ТД определяются руководителем.

Заключение должно содержать:

- краткие выводы по результатам КР;
- оценку полноты решения поставленных задач;
- рекомендации по конкретному использованию результатов КР;
- практическую или теоретическую значимость КР.

Список использованных источников должен содержать сведения об источниках, использованных при выполнении КР, которые указываются единой сквозной нумерацией.

Приложения. Материал, связанный с КР, который по каким-либо причинам не может быть включен в основную часть ТД, допускается помещать в приложениях.

Приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания аппаратуры и приборов, программные документы, описания алгоритмов и программ для ЭВМ и т.д.

ЗАДАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Для настоящей курсовой работы использованы данные, полученные при измерении спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея на образцах стекол, основного состава $K_2O-B_2O_3-Al_2O_3$, допированных оксидами парамагнитных элементов Fe и Mn в различных концентрациях и подвергнутых дополнительной термообработке при температуре 560 °С, в течение 2 часов, а также стекло, не содержащее парамагнитных добавок. В последнем случае стекло является диамагнетиком. В исходном состоянии допированные стекла содержат Fe и Mn в парамагнитном состоянии. В результате термообработки в них формируются наночастицы ферромагнитного материала. Таким образом, студенты будут иметь возможность изучить полевые и спектральные зависимости эффекта Фарадея в веществе в трех магнитных состояниях. В табл. 1 приведены концентрации допирующих оксидов.

Таблица 1

Параметры образцов, толщина и количество введенных оксидов парамагнитных элементов в процентах по отношению к 100 % стекла без добавок

Номер образца	Толщина, см	Количество введенных парамагнитных оксидов
1	0.092	0
2	0.085	1.5 Fe ₂ O ₃ +0.2Mn ₂ O ₃
3	0.092	1.5 Fe ₂ O ₃ +0.4 Mn ₂ O ₃
4	0.1	1.5 Fe ₂ O ₃ +0.6 Mn ₂ O ₃
5	0.1	1.5 Fe ₂ O ₃ +1.2 Mn ₂ O ₃

В заданиях будут представлены результаты измерений в виде таблиц.
Задание 1.

Определение энергии электронных переходов, обуславливающих эффект Фарадея диамагнитного и парамагнитного веществ.

В табл. 2 представлены значения эффекта Фарадея ($\Delta\alpha_i$) в градусах, измененного для образцов 1-5 в магнитном поле $B=0.2$ Тл. Используя приведенные данные, рассчитать константу Верде, в размерности – град/см*Тл,

$$V = \frac{\Delta\alpha_i}{d_i \cdot B}$$

и построить спектральные зависимости константы Верде $V(\lambda)$ в графическом редакторе, например Origin, для образца 1. Сравнить полученные зависимости с характером теоретических кривых константы Верде диамагнитного вещества. Поскольку в диамагнитном веществе ЭФ описывается формулой (8), функция $(\lambda/V)^{1/2}$ должна быть линейной по λ^2 ,

а отрезок, отсекаемый линией по оси λ^2 , будет соответствовать квадрату длины волны, ответственной за эффект. Определить длину волны этого перехода, обуславливающего эффект в диамагнитном веществе.

Для определения парамагнитного вклада в постоянную Верде образцов 2-5 необходимо для каждого образца определить разность $V_{para}=(V_i - V_1)$ (вклад V_{para} должен получиться отрицательным). Построить спектральные зависимости этих разностей, а также зависимости $V^{-1}=f(\lambda^2)$, пересечение которых с осью λ^2 соответствует квадрату длины волны λ'_0 соответствующего перехода, согласно формуле (9). Определить зависит ли длина λ'_0 от концентрации парамагнитных элементов в стекле.

Задание 2.

В табл. 3 приведены данные спектральной зависимости эффекта Фарадея для образцов 3 и 5, подвергнутых термической обработке. Построить эти зависимости и методом сравнения со спектральными зависимостями эффекта Фарадея различных веществ, известных в литературе и приведённых на рис. 6, сделать предположение о составе магнитной кристаллической фазы, сформировавшейся в образцах в результате дополнительной термической обработки.

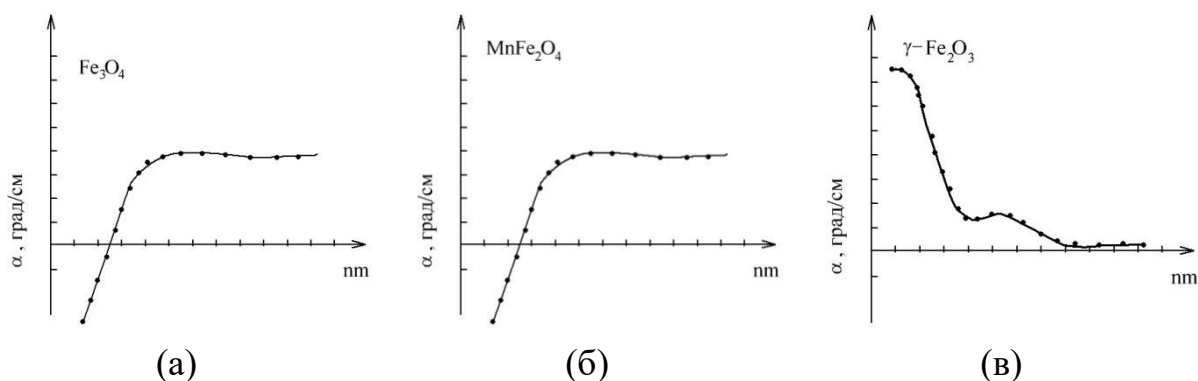


Рис. 6. Вид спектральной зависимости эффекта Фарадея для магнетита – Fe_3O_4 (а), марганцевого феррита – $\text{Mn}_2\text{Fe}_3\text{O}_4$ (б) и маггемита – $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (в).

Задание 3.

В табл. 4 приведены данные полевых зависимостей эффекта Фарадея двух образцов. Необходимо построить эти зависимости, соотнести со спектральными зависимостями исходного и термообработанных образцов и сделать вывод о типе магнитного упорядочения образцов. По гистерезисной зависимости эффекта Фарадея определить остаточное значение поворота плоскости поляризации (в нулевом поле) и коэрцитивную силу, необходимую для перемагничивания образца.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

«Исследование спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея в веществах с различными типами магнитного порядка»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
институт инженерной физики и радиоэлектроники

Кафедра Экспериментальной физики и инновационных технологий
Курсовая работа по общей физике
Направление (специальность): Б1.Б8 «Физика»

Тема: Исследование спектральных и полевых зависимостей эффекта Фарадея в веществах с различными типами магнитного порядка

Студент
КУРС ___ СПЕЦ. _____

подпись, дата инициалы, фамилия

УЧ.ШИФР _____
Преподаватель

подпись, дата инициалы, фамилия

Красноярск 2019

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 2

Экспериментальные значения поворота плоскости поляризации
в исходных образцах. Измерения проведены в магнитном поле 0.2 Тл.

Длина волны, λ (нм)	$\Delta\alpha$ (град.)				
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
425	0.093	0.045	0.051	0.053	0.050
450	0.083	0.040	0.046	0.048	0.048
475	0.075	0.038	0.042	0.043	0.047
500	0.068	0.033	0.038	0.039	0.040
525	0.063	0.029	0.034	0.035	0.035
550	0.057	0.028	0.031	0.033	0.033
575	0.053	0.025	0.029	0.028	0.028
600	0.050	0.023	0.025	0.028	0.027
625	0.045	0.021	0.024	0.026	0.024
650	0.042	0.019	0.022	0.023	0.023
675	0.038	0.018	0.020	0.021	0.021
700	0.035	0.017	0.019	0.020	0.020
725	0.032	0.016	0.017	0.019	0.018
750	0.032	0.015	0.016	0.018	0.018
775	0.030	0.013	0.015	0.017	0.016
800	0.028	0.013	0.014	0.015	0.015
825	0.025	0.012	0.014	0.014	0.014
850	0.025	0.011	0.013	0.014	0.014
875	0.022	0.010	0.012	0.013	0.013
900	0.022	0.010	0.012	0.012	0.012
925	0.020	0.009	0.012	0.012	0.012
950	0.020	0.009	0.010	0.011	0.011
975	0.017	0.008	0.010	0.010	0.011
1000	0.017	0.007	0.010	0.010	0.011
1025	0.015	0.006	0.008	0.009	0.010

Таблица 3

Экспериментальные значения поворота плоскости поляризации в образцах
после дополнительной термической обработки в делениях шкалы.

Измерения проведены в магнитном поле 0.2 Тл.

Длина волны, λ (нм)	Образец 3, α (град.)	Длина волны, λ (нм)	Образец 5, α (град.)
425	--	675	24.54
450	--	700	22.99
475	-7.01	725	21.20
500	-3.85	750	20.14
525	-1.71	800	17.46
550	0.43	850	14.81

Окончание табл. 3

575	2.31	900	12.65
600	3.93	950	11.10
625	4.88	1000	10.07
650	5.81	1050	9.04
675	5.98	1100	7.77
700	6.41	1150	6.56
725	6.58	1200	5.71
750	6.58	1200	5.71
775	6.581	1300	4.60
800	6.50	1400	3.80
825	6.41	1500	3.51
850	6.33	1600	2.76
875	6.24	1700	2.66
900	6.33	1800	2.49
925	6.15	1900	2.18
950	6.068	2000	2.05
975	6.07	2100	1.87
1000	5.98	2200	1.69
1025	6.07	2200	1.69

Таблица 4

Данные полевых зависимостей эффекта Фарадея, записанных на длине волны $\lambda=700$ нм.

В, Тл	Образец 1, исходный α (град./см)	$\Delta\alpha$ (град.)	
		Образец 3, обработанный	
		Верхняя ветвь	Нижняя ветвь
0	0.0124		
0.005	0.025	2.619	-2.619
0.01	0.074	3.095	0.238
0.03	0.124	4.683	3.571
0.05	0.173	5.476	4.683
0.07	0.222	6.111	5.318
0.09	0.296	6.429	5.794
0.12	0.395	7.064	6.587
0.16	0.494	7.698	7.222
0.2	0.593	8.116	7.857
0.24	0.741	8.492	8.175
0.3	0.840	8.968	8.810
0.34	0.889	9.286	9.127
0.36	0.988	9.444	9.286
0.4	1.087	9.762	9.762
0.44	1.136	9.762	9.762
0.46	1.235	9.921	9.921
0.5	0.012	10.080	10.080

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старостин Н. В., Феофилов П. П. Магнитная циркулярная анизотропия в кристаллах. Успехи физических наук, 1969 Т. 97. С. 621–655.
2. Звездин А. К., Котов В. А. Магнитооптика тонких пленок. Наука, 1988.
3. Стандарт организации. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. СТО 4.2–07–2014. Красноярск: СФУ, 2014.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПОЛЕВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В ВЕЩЕСТВАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ
МАГНИТНОГО ПОРЯДКА. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОЙ
РАБОТЕ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Соколов Алексей Эдуардович
Иванова Оксана Станиславовна
Эдельман Ирина Самсоновна

Компьютерная верстка *И. В. Владимировой*
Корректор *А. В. Прохоренко*

Подписано в печать 09.12.2019. Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ № 10231

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>,
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru