



**МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

ШИРОНОСОВ Валентин Георгиевич

УДК 538.245

**ПОНДЕРОМОТОРНОЕ ДЕЙСТВИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФЕРРОМАГНЕТИКИ
В УСЛОВИЯХ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА**

01.04.11 — физика магнитных явлений

А в т о р е ф е р а т

*диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

Москва — 1983

Работа выполнена в Ижевском государственном медицинском институте на кафедре физики.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор А. К. ЧИРКОВ.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор В. Г. ВЕСЕЛАГО,
доктор физико-математических наук, профессор Г. А. МЕЛКОВ.

Ведущая организация: указана в решении специализированного совета.

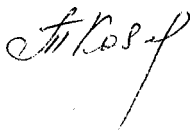
Защита диссертации состоится « 16 » февраля 1983 г.
16³⁰ часов на заседании специализированного совета № 3 ОФТТ (К.053.05.77) в Московском государственном университете по адресу: 117234, г. Москва, Ленинские горы, МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, аудитория СФД

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан « 10 » января 1983 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук

Т. М. КОЗЛОВА



АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В последнее время большое внимание уделяется исследованию свойств магнитоупорядоченных веществ в различных электромагнитных и магнитных полях. Это связано непосредственно с широкими возможностями их практического использования, а также с многообразием возникающих при этом взаимодействий, представляющих интерес для теории. Особенно интересен в этом плане случай нелинейного ферромагнитного резонанса (НФМР) на незакрепленных образцах, обладающих трансляционными и вращательными степенями свободы.

Ранее проведенные многочисленные экспериментальные и теоретические исследования в области НФМР выявили его тонкую структуру с учетом различных типов взаимодействий — магнитоупругого, обменного, параметрического и т. д. Некоторые особенности этой структуры уже получили вполне удовлетворительное объяснение. Причины появления других (медленные пульсации сигнала НФМР, самопроизвольные перескоки с одной акустической моды на другую, гистерезис магнитоакустического резонанса (МАР) и линии поглощения по полю) еще выяснены не полностью. Их выяснение затруднено наличием при ФМР большого количества факторов, влияющих на результаты эксперимента (температурные эффекты, паразитные амплитудные и частотные модуляции, неоднородности магнитных полей и т. д.). Обычно особенности НФМР трактуют на основе модели возбуждения магнитоупругих колебаний за счет модуляции обменного и дипольного взаимодействий со стороны решетки. К колебаниям решетки, в свою очередь, приводят упругие силы, вызванные магнитострикцией.

Однако в рамках такой модели и при проведении опытов обычно не учитывают пондеромоторное действие электромагнитного поля на незакрепленные образцы. В области резонанса его величина резко возрастает за счет большой добротности резонирующей системы-образца. В результате возникает необходимость учета трансляционных и вращательных степеней свободы анизотропных ферромагнетиков при интерпретации особенностей НФМР. Значительность величин пондеромоторных сил и моментов сил, возникающих в условиях НФМР, резонансный характер их зависимостей от пространственных координат и углов в случае неоднородных магнитных полей и анизотропных образцов представляют интерес не только для объяснения замеченных особенностей НФМР, но и для решения прикладных задач макроскопической электродинамики.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование тех особенностей НФМР и МАР в незакрепленных образцах, на возникновение которых может наиболее сильно повлиять пондеромоторное действие электромагнитного поля.

Вычисление и анализ выражений для пондеромоторных сил и моментов сил, действующих на ферромагнетик при резонансе, в случае слабонеоднородных полей, изотропных и анизотропных образцов с учетом параметрической зависимости частоты магнитного резонанса от пространственных координат и углов.

Анализ возможностей использования пондеромоторного резонансного действия электромагнитного поля на ферромагнетики для решения ряда технических и фундаментальных задач макроскопической электродинамики.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

В работе впервые экспериментально обнаружен ряд пондеромоторных эффектов в условиях нелинейного ферромагнитного резонанса на незакрепленных образцах. Выявлено их влияние на появление некоторых особенностей НФМР и МАР — низкочастотных пульсаций амплитуды отраженной волны от резонатора и интенсивностей спектральных линий МАР, гистерезиса возбуждения магнитоупругих колебаний и линии поглощения по полю и т. д.

Получены и проанализированы выражения для пондеромоторных сил и моментов сил, действующих на ферромагнетик при резонансе. Расчеты проведены с учетом зависимостей собственной частоты образца от трансляционных и вращательных степеней свободы. Рассмотрены случаи слабонеоднородных магнитных полей (постоянного и переменного), изотропных и анизотропных образцов. Выяснены физические причины значительности величины пондеромоторного действия при ФМР.

Впервые экспериментально и теоретически показана возможность возникновения устойчивых состояний движения макроскопических спиновых частиц — магнитных диполей в условиях магнитного резонанса. Рассмотрена задача двух взаимодействующих магнитных диполей с учетом их спинов. Показана при соответствующих допущениях возможность отсутствия коллапса в такой системе и возникновения дискретных орбит движения в случае резонанса.

Рассмотрен случай возникновения резонансного электромагнитного давления при ФМР (аналога резонансного светового давления).

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Полученные в работе результаты могут быть использованы для дальнейших исследований возбуждения магнитоупругих колебаний при ФМР, для развития общей теории устойчивости систем взаимодействующих частиц, обладающих магнитными дипольными моментами и спинами, а также для апробации различных выражений пондеромоторных сил в макроскопической электродинамике, в частности, измерения силы Абрагама.

Пондеромоторное действие электромагнитного поля на ферромагнетики при ФМР может найти широкое применение в технике измерений и контроля — построение абсолютных высокочувствительных датчиков СВЧ поля (его напряженности, частоты, поляризации, неоднородности), разработка прямых методов регистрации ферромагнитного резонанса, создание магнитометров.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты работы докладывались на пленарном заседании Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений (Харьков, 1979 г.), на семинарах институтов АН СССР — ИФМ УНЦ (Свердловск, 1976 г.), ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва, 1978 г.), ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Ленинград, 1979 г.), МИ им. В. А. Стеклова (Москва, 1979 г.), Механики МГУ (Москва, 1980 г.), ФИ им. П. Н. Лебедева (Москва, 1981 г.), МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва, 1982 г.), изложены в 9 опубликованных научных работах.

ОБЪЕМ РАБОТЫ

Работа состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Она изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения и четырех глав, общих выводов и библиографии. После каждой главы приводятся частные выводы.

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы. Формулируется цель работы. Раскрывается структура и содержание диссертации по главам.

В главе I, представляющей собой литературный обзор, дан анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований нелинейного ферромагнитного резонанса на незакрепленных образцах, особенно его аномалий. Большое внимание уделено отдельно работам, рассматривающим пондеромоторное действие электромагнитного поля на резонаторы-образцы в низкочастотном, оптическом, ВЧ и СВЧ диапазонах длин волн. Отмечены неясные, противоречивые и нерешенные вопросы, поставлены конкретные задачи диссертации.

Глава II посвящена экспериментальному исследованию НФМР и МАР на незакрепленных образцах.

В § 1 главы II описана схема собранной установки и условия эксперимента. В качестве образцов использовались монокристаллы железонитридевого граната (ЖИГ) в виде сфер. Исследовались четыре образца образца диаметром $d = 1,34; 0,97; 0,775; 0,41$ мм и шириной линии $2\Delta H = 0,23; 0,49; 0,55; 0,56$ Э соответственно. Образцы при измерениях помещались в центр резонатора Н₁₀₂, где отсутствовал нагрев ферромагнетика, обусловленный электрическими компонентами СВЧ поля. Собственная добротность резонатора составляла 10³. Наблюдение за пространственными перемещениями образцов в ходе эксперимента велось через заградительные защитные волноводы и коррелировалось по времени с моментом возникновения искажений формы линии НФМР и спектра возбуждения МАР. При регистрации ИФМР образцы свободно помещались в кварцевую ампулу, вертикально или горизонтально расположенную относительно направления силы тяжести, либо закреплялись в полистирол или фторопласт.

Необходимая величина магнитного поля обеспечивалась постоянным магнитом и двумя парами модуляционных катушек. Модуляционные катушки позволяли варьировать величину поля в диапазоне от 3.110 Э до 3.450 Э с учетом частоты используемого магнетронного генератора 9.420 МГц и возможного изменения резонансного значения поля при пространственных перемещениях и поворотах анизотропных образцов ЖИГ. Неоднородность поля постоянного магнита, после соответствующей обработки и шлифовки полюсных наконечников, в центральной области составляла менее 2 Э/см. Абсолютная погрешность измерения магнитного поля не превышала 0,5 Э. Величина развертки по полю регулировалась плавно в пределах 0—150 Э. Прохождение динамического диапазона по полю обеспечивалось автоматически

подачей линейно изменяющегося напряжения на систему управления полем от генератора НГПК-3М, либо от генератора, разработанного автором, с временем развертки 0,01 с и более, а также вручную.

Мощность СВЧ колебаний регулировалась плавно поляризационным аттенюатором от 0 до 5 Вт. Погрешность измерения мощности составляла 5%. Для предотвращения эффекта затягивания частоты магнетрона использовался ферритовый циркулятор.

Линия поглощения записывалась на двухкоординатном самопишущем потенциометре ПДС-021М в условиях адиабатического медленного прохождения по полю и в режиме непрерывной поперечной накачки. Для усреднения линия прописывалась несколько раз в одинаковых условиях. При времени развертки менее 1 с запись линии поглощения проводилась на запоминающем осциллографе С8-9А. Исследование характера возбуждения МАР велось по спектроанализатору 3-х сантиметрового диапазона ИВ-66, высокочастотным осциллографу С1-54 и частотомеру ЧЗ-35А. Запись низкочастотных пульсаций амплитуды отраженной волны от резонатора и амплитуды магнитоупругих колебаний корректировалась по низкочастотным осциллографу С1-4, частотомеру Ф599 и спектроанализатору ИВ-66.

В § 2 главы II описаны пондеромоторные эффекты, обнаруженные при наблюдении НФМР на незакрепленных образцах. При развертке по полю были обнаружены медленные пространственные перемещения образца. Одновременно с возникновением перемещений образцов наблюдалось появление аномалий формы линии поглощения и спектра возбуждения магнитоакустического резонанса (низкочастотных пульсаций амплитуды отраженной волны, интенсивностей спектральных линий; их срыв; перескоки с одной акустической моды на другую. Характерные графики зависимостей амплитуды отраженной волны от резонатора представлены на рис. 1. Увеличение величины мощности от 0,04 Вт, при которой были замечены перемещения, до 0,15 Вт и выше приводило к сложному движению образца, низкочастотным осцилляциям, по внутренней поверхности полости ампулы. При мощности $P=2$ Вт интенсивность его движений резко возрастала и в конечном итоге он выталкивался в кварцевой трубке за пределы резонатора. Иногда наблюдалась кратковременная левитация образца. Затем образец раскачивался и падал вниз.

Сложные траектории движения возникали при помещении образца на дно резонатора ($P=0,08$ Вт). Увеличение мощности

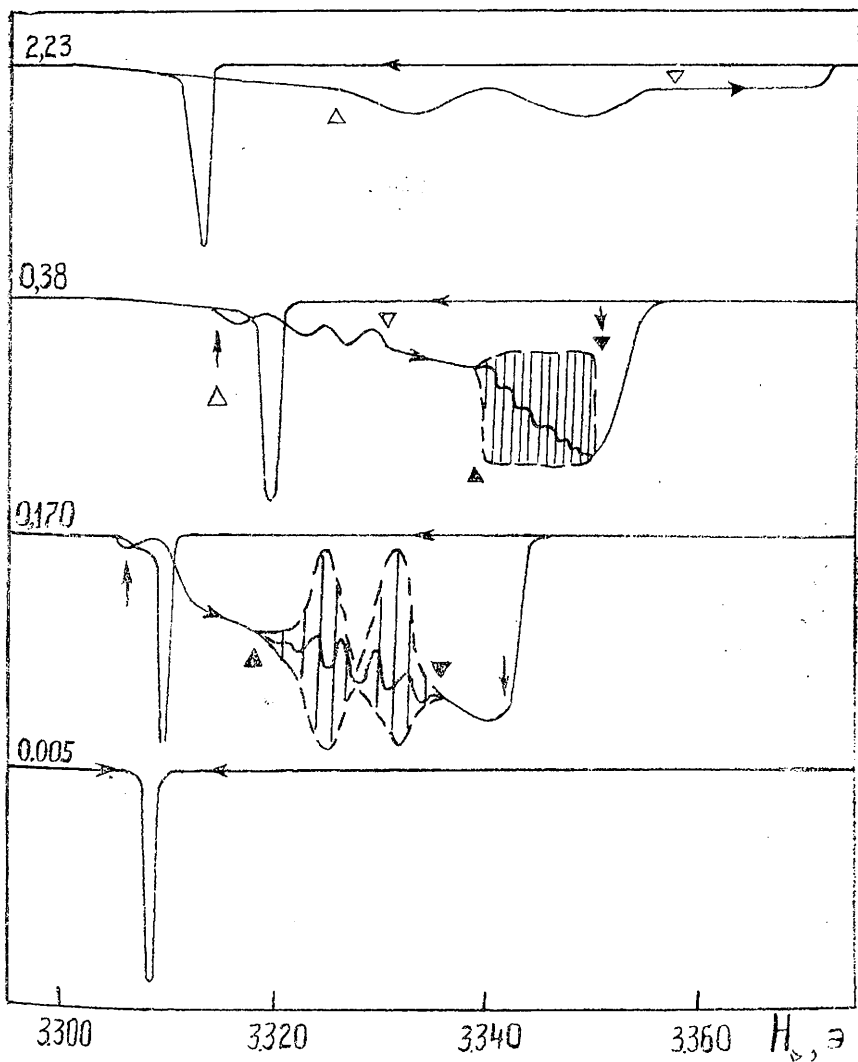


Рис. 1. Зависимость амплитуды отраженной волны от H_0 при различных уровнях мощности накачки в Вт, $d=0,775$ мм, $2\Delta H=0,55$ Э, скорость развертки 8 Э/с, $\uparrow\downarrow$ — области возбуждения МАР и $\blacktriangle\blacktriangledown$ ($\triangle\nabla$) — НЧ-пульсаций линий поглощения и МАР с $\nu^{нч}=9-20$ Гц ($3-0,7$ Гц), \rightleftarrows — направление развертки по полю.

до 2 Вт приводило к замыканию траектории движения в окружность диаметром ≈ 8 мм вокруг центра резонатора.

Дополнительное исследование показало, что магнитоупругие колебания и самонагрев образца при резонансе не являются причинами его пространственных перемещений. Величина ponderomotive силы F , возникающей при резонансе, оценивалась по отрыву двух сферических образцов ЖИГ друг от друга ($P=0,5$ Вт). Этот опыт показал, что по сравнению с величиной силы тяжести F_T , являющейся естественным эталоном для экспериментов с незакрепленными образцами, ее величина превышает F_T , по крайней мере в 120 раз. Было установлено, что направление F зависит от расстройки по частоте. Со стороны полей меньше резонансного наблюдалось притяжение образцов друг к другу, со стороны полей больше резонансного — отталкивание.

В § 3 главы II приведены результаты исследований особенностей НФМР и МАР. Представлены графики зависимостей формы линии поглощения и величины гистерезиса по полю от уровня мощности накачки для незакрепленных и закрепленных образцов, частоты упругих колебаний МАР от напряженности магнитного поля при различных уровнях мощности накачки, зависимости формы линии поглощения от скорости развертки по полю.

Обнаружение пространственных перемещений образцов дало возможность разграничить низкочастотные пульсации сигналов НФМР и МАР на два типа. Частота первых пульсаций возрастала от 9 до 20 Гц при увеличении мощности накачки. Одновременно наблюдались квази-периодические перемещения образца по полусфере полости трубки. Второй тип низкочастотных пульсаций был обнаружен при мощности $P \approx 0,3$ Вт. Частота их, в отличие от первых, с ростом мощности накачки уменьшалась от 3 Гц до десятых долей герца. Увеличение мощности накачки приводило к уменьшению области возбуждения по полю НЧ-пульсаций 1-го типа и увеличению области возбуждения НЧ-пульсаций 2-го типа (рис. 1). Возбуждение НЧ-пульсаций 2-го типа не сопровождалось перемещениями образца. Было выяснено, что резкое увеличение или уменьшение скорости развертки по сравнению со скоростью порядка 10 Э/с приводило к исчезновению возбуждения НЧ-пульсаций и изменению формы резонансной кривой поглощения. Увеличение градиента магнитного поля в месте расположения образца до 9 Э/см приводило к возбуждению НЧ-пульсаций 1-го типа и МАР при меньших уровнях мощности.

Закрепление образца в полистироле и фторопласте вызывало срыв возбуждения МАР, резкое уменьшение величины гистерезиса по полю, изменение направления и величины гистерезиса в зависимости от ориентации образцов относительно внешнего постоянного магнитного поля. Характерные графики зависимостей амплитуды отраженной волны от резонатора для закрепленных образцов представлены на рис. 2.

§ 4 главы II посвящен обсуждению результатов исследования особенностей НФМР и МАР.

Показано, что учет пондеромоторного действия электромагнитного поля на незакрепленные анизотропные образцы в условиях магнитного резонанса позволяет объяснить многие особенности НФМР и МАР. Его значительная величина и характер зависимости от расстройки по полю объяснены параметрической резонансной зависимостью намагниченности анизотропного образца от координат и углов.

Рассмотрено влияние трансляционных и вращательных степеней свободы образцов на возникновение медленных вариаций сигналов НФМР и МАР — НЧ-пульсаций 1-го типа. Показано, что их появление можно объяснить нарушением резонансных условий в результате параметрической зависимости $H_{\text{рез.}}[H_0(r), \angle(H_0, H_a)]$ при перемещениях образца в неоднородном подмагничивающем поле H_0 и при его поворотах под действием сил и моментов сил в условиях ФМР (здесь H_a — поле анизотропии). Приведены оценки частоты пространственных осцилляций образца и ее зависимости от мощности накачки, дающие хорошее согласие с данными опыта.

Предложено механизм возбуждения НЧ-пульсаций 2-го типа с учетом нагрева образца за счет поглощаемой при резонансе СВЧ мощности. Показано, что нагрев образца приводит к появлению условно-нелинейных явлений — типа тепловых НЧ-пульсаций 2-го рода при НФМР в результате зависимости $H_{\text{рез.}}[H_a(T)]$, где T — температура. Вычисленные значения частоты НЧ-пульсаций на основании тепловой модели и характер ее зависимости от мощности накачки подтверждаются данными опыта.

Отмечено, что более простое возбуждение НЧ-пульсаций при скоростях развертки порядка 10 Э/с можно объяснить синхронностью ее величины параметрам тепловой и механической инертности образцов $\text{ЖИГ} \sim 2\Delta H / \tau^{\text{мч}}$, где $\tau^{\text{мч}}$ — время характеризующее инерционность нагрева, либо перемещений феррита.

Проанализированы причины гистерезисных явлений НФМР и МАР на незакрепленных и закрепленных образцах ЖИГ. По-

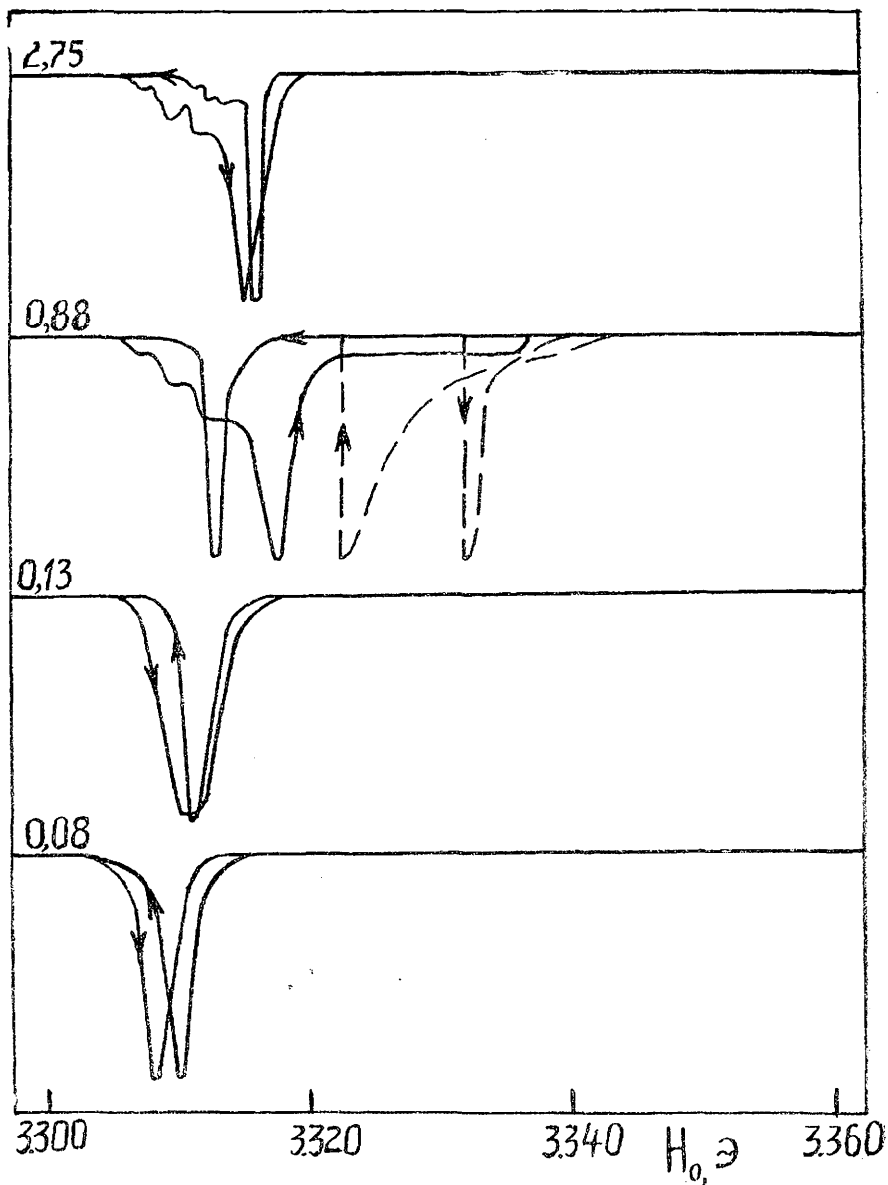


Рис. 2. Зависимость амплитуды отраженной волны от H_0 при различных уровнях мощности накачки в Вт. Образец с $d=0,775$ мм, $2\Delta H=0,55$ Э закреплен в поле клема, \Rightarrow направление развертки по полю, скорость развертки 8 Э/с, — — — образец повернут на пробный угол $\sim \pi/3$.

мимо двух ранее известных механизмов гистерезиса (обусловленных анизотропией формы и зависимостью $H_{рез.}\{H_a[Mz(H_1)]\}$, где H_1 — амплитуда поля накачки, Mz — Z-ая компонента намагниченности, $H_0 \uparrow \uparrow OZ$) рассмотрены вклады от самонагрева образца $H_{рез.}\{Ha[T(P)]\}$ и от его пространственных перемещений $H_{рез.}(H_a, H_0)$. Их учет позволил объяснить данные эксперимента по гистерезису для закрепленных и незакрепленных образцов — монокристаллов ЖИГ. Предложена модель возбуждения магнитоупругих колебаний на основе пондеромоторного действия электромагнитного поля при ФМР.

В главе III рассмотрены вопросы пондеромоторного действия электромагнитного поля на ферромагнетики в условиях магнитного резонанса.

В § I главы III получено и проанализировано выражение для пондеромоторной силы, действующей на ферромагнетик при резонансе. Задача решена в приближении слабонеоднородного поля $|\text{grad}H_0| \ll \Delta H/d$, магнитостатики $d \ll \lambda$, отсутствия доменной структуры $4\pi M_0/3 \ll H_0$, теплового самонагрева, магнитоупругих, нелинейных обменных взаимодействий, разделения быстрых (СВЧ) и медленных (механических) переменных $\omega^{мч}/\omega^{свч} \ll \ll 1$ и на основе тензоров Абрагама и Минковского, где M_0 — намагниченность насыщения, λ — длина волны для СВЧ колебаний. Расчеты показали, что в условиях магнитного резонанса основной вклад дают слагаемые, обусловленные параметрической резонансной зависимостью намагниченности от координат с учетом неоднородностей переменного и постоянного магнитных полей:

$$f_{i,1}^{A,M} \approx \frac{\omega_0 \omega_i (\omega_i^2 + \Delta\omega^2)}{(\omega_1^2 + \omega_i^2 + \Delta\omega^2)^2} M_0 \nabla_i H_1 \quad (1)$$

$$f_{i,0}^{A,M} \approx -\frac{\omega_0 \omega_i^2 \Delta\omega}{(\omega_1^2 + \omega_i^2 + \Delta\omega^2)^2} M_0 \nabla_i H_0 \quad (2)$$

где $\omega_0 = \gamma/H_0$, $\omega_1 = \gamma/H_1$, $\omega_i = \gamma/\Delta H$, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, γ — гиромагнитное отношение. Приведены графики зависимостей соответствующих слагаемых от расстройки по частоте при различных амплитудах поля накачки. Полученные выражения для пондеромоторной силы позволили объяснить величину и характер обнару-

женных при НФМР пондеромоторных эффектов. Показано, что максимальная величина силы, действующей на ферромагнетик в условиях магнитного резонанса, как и в ранее рассмотренных задачах по пондеромоторному действию воли на резонаторы (образцы), пропорциональна добротности резонирующей системы — образца ЖИГ ($H_{\text{рез}}/\Delta H$).

В § 2 главы III рассмотрено оставшееся слагаемое в выражении пондеромоторной силы $\Delta f = -\text{rot}[\mathbf{M} \times \mathbf{H}]/2$. Показано, что для ферромагнетиков этот член отнюдь не мал, как считалось ранее и может быть обнаружен в условиях магнитного резонанса ($\Delta f \approx M_0 \text{grad} H_{0,1}$). Задача решена для случая изотропного однодоменного образца, помещенного в слабонеоднородное магнитное поле. Выяснен физический смысл этого члена при ФМР — аналога электромагнитного резонансного давления в оптике.

В § 3 главы III получены выражения для момента сил, действующего на изотропный и анизотропный образец ферромагнетика при резонансе. Приведены графики зависимостей момента сил от расстройки по частоте при различных амплитудах поля накачки для изотропных образцов и от углов ориентации относительно внешнего магнитного поля для анизотропных. В случае анизотропных сред задача решена для непроводящего, однодоменного сферического образца ферромагнетика кубической сингонии, помещенного в однородное магнитное поле. Соответствующие выражения для моментов сил имеют вид:

$$N_u \approx \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \Delta\omega^2} \mu_0 H_1 \quad (3)$$

$$N_a^\theta \approx -\frac{10\omega_0 \omega_1^2 \Delta\omega}{(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \Delta\omega^2)^2} \sin 2\theta (2\cos 2\theta + \sin^2 \theta \sin^2 2\varphi) \mu_0 H_1 \quad (4a)$$

$$N_a^\varphi \approx -\frac{10\omega_0 \omega_1^2 \Delta\omega}{(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \Delta\omega^2)^2} (\sin^4 \theta \sin 4\varphi) \mu_0 H_1 \quad (4b)$$

где $\langle \theta \rangle = \langle (H_0, [001]) \rangle$, $\langle \varphi \rangle = \langle ([100], (YOZ)) \rangle$, μ_0 — магнитный момент образца. Показано, что максимальная величина момента сил, действующего на анизотропный ферромагнетик при резонансе, пропорциональна добротности образца ($H_{\text{рез}}/\Delta H$). Проведенные оценки величины и характера зависимости момента сил от расстройки по полю подтвердили необходимость его учета при интерпретации гистерезисных и пондеромоторных эффектов НФМР.

В § 4 главы III рассмотрен пример, иллюстрирующий влияние резонансного неоднородного электромагнитного поля на устойчивость движения спиновых частиц и объясняющий обнаруженное движение макроскопической спиновой частицы — сферического образца ЖИГ по орбите в условиях ФМР. Вначале проанализировано движение одной частицы — магнитного диполя в резонансном неоднородном поле, а затем рассмотрена самосогласованная задача двух диполей с учетом их спинов. Установлена возможность отсутствия коллапса в системе взаимодействующих магнитных диполей при учете их спинов и резонансного захвата.

Глава IV посвящена анализу возможностей использования пондеромоторного действия электромагнитного поля на ферромагнетики при резонансе.

В § 1 главы IV рассмотрены перспективы регистрации ферромагнитного резонанса по силе и моменту сил в сравнении с обычными методами. Показано, что в случае изотропных образцов регистрация по моменту сил позволит получить чувствительность порядка 10^{11} спин, для анизотропных $\sim 10^7$ спин.

В § 2 главы IV анализируются возможности увеличения чувствительности абсолютных пондеромоторных датчиков электромагнитного поля с помощью ФМР. Показано, что чувствительность пондеромоторных ваттметров СВЧ диапазона можно увеличить на несколько порядков по сравнению с лучшими зарубежными аналогами. Отмечена возможность разработки избирательных, поляризационных, компактных, с большой помехоустойчивостью по тепловым шумам, легко перестраиваемых датчиков мощности, частоты, напряженности и поляризации перемещенного электромагнитного поля.

В § 3 главы IV исследована возможность проверки корректности различных выражений для пондеромоторной силы в макроскопической электродинамике в условиях ФМР. Выделены наиболее оптимальные условия для таких экспериментов.

В заключение приведены общие выводы по диссертации и намечен план дальнейших исследований по пондеромоторному действию волн на резонаторы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обнаружено пондеромоторное действие электромагнитного поля (пространственное перемещение и устойчивое орбитальное движение сфер ЖИГ, отрыв двух образцов друг от друга и т. д.) при нелинейном ФМР на образцах монокристаллов железотригнейвого граната.

2. Выявленные при этом аномалии сигналов НФМР и МАР (низкочастотные пульсации амплитуды отраженной волны и интенсивностей спектральных линий МАР с частотой 3 Гц и менее, одного типа, 9 Гц и более, другого; гистерезис возбуждения магнитоупругих колебаний и линии поглощения по полю; зависимость формы линии поглощения от времени развертки в условиях адиабатического медленного прохождения по полю) объяснены на основе учета возникающих при ФМР пондеромоторных сил и моментов сил для изотропных и анизотропных образцов в неоднородных магнитных полях, а также тепловых явлений при самонагреве ферромагнетиков за счет поглощаемой СВЧ мощности. Предложена соответствующая модель возбуждения магнитоупругих колебаний.

3. Получены и проанализированы выражения для пондеромоторных сил и моментов сил, действующих на ферромагнетик при резонансе. Формулы для силы получены на основе тензора энергии-импульса Абрагама в случае слабонеоднородных полей. Моменты сил вычислены для изотропных и анизотропных ферромагнитных образцов, исходя из выражения для свободной энергии. Выяснена причина значительности их величин — высокая добротность резонансной системы образца ЖИГ порядка 10^4 . Рассмотрены — аналог резонансного светового давления — резонансное электромагнитное давление при ФМР; пример, иллюстрирующий влияние резонансного неоднородного электромагнитного поля на устойчивость движения спиновых частиц, обладающих магнитным моментом, и объясняющий обнаруженное движение макроскопической спиновой частицы — сферического образца ЖИГ по орбите.

4. Показаны возможности использования пондеромоторного резонансного действия электромагнитного поля на ферромагнетики для решения ряда технических (построение абсолютных высокочувствительных датчиков СВЧ поля, $P_{\text{min}} \leq 10^{-10}$ Вт, маг-

нитометров; разработка прямых методов регистрации ферромагнитного резонанса с чувствительностью $\sim 10^7$ спин) и фундаментальных задач макроскопической электродинамики (измерение силы Абрагама, проверка различных выражений для пондеромоторных сил).

5. Проведенный анализ теоретических и экспериментальных работ по пондеромоторному действию волн на резонаторы (образцы) в низкочастотном, оптическом, ВЧ и СВЧ диапазонах, а также в области магнитного резонанса, доказал справедливость высказывания П. И. Лебедева об общности найденных законов независимо от их физической природы — воздействующего поля и соответствующего резонатора (вещества).

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Филатов А. И., Широносков В. Г. О необходимости учета магниторезонансных сил при экспериментальном изучении нелинейного ферромагнитного резонанса в незакрепленных образцах. — Изв. вузов, Физика, 1977, № 1, с. 138—139.

2. Филатов А. И., Широносков В. Г. Ответ авторов В. Е. Шапиро. — Изв. вузов, Физика, 1978, № 8, с. 154.

3. Широносков В. Г. Пондеромоторные эффекты при наблюдении нелинейного ферромагнитного резонанса. — Томск, 1979. — 13 с. — Рукопись представлена редакцией журнала Изв. вузов, Физика, Деп. в ВИНТИ 28 мая 1979 г., № 2035—79.

4. Широносков В. Г. Несколько замечаний относительно возражений В. Е. Шапиро о «магниторезонансных силах». — Томск, 1979. — 5 с. — Рукопись представлена Редакцией журнала Изв. вузов, Физика, Деп. в ВИНТИ 3 октября 1979 г., № 3596—79.

5. Широносков В. Г. О новых компонентах силы, действующей на ферромагнетик при резонансе. — В кн.: Тезисы Всесоюз. конф. по физике магнитных явлений, 26—29 сентября 1979 г., Харьков, 1979, П9—7, с. 259.

6. Широносков В. Г. Генератор медленной развертки. — ПТЭ, 1979, № 5, с. 151—152.

7. Широносков В. Г. Электромагнитное резонансное давление и момент сил. — УФЖ, 1980, т. 25, № 10, с. 1742—1744.

8. Широносков В. Г. Увеличение чувствительности пондеромоторных ваттметров с помощью ферромагнитного резонанса. — Радиотехника, 1980, т. 35, № 5, с. 64.

9. Широносков В. Г. О необходимости учета пондеромоторного момента сил при изучении нелинейного ферромагнитного резонанса в анизотропных образцах. — ЖТФ, 1981, т. 51, № 1, с. 192—193.

НП 01619. Подписано к печати 28.12.82. Формат 60×84 1/16. Заказ 00165.
Т. 100 экз. Тип. изд-ва Удм. ОК КПСС.