

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

Физический факультет

Институт катализа СО РАН

Эптешев Егор Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Ферромагнитный резонанс анизотропных образцов. Влияние формы.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

**Научный руководитель:**

Трухан Сергей Николаевич

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Капуста Дмитрий Николаевич

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## Содержание

1. Введение.....	3
2. Теоретическая часть.....	3
2.1. Ферромагнетики .....	3
2.2. Ферромагнитный резонанс.....	4
3. Экспериментальная часть.....	6
3.1. Методика измерений.....	6
3.2. Описание установки.....	8
3.3. Результаты измерений .....	9
3.4. Обработка результатов и их обсуждение .....	11
3.5. Источники погрешностей.....	15
4. Заключение .....	15
Список литературы .....	15

## **Аннотация**

Основной целью данной работы является выяснение зависимости резонансного поля от угла между нормалью к плоскости пластинки и направлением внешнего магнитного поля и сравнение с теорией. В данной работе исследуется ферромагнитный резонанс (ФМР) в никелевой пластинке. Приводятся спектры ФМР при различных ориентациях пластинки относительно направления внешнего магнитного поля. Полученные зависимости поля, при котором возникает эффект резонансного поглощения, сравниваются с рассчитанными теоретически. В ходе этой работы мы знакомимся с явлением ферромагнитного резонанса и получаем близкие к теории экспериментальные значения резонансных полей поглощения.

Ключевые слова: ФМР, фактор формы, резонансная частота, резонансное поле.

Работа проводилась в институте катализа им. Г. К. Борескова СО РАН.

## 1. Введение

Ферромагнитный резонанс представляет собой резонансное поглощение электромагнитного излучения ферромагнетиками.

Чтобы выяснить зависимость резонансного поля от угла между нормалью к плоскости пластинки и направлением внешнего магнитного поля и сравнить с теорией были выполнены следующие задачи:

1. Исследование ферромагнитного резонанса на примере пластинки из никеля при различной ориентации в постоянном однородном магнитном поле;
2. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими (выяснение степени соответствия данных на примере пластинки никеля).

Резонансные поля будут находиться графическим методом, то есть построением графиков для каждого отдельного угла.

Использование явления ферромагнитного резонанса лежит в основе работы многих сверхвысокочастотных устройств: резонансных вентилях, фильтров, параметрических усилителей, преобразователей частоты, ограничителей мощности.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1. Ферромагнетики

Ферромагнетики – это вещества, обладающие следующими свойствами:

1. Магнитная восприимчивость ферромагнетиков положительна и значительно больше единицы.
2. При не слишком высоких температурах ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий.
3. Для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса.

Ферромагнетизм присущ веществам лишь в кристаллическом состоянии. Самыми известными примерами ферромагнетиков являются: железо, никель, кобальт, соединения хрома и другие. Ферромагнетики относятся к

сильномагнитным веществам, при этом их намагниченность находится в зависимости от напряженности внешнего поля нелинейно и достигает насыщения. Графически зависимость величины  $M(H)$  можно изобразить:

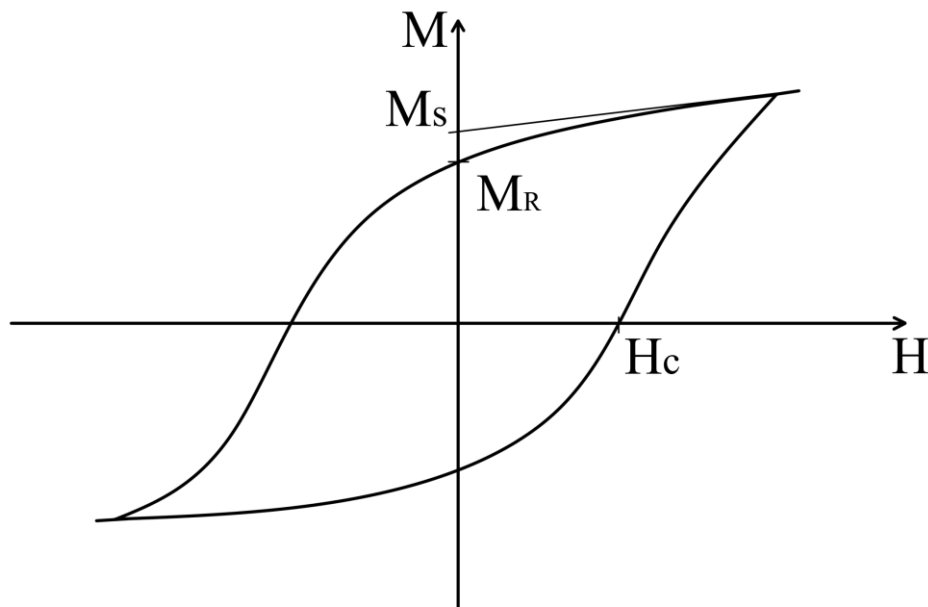


Рис. 1. Петля гистерезиса

Зависимость  $M(H)$  называется петлёй гистерезиса, где  $M_R$  – остаточная намагниченность,  $H_c$  – коэрцитивное поле,  $M_s$  – намагниченность насыщения (в данной работе рассматривается образец никеля, у которого теоретическая  $M_s = (490 - 520)$  кА/м).

## 2.2. Ферромагнитный резонанс

Ферромагнитный резонанс [1] — одна из разновидностей электронного магнитного резонанса, а именно: резонансное поглощение электромагнитного излучения ферромагнетиками в области сверхвысоких частот ( $\sim 1$  ГГц). Ферромагнитный резонанс (ФМР) впервые фактически наблюдал В.К. Аркадьев в 1911 г. ФМР позволяет получать важную информацию о свойствах магнитных материалов.

Так как ферромагнитный резонанс происходит на больших частотах (много больше гистерезисной), то гистерезисные явления можно не учитывать.

Особенность ферромагнитного резонанса состоит в том, что ферромагнетизм обусловлен сильным взаимодействием между электронными спинами атомов или ионов, находящихся в узлах решетки. В результате такого взаимодействия ось каждого магнитного диполя располагается не произвольно, а в соответствии с ориентацией окружающих его спинов.

Если поместить однородный образец в однородное магнитное поле, то материал становится поляризованным, и наведенные на поверхности образца магнитные заряды порождают магнитное поле, противодействующее приложенному полю.

Из работы [2] возьмём универсальную связь между резонансной частотой и внешним полем  $H_0$ :

$$\omega_{res} = \gamma \cdot H_0 \quad 1$$

Где  $\gamma$  представляет собой магнитомеханическое отношение:

$$\gamma = g \cdot \frac{e}{2m_0c} \quad 2$$

Здесь  $c$  — скорость света,  $m_0$  — масса покоя электрона, а  $e$  — заряд электрона,  $g$  — g-фактор (g-фактор никеля составляет 2,18).

Но обычно, поступают иначе — задаются определенной частотой  $\omega_0$  с. в. ч. Поля (что более удобно с экспериментальной точки зрения) и подбирают резонансное магнитное поле  $H_{res}$ , соответствующее заданной частоте:

$$H_{res} = \frac{\omega_0}{\gamma} \quad 3$$

Как описано в работе [1] изменение во времени намагниченности  $M$  в однородном поле  $H$  первом приближении подчиняется уравнению:

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma \cdot [M \cdot H] \quad 4$$

поэтому выведенный из равновесия полный магнитный момент образца будет прецессировать вокруг направления постоянного магнитного поля.

В экспериментах по ФМР производится регистрация производной интенсивности поглощения образцом СВЧ поля от напряженности внешнего постоянного магнитного поля  $I(H)$ :

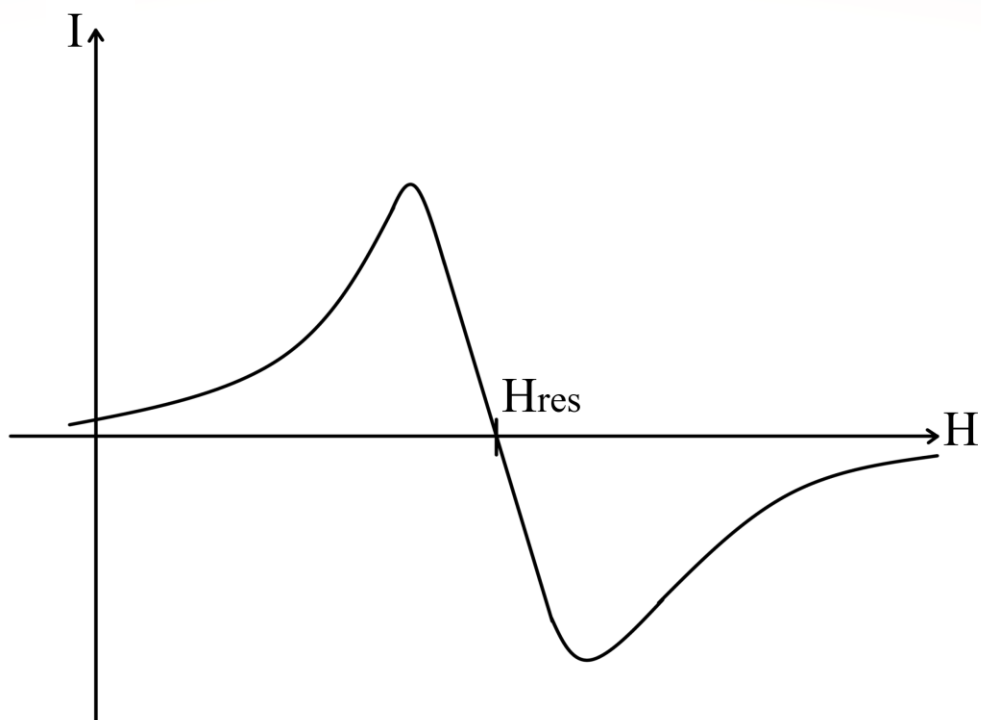


Рис. 2. Зависимость  $I(H)$

На ферромагнитный резонанс помимо внешнего поля, влияет ещё внутреннее поле образца, зависящее от распределения эффективных магнитных зарядов на поверхности образца. Поэтому надо учитывать граничные условия на поверхности образца.

Отсюда следует, что резонансное поле ( $H_{res}$ ) зависит от формы образца и его положения относительно внешнего поля.

Так для плоского дискообразного образца, никеля, по данным работы [1] соответствуют следующие табличные значения:

$H_{res} = 1591$  Эрстед - плоскость образца направлена по полю.

$H_{res} = 9978$  Эрстед - плоскость образца перпендикулярна внешнему полю.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Методика измерений

В данной работе выполнялось два эксперимента.

Порядок выполнения **первого эксперимента**:

1. Промываем образец от пыли спиртом;
2. Ламинируем пластинку в скотч;
3. Прижимаем никелевую пластинку между круглыми ампулами, сделанных из кварца, для её неподвижности.
4. Помещаем её в резонатор, расположенный между сердечниками электромагнита.
5. Настраиваем прибор, задаем параметры спектров (устанавливаем интервал  $H$ , скорость развертки, коэффициенты усиления и ослабления СВЧ).
6. Дважды записываем данные на компьютер (меняя направление поля) для различных углов между нормалью плоскости образца и направлением поля.
7. Записываем спектры без пластинки, чтобы учесть фоновый спектр от держателя, резонатора и парамагнитного газообразного кислорода.

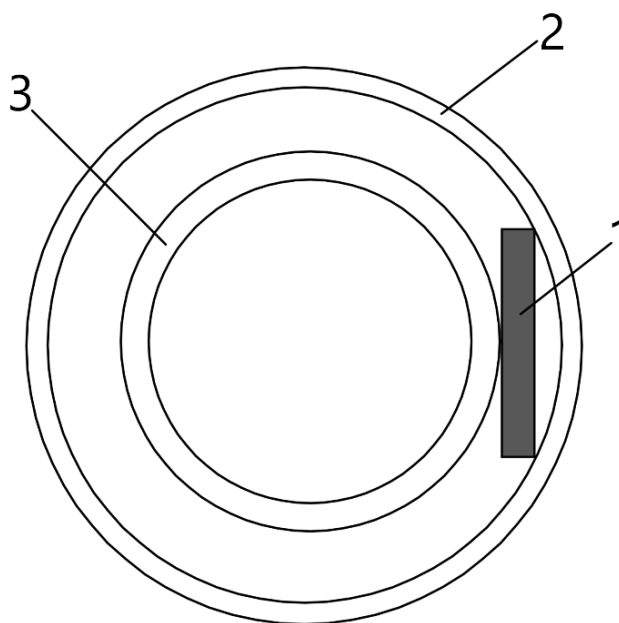


Рис. 3. Схематичное изображение образца из первого эксперимента

Где 1 – квадратная пластина никеля, покрытая скотчем ;2 – наружная ампула; 3 – внутренняя ампула.



Порядок выполнения **второго эксперимента**: тоже самое, но третьим шагом: прижимаем никелевую пластинку двумя полукруглыми кварцевыми стержнями, для её неподвижности.

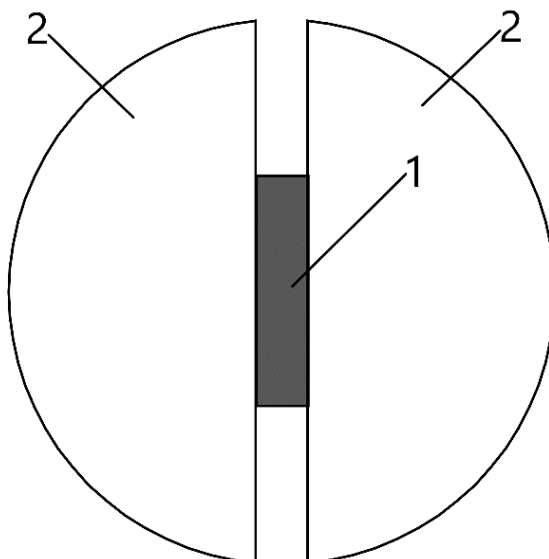


Рис. 4. Схематичное изображение образца из второго эксперимента

Где 1 – квадратная никелевая пластинка, покрытая скотчем; 2 – полукруглые стержни.

Главное отличие двух экспериментов это использование разных ампул и разных никелевых пластинок.

### 3.2. Описание установки



Рис. 5. ЭПР спектрометр Bruker EleXsys 500

ЭПР спектрометр Bruker EleXsys 500 состоит из:

1. Консоли (для автоматического управления спектрометром и сброса данных);
2. Генератора СВЧ (с испускаемой длиной волны 3 см);
3. Источника питания магнита;
4. Компрессора (для охлаждения электромагнита);
5. Электромагнита Bruker (который создает высокое однородное магнитное поле);
6. Компьютера (для управления консолью и регистрации спектров).

### 3.3. Результаты измерений

#### Эксперимент 1

После получения данных для разных углов мной были построены графики зависимости  $I(H)$  при разной ориентации поля  $H$ :

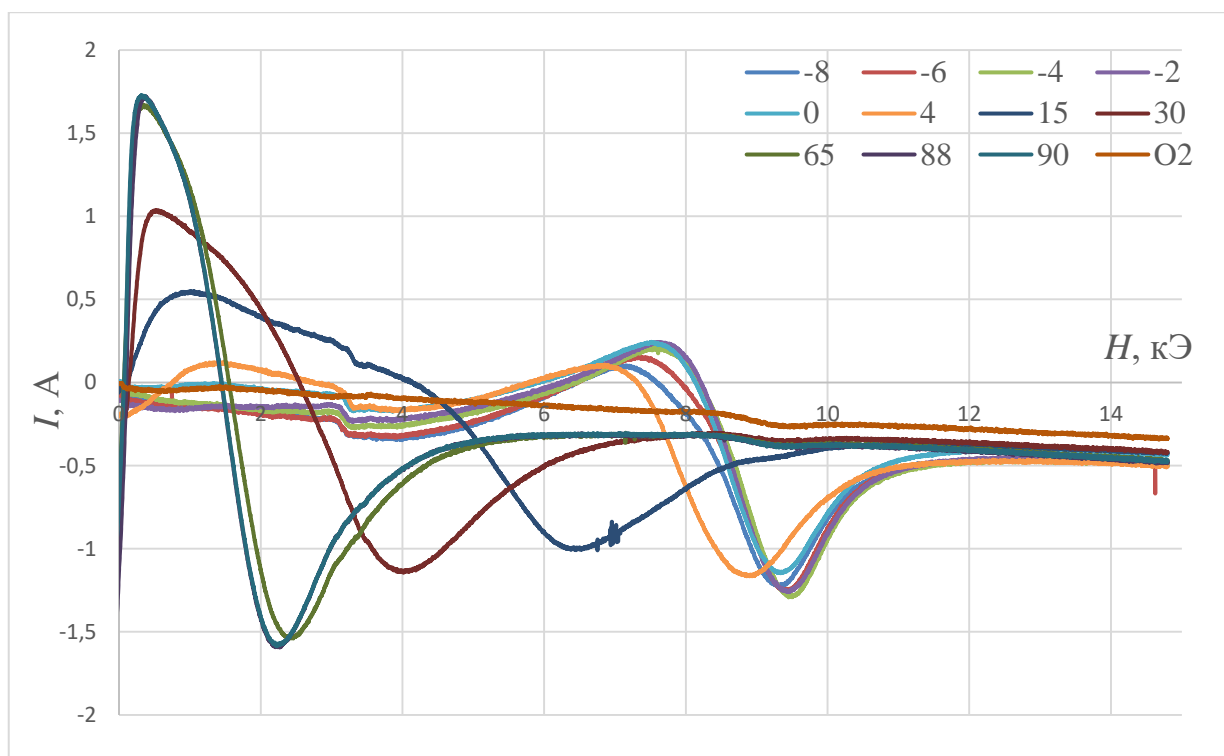


Рис.6. Зависимость  $I(H)$  образца №1 для различных углов  
при ориентации up поля  $H$

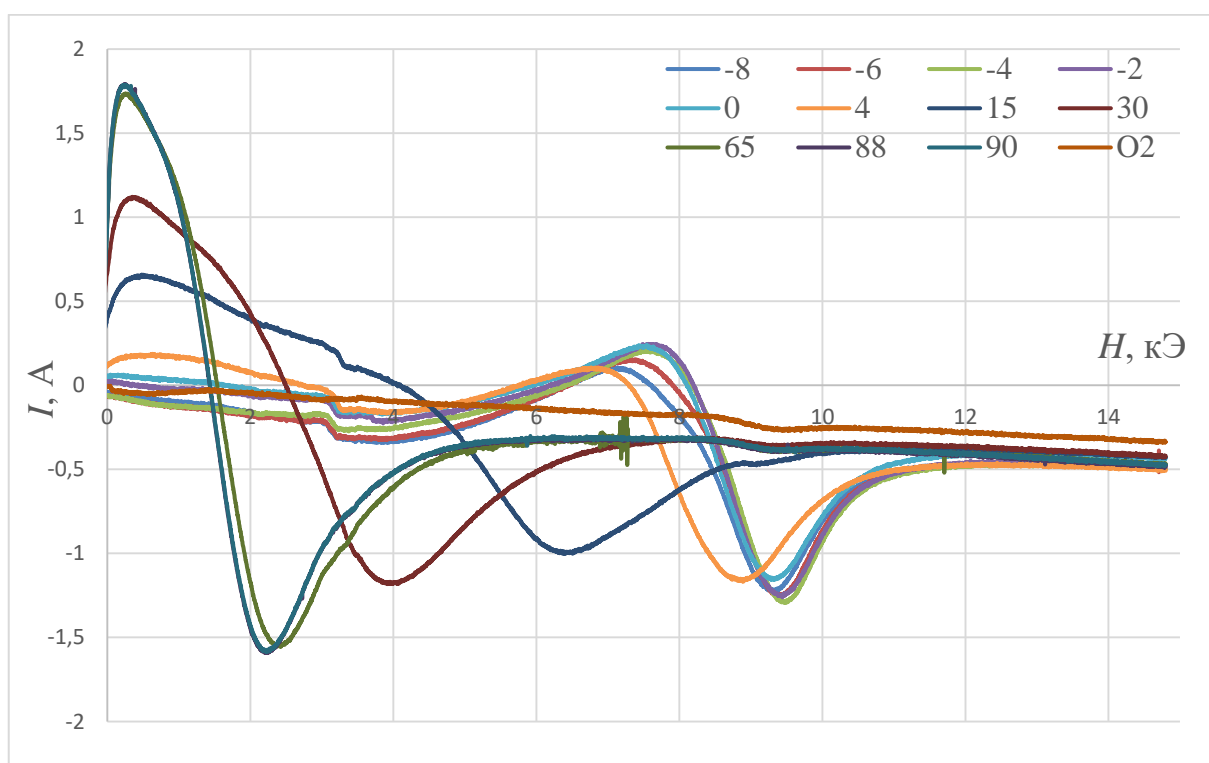


Рис.7. Зависимость  $I(H)$  образца №1 для различных углов  
при ориентации down поля  $H$

Для некоторых кривых наблюдается явление гистерезиса.

## Эксперимент 2

Из рис.6 и 7 можно заключить, что статистическая погрешность  $H_{res}$  мала, поэтому ей можно пренебречь. Поэтому во втором эксперименте мной были построены графики только для углов с ориентацией  $\varphi$ р поля  $H$ . После получения данных для разных углов мной были построены графики зависимости  $I(H)$ :

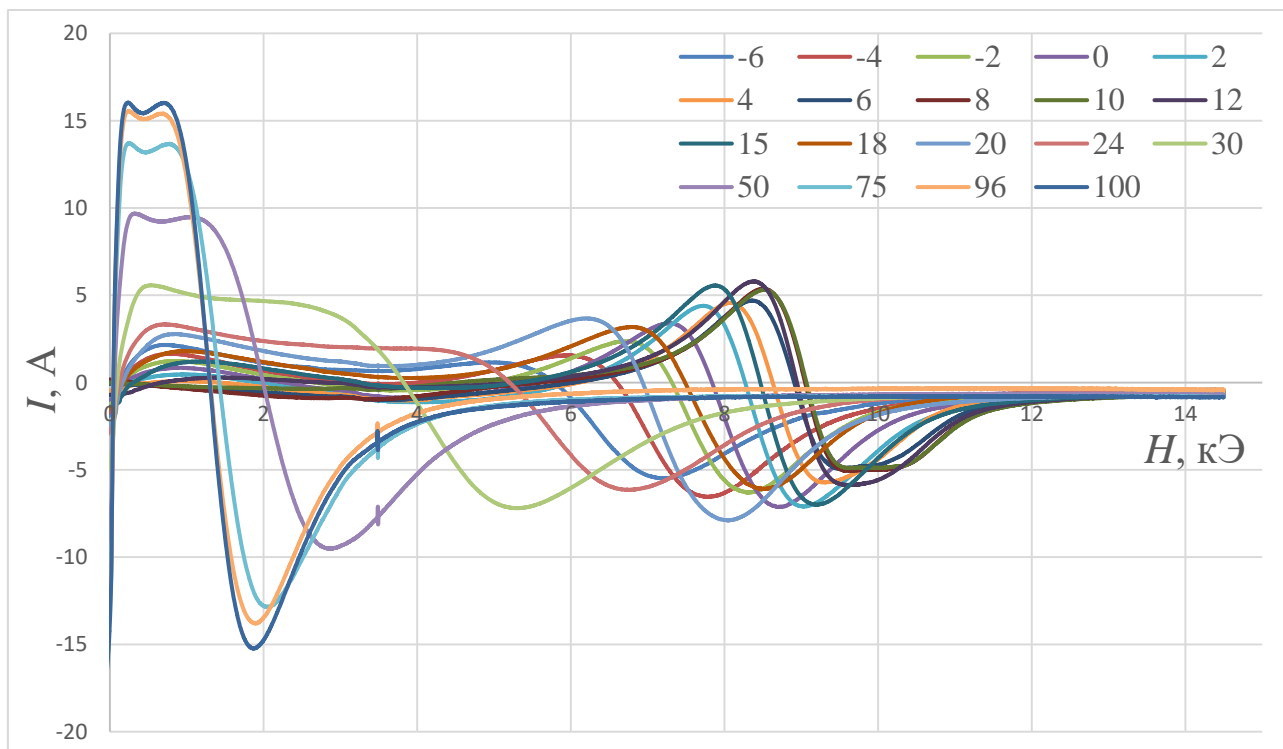


Рис.8. Зависимость  $I(H)$  образца №2

### 3.4. Обработка результатов и их обсуждение

#### Эксперимент №1

Из рис. 6 видно, что кислород оказывает влияние на эксперимент, т. к. он обладает парамагнитными свойствами, поэтому построим те же графики с учетом базовой линии ( $O_2$ ):

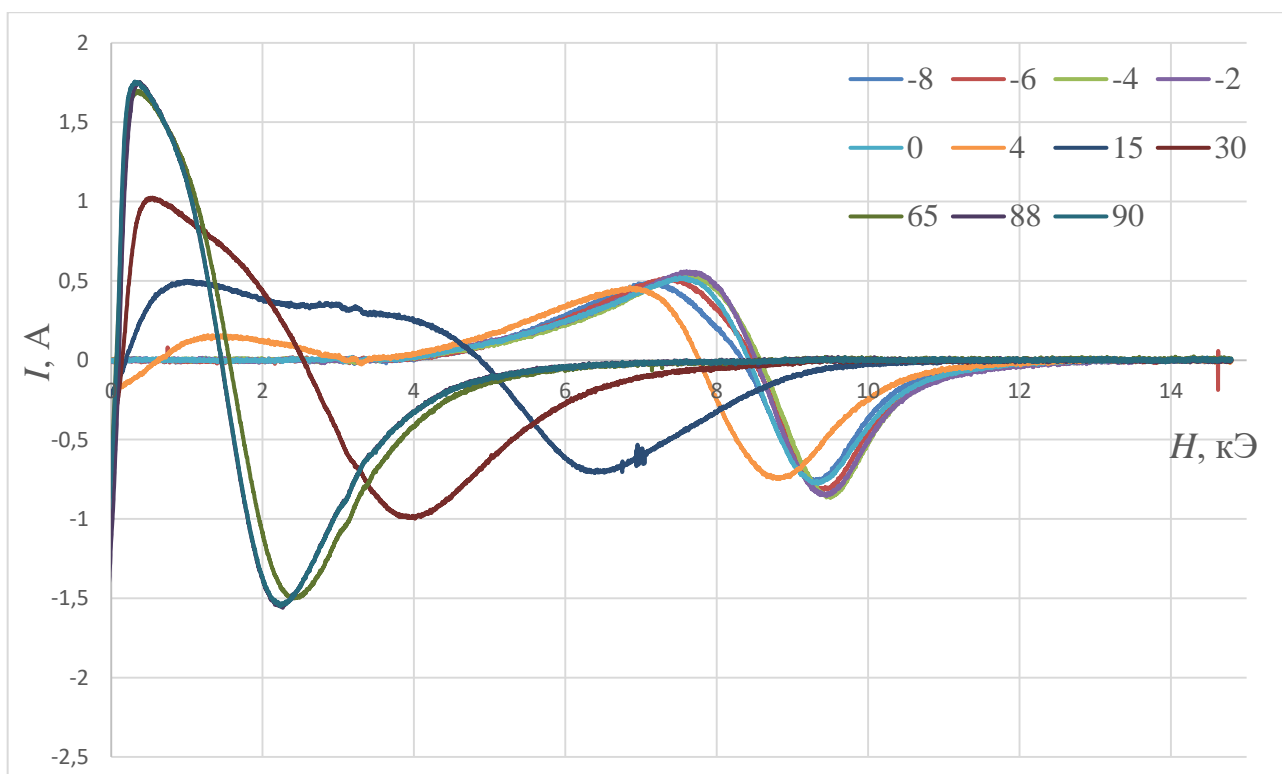


Рис. 9. Зависимость  $I(H)$  образца №1 для различных углов без фоновой линии

Из рис.9 мной были найдены  $H_{res}$  для разных углов и составлена таблица зависимости  $H_{res}(\theta)$ :

Таблица 1 - Экспериментальная зависимости  $H_{res}(\theta)$ :

$\theta, ^\circ$	-8	-6	-4	-2	0	4
$H_{res}, \text{Э}$	8337	8472	8560	8516	8414	7613
$\theta, ^\circ$	15	30	65	88	90	—
$H_{res}, \text{Э}$	4852	2518	1544	1448	1450	—

Для полученных данных  $H_{res}$  видно, что  $H_{res}$  принимает максимальное значение на  $-4^\circ$ , то есть для первого эксперимента на  $-4^\circ$  плоскость пластины перпендикулярна внешнему магнитному полю. Экспериментальный график зависимости, смещенный на  $4^\circ$ , и теоретический график (см. в Приложении) выглядят следующим образом:

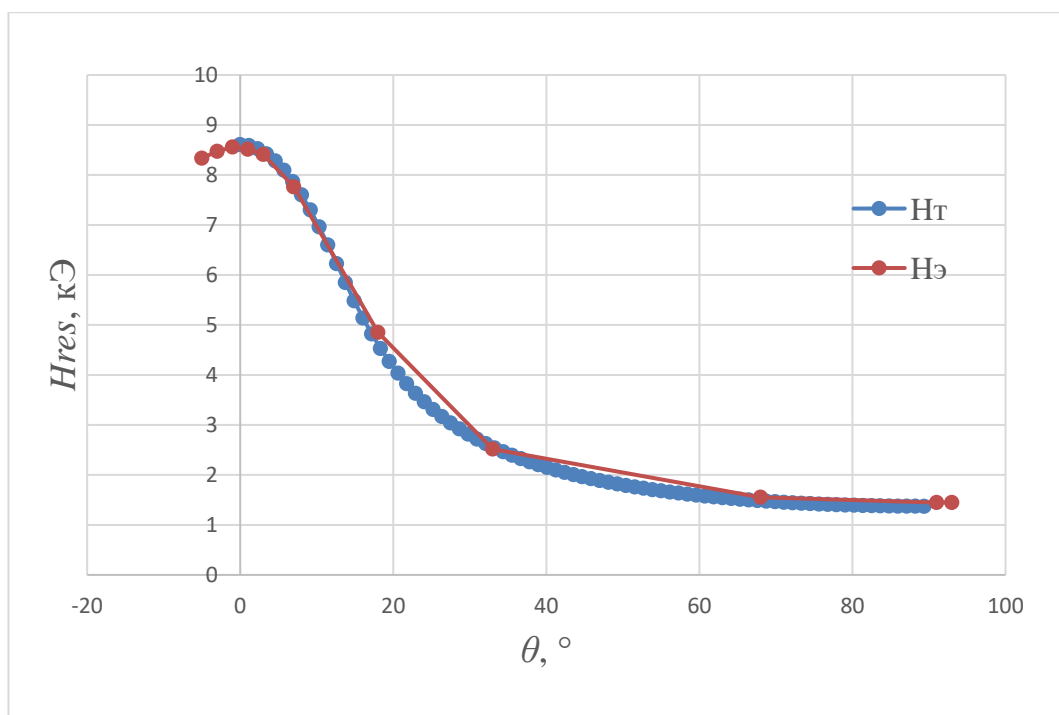


Рис. 10. Зависимость  $H_{res}(\theta)$  образца №1

Где синий график — это теоретическая зависимость (где для никеля взят  $M_S = 440$  кА/м для равенства максимумов графиков), а красный график - это экспериментальная зависимость.

### Эксперимент №2

Для второго эксперимента, как видно из рис. 4, влияние кислорода мало, поэтому просто возьмём данные  $H_{res}$  для разных углов:

Таблица 2 - Экспериментальная зависимости  $H_{res}(\theta)$ :

$\theta, ^\circ$	-6	-4	-2	0	2	4	6
$H_{res}, \text{Э}$	5867	6638	7340	7869	8298	8640	8950
$\theta, ^\circ$	8	10	12	15	18	20	24
$H_{res}, \text{Э}$	9072	9077	8909	8467	7518	6962	5365
$\theta, ^\circ$	30	50	75	96	100	—	—
$H_{res}, \text{Э}$	3875	2010	1421	1313	1312	—	—

Из таблицы 2 видно, что  $H_{res}$  принимает максимальное значение ближе к  $10^\circ$ , то есть для второго эксперимента на  $10^\circ$  плоскость пластины перпендикулярна внешнему магнитному полю. Экспериментальный график зависимости, смещенный на  $10^\circ$ , и теоретический график (см. в Приложении) выглядят следующим образом:

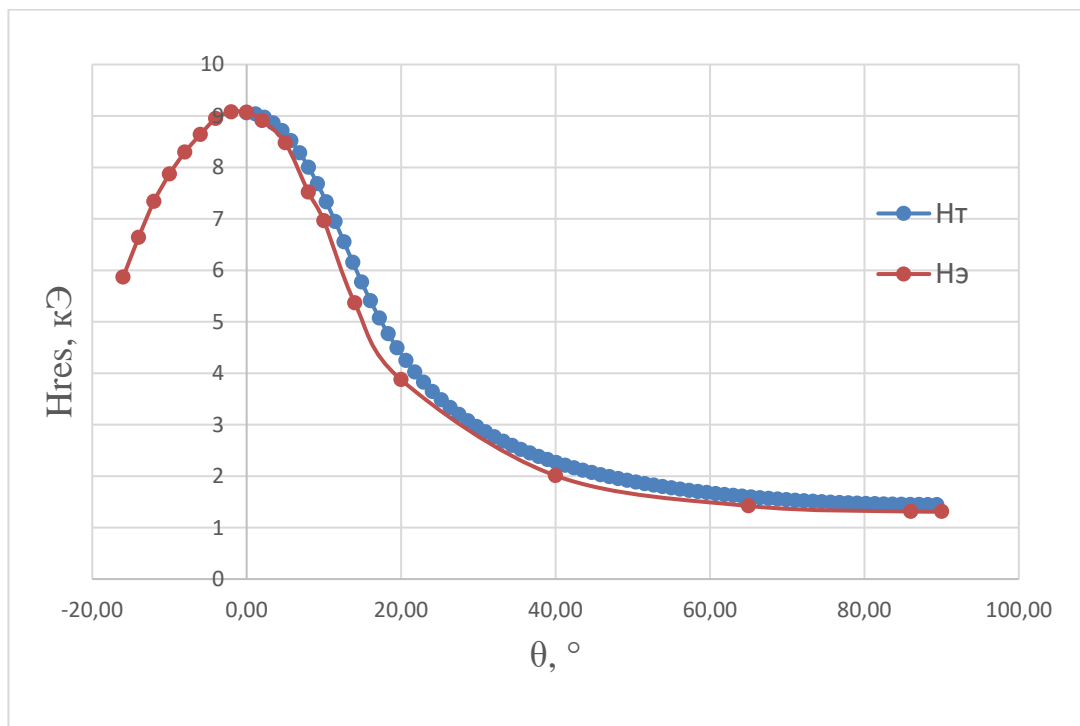


Рис. 11. Зависимость  $H_{res}(\theta)$  образца №2

Где синий график — это теоретическая зависимость (где для никеля взят  $M_s = 463$  кА/м для равенства максимумов графиков), а красный график - это экспериментальная зависимость.

Значения  $M_s$ , экспериментально полученные нами на 6-11% меньше справочного. Данное расхождение можно объяснить тем, что справочное значение приведено в пределе однородно намагниченного образца в пределе бесконечно высокого магнитного поля, а в нашем случае даже при  $H_{res}(90^\circ) \sim 9000$  Э может сохраняться многодоменная магнитная структура образца.

Из рис. 10 и рис. 11 можно сделать вывод, что зависимость  $H_{res}(\theta)$  образца №1 ближе к теории, чем у образца №2, то есть первый эксперимент был более удачным.

### 3.5. Источники погрешностей

В данной работе были следующие источники погрешностей:

1. теория работает для эллипсоидных образцов и в том числе для плоских, которые являются предельным случаем сильно сплюснутого эллипсоида.
2. Форма образца не является идеально плоской.
3. Шумы, помехи.
4. Скин-эффект.
5. Поверхностью никеля не идеально гладкая.
6. Угол с вертикалью не совсем равен нулю.
7. Образец не является однородно намагниченным.

### 4. Заключение

В ходе выполнения работы было исследовано явление ферромагнитного резонанса на примере пластинки из никеля при различной её ориентации относительно направления постоянного однородного поля. Полученные экспериментальные значения резонансных полей поглощения хорошо согласуются с теоретическими. В отличие от образцов круглой формы, для образцов плоской формы наблюдается существенная зависимость резонансного поля от ориентации.

### Список литературы

1. Трухан С.Н., Якушкин С.С., Мартьянов О.Н. Ферромагнитный резонанс дисперсных магнетиков. Дополнение к курсу лекций (Учебно-методическое пособие) – Новосиб. гос. ун-т., 2013, -С. 3-20
2. Ферромагнитный резонанс / С. В. Вонсовский [и др.]; под ред. чл.-корр. АН СССР С. В. Вонсовский; государственное издательство физико-математической литературы; 1961. -С. 13-24



## Приложение

Из работы [1] тензор размагничивающих факторов в системе координат орты которой совпадают с главными осями эллипсоида равен:

$$N = \begin{pmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{pmatrix} \quad 1$$

Условие определяющее направление вектора намагниченности эллипсоида  $M$  во внешнем магнитном поле  $H_e$

$$M \cdot (H_e - N \cdot M) = 0 \quad 2$$

Подставляя  $M = (M_x; M_y; M_z)$ , получаем:

$$M_x \cdot (H_y - N_y \cdot M_y) = M_y \cdot (H_x - N_x \cdot M_x) \quad 3$$

$$M_y \cdot (H_z - N_z \cdot M_z) = M_z \cdot (H_y - N_y \cdot M_y) \quad 4$$

$$M_z \cdot (H_x - N_x \cdot M_x) = M_x \cdot (H_z - N_z \cdot M_z) \quad 5$$

Не трудно заметить, что одно из трёх уравнений линейно зависит от других.

Выразим  $M_x$  и  $M_y$  через  $M_z$ :

$$M_x = H_x \cdot \frac{M_z}{H_z + N_x \cdot M_z - N_z \cdot M_z} \quad 6$$

$$M_y = H_y \cdot \frac{M_z}{H_z + N_y \cdot M_z - N_z \cdot M_z} \quad 7$$

Чтобы решить задачу необходимо учесть, что:

$$M_x^2 + M_y^2 + M_z^2 = M_s^2 \quad 8$$

Полагая что  $M_s = 1$ , получаем:

$$\left( H_x \cdot \frac{M_z}{H_z + N_x \cdot M_z - N_z \cdot M_z} \right)^2 + \left( H_y \cdot \frac{M_z}{H_z + N_y \cdot M_z - N_z \cdot M_z} \right)^2 + M_z^2 = 1 \quad 9$$

Данное уравнение является уравнением 6-й степени и может быть решено только численно. Его решение проводилось в системе Mathcad.

$$M_z = -\frac{H_z}{N_x - N_z} \quad 10$$

$$M_z = -\frac{H_z}{N_y - N_z} \quad 11$$

Зная связь между  $M$  и  $H$  и  $N$ , из работе [1] используем формулу:

$$\left(\frac{\omega_{res}}{\gamma}\right)^2 = (H_{e0z} + (N_{11} - N_{33}) \cdot M_0) \cdot (H_{e0z} + (N_{22} - N_{33}) \cdot M_0) \quad 12$$

Где  $\gamma$  представляет собой магнитомеханическое отношение, а  $H_{e0z}$  – проекция магнитного поля на вектор  $M$ :

:

$$\gamma = g \cdot \frac{e}{2m_0c} \quad 13$$

$$H_{e0z} = H_{e0} \cdot \cos \theta \quad 14$$

Здесь  $c$  — скорость света,  $m_0$  — масса покоя электрона, а  $e$  — заряд электрона,  $g$  – g-фактор.  $\theta$  – угол между  $M$  и  $H_0$ .

$N_{11}, N_{22}, N_{33}$  – компоненты тензора размагничивающих факторов в системе координат в которой ось  $z$  совпадает с направлением  $M$ .

$$\frac{\omega_{res}}{\gamma} = H_{res} \quad 15$$

Подставив в формулу (12) формулу (15), можно явно выразить  $H_{res}(\theta)$ .

В итоге получаем теоретическую зависимость  $H_{res}(\theta)$ :

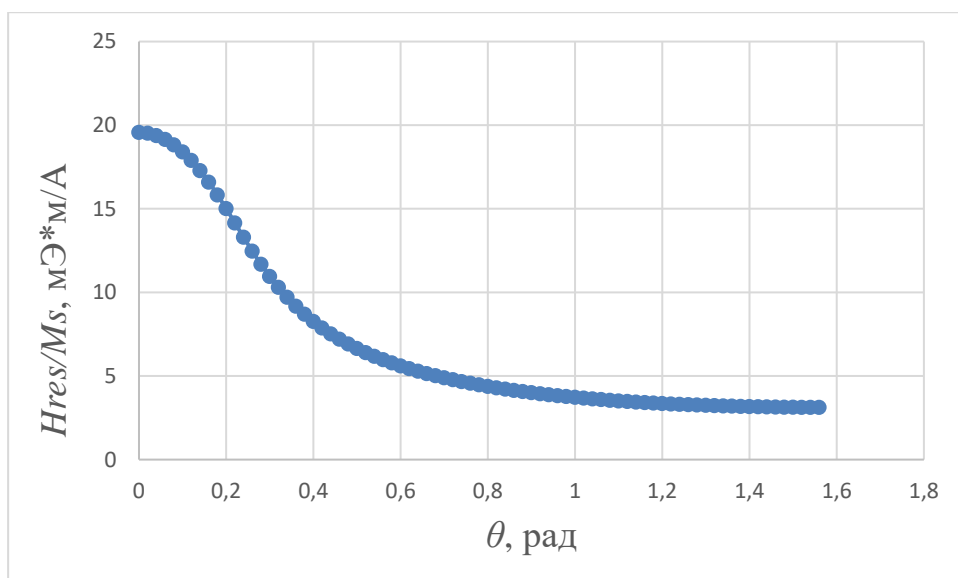


Рис. 1. Теоретическая зависимость  $H_{res}(\theta)$

Домножив на табличное  $M_s = 500$  кА/м и переведя радианы в градусы, получим следующую зависимость:

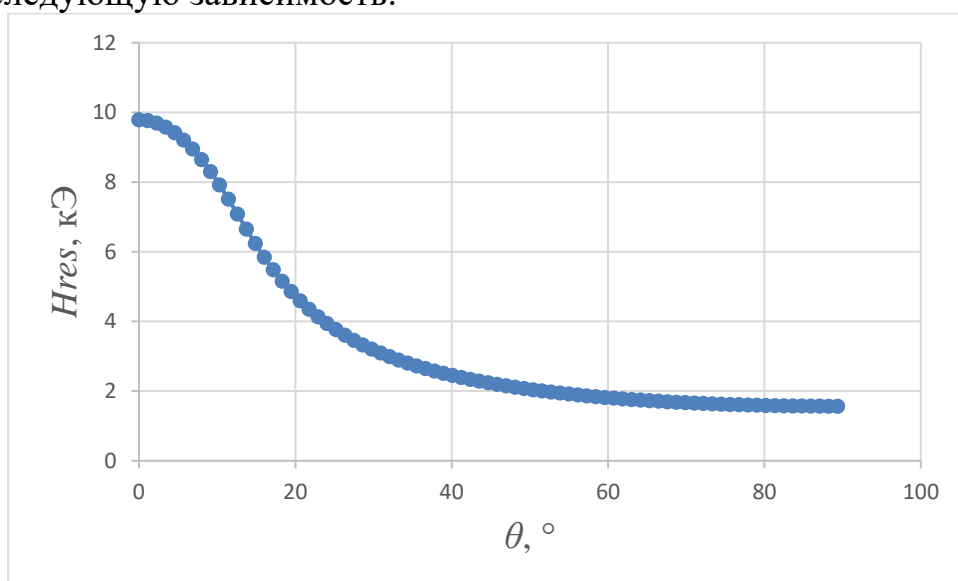


Рис. 2. Теоретическая зависимость  $H_{res}(\theta)$  для  $M_s = 500$  кА/м

