

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Пудова Алёна Алексеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Оценка толщины скин-слоя методом ферромагнитного резонанса**  
Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19306

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н. Трухан Сергей  
Николаевич

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Рева Владимир Борисович \_\_\_\_\_

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин \_\_\_\_\_

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы являлась оценка толщины скин-слоя проводящего ферромагнитного образца методом магнитного резонанса. Для этого проводилось сравнение экспериментальных и теоретических значений отношений интегральных интенсивностей спектров поглощения двух образцов: парамагнитного с известным количеством спинов и ферромагнитного проводящего образца, магнитный момент которого определялся магнитостатическим способом.

Результаты данной работы могут быть использованы в дальнейшем для количественного анализа спектров магнитного резонанса содержащих мелкодисперсные металлические ферромагнитные частицы.

Ключевые слова: скин-слой, магнитный резонанс, интенсивность спектра поглощения

## **Оглавление**

Введение.....	4
Теоретическая часть.....	5
Практическая часть .....	8
Обсуждение результатов .....	10
Вывод.....	11
Список литературы .....	11
Приложение .....	12

## Введение

В 1944 году Евгением Константиновичем Завойским было открыто явление электронного парамагнитного резонанса, которое развилось в крупную отрасль физики - магниторезонансную радиоскопию, исследующую свойства вещества на атомном и молекулярном уровне.

Поглощение электромагнитного излучения имело избирательный (резонансный) характер, т. е. наблюдалось лишь при определенном соотношении между напряженностью постоянного магнитного поля и частотой переменного электромагнитного поля. Поэтому открытое явление получило название электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Электронный парамагнитный резонанс является очень полезным и надежным методом исследования структур различных веществ и поэтому имеет широкую область применения в физике, в химии и в биологии. Спектр ЭПР позволяет получить ценную информацию о свойствах парамагнитных центров таких как: спиновая релаксация, концентрация парамагнитных центров, природа взаимодействия электронов с решеткой и между собой.

Однако при проведении количественных измерений методом ЭПР, возникает ряд осложняющих факторов, влияние которых необходимо учитывать. При исследовании методом ЭПР образцов, содержащих металлические проводящие частицы дополнительным фактором является скин-эффект, имеющий достаточно существенное значение. Часто такие образцы имеют ферромагнитные свойства и для них наблюдается явление ферромагнитного резонанса (ФМР).

Глобальная цель работы состояла в том, чтобы убедиться, что скин-эффект влияет на интенсивность поглощения в ФМР. В работе мы также покажем, что величина этого эффекта в наших условиях измерений согласуется с величиной классического скин-эффекта.

## Теоретическая часть

Ферромагнетики – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры. [1]

### Общее свойство ферромагнетиков

Ферромагнетики отличаются от других магнитных веществ (пара- и диамагнетиков) тем, что магнитная индукция в них обычно во много раз превышает магнитную индукцию в вакууме. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле  $\vec{H}$ , то индукция  $\vec{B}$  в нем будет выражаться соотношением  $\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{I})$ , (1)

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м), а  $\vec{I}$  – намагниченность (магнитный момент единицы объёма).

Правую часть соотношения (1) можно записать в виде  $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ , (2) где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества ( $\mu$  зависит от магнитного поля  $\vec{H}$  и для ферромагнетика  $\gg 1$  (в достаточно слабых полях)) [2]

Ферромагнитный резонанс — одна из разновидностей электронного магнитного резонанса.

Ферромагнитный резонанс проявляется в избирательном поглощении ферромагнетиком энергии электромагнитного поля при частотах, совпадающих с собственными частотами прецессии магнитных моментов электронной системы ферромагнитного образца во внутреннем эффективном магнитном поле. Или иными словами, это возбуждение во всём объёме образца колебаний однородной прецессии вектора намагниченности, вызываемых магнитным СВЧ-полем, перпендикулярным постоянному намагничивающему полю.

Ферромагнитный резонанс обнаруживается методами магнитной радиоспектроскопии. Его основные характеристики — резонансные частоты, релаксация, форма и ширина линий поглощения,

нелинейные эффекты, определяются коллективной многоэлектронной природой ферромагнетизма. При этом, наличие доменной структуры в ферромагнетике усложняет процесс, приводя к возможности появления нескольких резонансных пиков, а резонансное поглощение СВЧ энергии вызывает его локальный нагрев.

От электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) ферромагнитный резонанс отличается тем, что поглощение энергии при ферромагнитном резонансе на много порядков сильнее и условие резонанса (связь между резонансной частотой переменного поля и величиной постоянного магнитного поля) существенно зависит от формы образцов. Эти отличия вызваны тем, что ферромагнитный резонанс является коллективным эффектом: элементарные магнитные моменты ферромагнетика сильно связаны и поглощение энергии происходит в результате взаимодействия переменного поля с суммарными магнитными моментами макроскопических объёмов вещества. [3]

#### Скин-эффект

Скин-эффект — поверхностный эффект ослабления электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды, в результате этого эффекта, например, переменный ток высокой частоты или переменный ток по сечению проводника или переменный магнитный поток по сечению магнитопровода, при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению.

#### Причины эффекта.

Скин-эффект обусловлен тем, что при распространении электромагнитной волны в проводящей среде возникают вихревые токи, в результате чего часть электромагнитной энергии преобразуется в теплоту. Это и приводит к уменьшению напряжённостей электрического и магнитного полей и плотности тока, т. е. к затуханию волны.

Чем выше частота электромагнитного поля и больше магнитная проницаемость проводника, тем сильнее (в соответствии с Максвелла

уравнениями) вихревое электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, а чем больше проводимость проводника, тем больше плотность тока и рассеиваемая в единице объёма мощность (в соответствии с законами Ома и Джоуля — Ленца).

### Толщина скин-слоя

Плотность тока максимальна у поверхности проводника. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине  $\delta$  становится меньше в  $e$  раз (примерно на 70 %). Эта глубина называется толщиной скин-слоя и равна:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}} \quad (1)$$

Очевидно, что при достаточно большой частоте  $\omega$  толщина скин-слоя может быть очень малой. Также из экспоненциального убывания плотности тока следует, что практически весь ток сосредоточен в слое толщиной в несколько  $\delta$ , так, уменьшение плотности тока в 100 раз происходит на глубине  $\approx 4,6 \cdot \delta$ , если общая толщина проводника многократно превышает толщину скин-слоя.

Если проводник имеет ферромагнитные свойства, то толщина скин-слоя будет во много раз меньше. Например, для стали ( $\mu_m = 1000$ )  $\delta = 0,74$  мм. Это имеет значение, например, при электрификации железных дорог, поскольку там стальные рельсы используются в качестве обратного провода.

Для расчёта толщины скин-слоя в металле можно использовать следующие приближённые формулы:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu_0\mu_m\omega}} = c \sqrt{2 \frac{\varepsilon_0}{\omega\mu_m} \rho} \quad (2)$$

здесь  $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная,  $\rho$  — удельное сопротивление,  $c$  — скорость света,  $\mu_m$  — (близка к единице для пара- и диамагнетиков — меди, серебра, и т. п.),  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота.

Все величины выражены в системе СИ. [4]

## Практическая часть



Рисунок 1. ЭПР-спектрометр

Эксперимент проводился на ЭПР-спектрометре Bruker Elexsys E500. Этот научный прибор исследовательского класса записывал производную интенсивности поглощения СВЧ излучения.

При проведении исследования были использованы образцы:

1) Шарик

Диаметр: 1,005 мм

Вес: 719,5 – 722,5 мг

2)  $\text{VOSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (сульфат ванадила), использовавшийся как образец

Вес: 0,0101 г

Глубина проникновения тока для никеля при частоте 10 ГГц вычислена по формуле (2) в предположении, что  $\mu_m = 1$ :

$$\Delta = 1,4 \text{ мкм}$$

Интенсивность сигнала поглощения в ЭПР/ФМР в одинаковых условиях (при одинаковых параметрах настройки прибора) пропорциональна магнитному моменту образца  $p_m$ . В случае ФМР это справедливо, если размер ферромагнитных частиц много меньше толщины скин-слоя.

Рассчитаем магнитные моменты двух образцов используемых в работе: металлического шарика и парамагнитной соли  $\text{VOSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .

Магнитный момент металлического шарика можно определить с помощью магнитостатических измерений по силе его притяжения к постоянному магниту.

$$F \equiv -\frac{dU}{dr} = p_m \frac{dB}{dz} \quad (3)$$

где  $dB/dz$  – градиент индукции магнитного поля магнита.

Магнитное поле постоянного неодимового магнита состава  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  намагниченного вдоль аксиальной оси рассчитывалась с помощью COMSOL Multiphysics. Магнит имел форму цилиндра ( $D = 30\text{мм}$ ,  $L = 10\text{ мм}$ ). Остаточная намагниченность  $B_r$  спеченных неодимовых магнитах лежит в пределах  $1.2 \pm 0.2\text{ Т}$  [5].

При расчете полагалось, что магнит намагничен однородно и  $B_r = 1.2\text{ Т}$ .

Шарик помещался в точке расположенной на оси магнита в трех миллиметрах от его поверхности. Значение  $|dB(r=0, \varphi=0, z=3\text{ мм})/dz|$  в этой точке составляет  $20.5\text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{А})$ . Следовательно, магнитный момент шарика  $p_m^b = 3.45 \cdot 10^{-4}\text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Магнитный момент парамагнитной соли в условиях эксперимента  $\mu_B V \ll k_B T$  определяется выражением [6]

$$p_m^s = n \frac{g^2 S(S+1) \mu_B^2}{3k_B T} B \quad (4)$$

где  $n$  – число молекул  $\text{VOSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . В нашем случае  $n = 2.84 \cdot 10^{19}$ .

Откуда  $p_m^s = 2.07 \cdot 10^{-7}\text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Следовательно,  $P \equiv p_m^b / p_m^s = 1665$

Однако из измерений интенсивностей сигналов поглощения следует

$$P^{MR} \equiv (DI^b/Q^b)/(DI^s/Q^s) = 7.1, \quad (5)$$

где  $DI_{cp}^b = 118,55 \pm 11,45$ ,

$$DI^s = 14,8$$

Таким образом, СВЧ излучение поглощает лишь  $7.1/1665 = 0.0042$  часть шарика. Основная же его часть оказывается экранирована скин-слоем. Отсюда можно сделать оценку толщины скин-слоя. Из очевидного соотношения

$$\frac{P^{MR}}{P} = \frac{V_{skin}}{V_{ball}} = \frac{4\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Delta^{MR}}{\frac{4}{3}\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3} \quad (6)$$

Следует

$$\Delta^{MR} = \frac{d P^{MR}}{6 P} = 0.71 \mu\text{м} \quad (7)$$

### Обсуждение результатов

В ходе работы был изучен метод магнитного резонанса. Зарегистрированы и обработаны производную интенсивности поглощения СВЧ излучения, произведены расчёты толщины скин-слоя. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими в отношении  $\frac{\Delta}{\Delta^{MR}} \approx 2$ . Расхождение может быть вызвано разными причинами. На мой взгляд, это связано именно со свойствами образца. То есть для того, чтобы результаты сошлись, мы вынуждены уменьшить теоретическое значение толщины скин-слоя. Наиболее очевидное объяснение, на наш взгляд, состоит в том, что значение магнитной восприимчивости даже в больших полях  $\sim 0.5$  Тл для ферромагнитных образцов обычно больше 1.\* Полагая  $\mu_m \sim 4$  получим почти полное совпадение теории и эксперимента. При расчетах толщины использовалось определённое значение проводимости образца, которое мы не знаем точно, то есть можно предположить, что материал, из которого сделан шарик, легирован, неоднороден, его поверхность может иметь другие магнитные свойства. Также при проведении теоретической оценки мы не

---

\* Значения  $\mu_m \gg 1$  для ферромагнетиков получают в малых полях, когда их намагниченность много меньше намагниченности насыщения, а в полях, близких к остаточной индукции материала  $B_r \sim 1$  Т величина  $\mu_m \gtrsim 1$ .

учитывали, что распределение электромагнитных полей в ячейке в среднем не является однородным и компоненты **E** и **H** направлены под разными углами для разных участков поверхности шарика. Это может приводить к зависимости толщины скин-слоя от углов ( $\theta, \varphi$ ) определяющих различные координаты поверхности шарика относительно постоянного внешнего магнитного поля. Для того чтобы учесть возможные факторы влияния, необходимо проводить более детальное исследование образца.

## **Вывод**

Проведенные в работе количественные измерения интегральных интенсивностей спектров магнитного резонанса эталонного парамагнитного образца и ферромагнитного проводящего образца позволили оценить толщину скин-слоя. Полученное значение с хорошей степенью точности совпадает с теоретической оценкой. Высказаны предположения объясняющие некоторые отличия экспериментального и теоретического значений.

## **Список литературы**

- 1) <https://poznayka.org/s29855t1.html>
- 2) Дурасова Ю. А., Матюнин А. В., Погожев В. А. Магнитная индукция в ферромагнетиках Москва: МГУ, 2013. 12 с.
- 3) [Ферромагнитный резонанс — Википедия \(wikipedia.org\)](#)
- 4) [Скин-эффект — Википедия \(wikipedia.org\)](#)
- 5) [Neodymium magnet - Wikipedia](#)
- 6) Физика магнетиков (Боков В.А.) 2002 СПб
- 7) Quantitative EPR Springer (Gareth R. Eaton, Sandra S. Eaton, David P. Barr, Ralph T. Weber), 2010

## Приложение

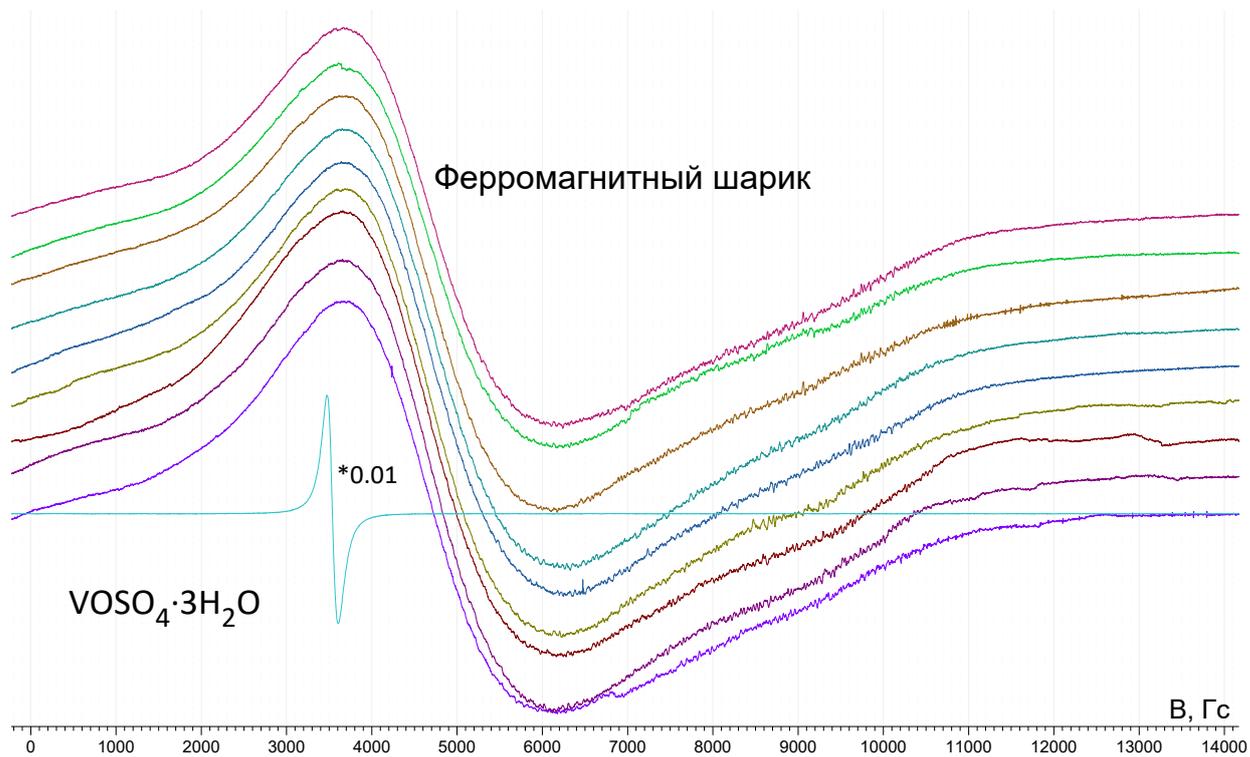


Рисунок 2. Спектры ферромагнитного шарика при его различной ориентации относительно внешнего магнитного поля, а также спектр трехводного сульфата ванадила.

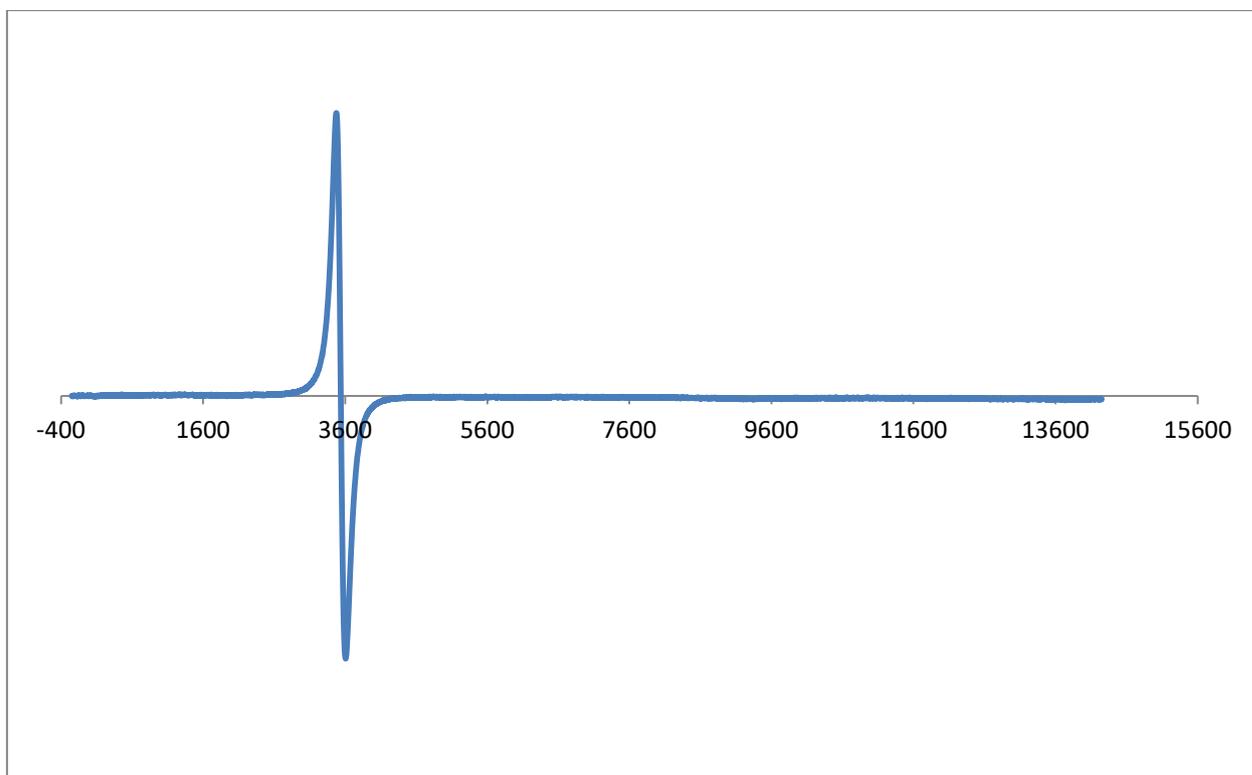


Рисунок 3. Спектр сульфата ванадила