

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи

БОРЩЕГОВСКИЙ Олег Александрович

**КВАЗИРЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА
АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ В ДОМЕННЫХ ГРАНИЦАХ
ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2007

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор М. В. Четкин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А. К. Звездин
доктор физико-математических наук
М. Б. Агранат

Ведущая организация Институт радиотехники и
электроники РАН, г. Москва

Защита состоится “ ” мая 2007 года в часов на заседании
диссертационного совета К 501.001.02 в Московском государственном
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, г. Москва,
Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического
факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ ” апреля 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.02,
кандидат физико-математических наук

И. А. Никанорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы.

Диссертационная работа посвящена исследованию динамики спиновых вихрей в доменных границах (ДГ) пластинок ортоферрита иттрия разных толщин. Возможность существования спиновых вихрей в ортоферритах, впервые предсказанная в работе [1], обусловлена наличием переходных участков доменных границ [2], разделяющих участки с противоположным вращением векторов антиферромагнетизма \vec{l} и слабого ферромагнетизма \vec{m} . Причем вектор, \vec{m} не отклоняясь от своего первоначального направления, уменьшается до нуля, а затем вновь возрастает до своего максимального значения, изменив направление. Вращение вектора \vec{l} происходит в плоскости доменной границы. Таким образом, исследуемые нами спиновые вихри являются антиферромагнитными (АФМ). Один полный оборот вектора \vec{l} соответствует топологическому заряду АФМ вихря 2π .

Исследование динамики АФМ вихрей проводилось методом высокоскоростной фотографии, позволяющим регистрировать динамические положения ДГ с “тонкой структурой” на цифровой фотографии. На полученных таким образом снимках наблюдались движущиеся вдоль доменной границы уединенные изгибные волны (УИВ), имеющие резкие передние и затянутые задние фронты, и отстающие от доменной границы как целое. По-видимому, эти волны и сопровождают АФМ вихри, существующие и движущиеся в доменных границах пластинок ортоферрита иттрия.

Динамика УИВ, сопровождающих антиферромагнитные вихри, в доменных границах ортоферрита иттрия, как и динамика самих ДГ, является квазирелятивистской и сверхзвуковой. Зависимость скорости движения уединенной изгибной волны вдоль доменной границы (u) от

скорости самой доменной границы (v) имеет необычный нелинейный вид с максимумом, положение которого зависит от амплитуды УИВ. По мере приближения скорости доменной границы к предельному значению 20 км/с, равному скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии, скорость изгибной волны, сопровождающей вихрь, стремится к нулю. Это является следствием квазирелятивистской динамики АФМ вихря на квазирелятивистской доменной границе. Полная же скорость УИВ (w) с ростом скорости движения доменной границы (v) нелинейно растет и насыщается на уровне 20 км/с. Такое поведение УИВ, сопровождающих АФМ вихри, можно объяснить существованием чрезвычайно больших гироскопических сил, действующих на вихри.

В диссертации приведено эмпирическое выражение, удовлетворительно описывающее полученные экспериментальные результаты по динамике АФМ вихрей и хорошо согласующееся на убывающем участке зависимости $u(v)$ с соотношением $u^2 + v^2 = c^2$, полученным А.К. Звездиным и А.Ф. Попковым [3], где c - скорость спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии, равная 20 км/с.

Квазирелятивистская динамика доменных границ и антиферромагнитных вихрей в пластинках ортоферрита иттрия ($YFeO_3$) с предельной скоростью движения делает возможным изучение релятивистских эффектов на примере движения доменных границ слабых ферромагнетиков со скоростями на четыре порядка ниже световых.

Экспериментальные исследования динамики доменных структур в редкоземельных ортоферритах представляют большую научную ценность в разработке ряда фундаментальных проблем магнетизма для широкого класса материалов. В практическом отношении ортоферриты являются довольно перспективными материалами для создания систем связи и обработки информации благодаря тому, что доменные границы движутся в них с рекордно высокими сверхзвуковыми скоростями. Кроме того,

ортоферриты имеют крайне высокие подвижности доменных границ, что необходимо для работы устройств при низких управляющих магнитных полях.

Исследование динамики доменных границ и антиферромагнитных вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами, в ортоферритах представляет интерес в связи с уникальными магнитооптическими и динамическими свойствами этих материалов. Ортоферриты относятся к классу слабых ферромагнетиков и являются оптически прозрачными в видимой области спектра, что позволяет использовать их в магнитооптических невзаимных устройствах, оптических затворах и магнитооптических модуляторах света с очень высоким быстродействием. Устройства, основанные на использовании данных материалов, отличаются надежной работой, что в значительной степени обусловлено возможностью их сверхбыстрого управления.

Редкоземельные ортоферриты обладают сильной орторомбической анизотропией, и с макроскопической точки зрения ведут себя подобно антиферромагнетикам. Это дает им несомненные преимущества перед другим большим классом оптически прозрачных магнетиков – ферритами-гранатами, которые по макроскопическим свойствам являются ферромагнетиками. В связи с малым спонтанным магнитным моментом, возникающим из-за взаимодействия Дзялошинского-Мория, нелокальное взаимодействие в слабых ферромагнетиках, обусловленное размагничивающими полями, весьма слабо и не оказывает существенного влияния на динамику ДГ, чего нельзя сказать о ферритах-гранатах. Наличие слабого ферромагнитного момента дает возможность изучать динамику доменных структур слабых ферромагнетиков под действием внешнего магнитного поля. В антиферромагнетиках такой возможности нет.

Большой интерес представляют результаты по лобовому столкновению пары уединенных изгибных волн малых амплитуд, сопровождающих АФМ вихри, при малых скоростях движения ДГ. Было экспериментально установлено, что аннигиляция АФМ вихрей в ортоферрите иттрия происходит вплоть до скоростей, близких к скорости звука, при этом солитоноподобное поведение, которое наблюдалось в пленках ферритов-гранатов, в пластинах ортоферритов до сих пор замечено не было. Такое поведение АФМ вихрей можно объяснить лишь действием на них необычно больших гироскопических сил. Дальнейшие исследования в этом направлении могут оказаться полезными для поиска перехода от больших гироскопических сил, действующих на АФМ вихри, к малым. То есть для обнаружения солитоноподобного поведения АФМ вихрей, при котором динамику вихрей будут определять уже не большие гироскопические силы, а малые. А частичная аннигиляция АФМ вихрей, имеющая место при столкновении двух уединенных изгибных волн разных амплитуд, дает возможность получать результирующие волны, имеющие амплитуды ~ 1 мкм, получение которых известными методами затруднительно.

Очень важными в феноменологическом отношении являются полученные результаты по отражению УИВ, сопровождающих АФМ вихри, движущихся вдоль сверхзвукового участка доменной границы от части ДГ, движущейся со скоростью поперечного звука. Полученные результаты подобны тем, что наблюдали при превращении кинк - антикинк на конце Джозефсоновского контакта. Это указывает на сходство АФМ вихрей в ортоферритах с Джозефсоновскими и может являться подтверждением того, что рассматриваемые нами объекты действительно имеют вихревую природу.

Целью диссертационной работы являлось исследование динамики АФМ вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами, в доменных границах пластинок ортоферрита иттрия.

К главным задачам работы относятся:

1. Экспериментальное исследование динамических свойств УИВ, сопровождающих антиферромагнитные вихри, распространяющихся вдоль доменных границ в пластинках YFeO_3 , подтверждение существования больших гироскопических сил, действующих на АФМ вихри, и связи вихрей с сопровождающими их уединенными изгибными волнами в образцах ортоферрита иттрия разных толщин.
2. Исследование лобовых столкновений уединенных изгибных волн при малых скоростях движения доменных границ для подтверждения их вихревой природы и для получения в результате аннигиляции АФМ вихрей малых топологических зарядов, а также с целью обнаружения возможности перехода от больших гироскопических сил к малым, при которых АФМ вихри могут начать вести себя солитоноподобным образом.
3. Экспериментальное исследование отражения уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, движущихся вдоль сверхзвуковой части доменной границы, от участка границы, движущегося со скоростью поперечного звука, для подтверждения их вихревой природы.

Научная новизна и практическая ценность работы заключаются в следующем:

1. Исследования динамики доменных границ и антиферромагнитных вихрей проводились новым методом – методом трехкратной высокоскоростной цифровой фотографии.
2. В работе впервые проведены исследования динамики антиферромагнитных вихрей в пластинке YFeO_3 толщиной 80 мкм. При сравнении полученных результатов с аналогичными для пластинки

толщиной 40 мкм, экспериментально установлено, что максимальная амплитуда УИВ, а значит и величина топологических зарядов АФМ вихрей, зависит от толщины исследуемых образцов. Чем толще образец, тем меньшие амплитуды имеют уединенные изгибные волны.

3. При исследовании динамических свойств уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, в образцах с разными толщинами было установлено, что положение максимума на зависимостях скорости движения УИВ вдоль доменной границы (u) от скорости движения самой ДГ (v) смещается с изменением амплитуд изгибных волн. Скорость движения УИВ вдоль ДГ достигает своего максимального значения тем раньше, чем меньше амплитуда волны, а значит и меньше топологический заряд АФМ вихря. А полная скорость изгибной волны (w), сопровождающей АФМ вихрь, при меньших амплитудах УИВ достигает насыщения раньше.

4. Впервые в ортоферритах была получена полная и частичная аннигиляция пары АФМ вихрей, сопровождаемых УИВ малых амплитуд, движущихся навстречу друг другу, при малых скоростях движения ДГ, немного больших скорости поперечного звука. В результате частичной аннигиляции АФМ вихрей, величина амплитуды экспериментально наблюдаемой уединенной изгибной волны, сопровождающей результирующий АФМ вихрь, составила ~ 2 мкм.

5. Впервые было обнаружено отражение УИВ, сопровождающих АФМ вихри, движущихся вдоль сверхзвукового участка доменной границы, от участка границы, движущегося со скоростью поперечного звука.

6. Практическая ценность представленных в диссертационной работе результатов основана на возможности применения исследуемых материалов в системах связи и обработки информации. Динамические свойства редкоземельных ортоферритов могут существенно увеличить быстродействие устройств, основанных на их применении.

Апробация работы.

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на IXX и XX Международных школах – семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва 2004 и 2006 г.); Международном симпозиуме по магнетизму (Москва 2005 г.); XII Международной конференции по нанокompозитным технологиям – ICSE XII (Тенерифе, Испания 2005 г.); Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов 2007» (Москва 2007 г.)

Публикации.

Результаты, представленные в работе, докладывались на 5 международных конференциях и были опубликованы в 8 научных работах, приведенных в конце автореферата.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем работы - _____ страниц машинописного текста, включая _____ рисунков и библиографию из _____ наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение. Во введении обоснованы актуальность, новизна и практическая значимость описанных в работе исследований, сформулированы цели и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава. В первой главе представлен литературный обзор кристаллохимических и магнитооптических свойств слабых ферромагнетиков, а также рассмотрена магнитная структура доменных границ и АФМ вихрей в пластинках ортоферрита иттрия.

Вторая глава. Во второй главе описан способ приготовления образцов YFeO_3 , используемых для исследований динамических доменных структур. Приведены сведения об экспериментальных методах получения и наблюдения динамических доменных структур в оптически прозрачных магнетиках. Описан новый метод высокоскоростной фотографии - метод трехкратной высокоскоростной фотографии, являющийся на сегодняшний день наиболее совершенным методом исследования динамики доменных структур в прозрачных магнетиках. Также в данной главе описано устройство ТЕА – ТЕА лазера с поперечным разрядом на азоте ($\lambda = 337$ нм), позволяющего при помощи красителя Oxazine получать короткие импульсы света $\lambda = 630$ нм длительностью до 0,25 нс. Такие импульсы очень важны для получения мгновенных изображений динамических доменных структур в ортоферритах, где скорости движения доменных границ очень велики.

Метод трехкратной высокоскоростной фотографии состоит в получении в реальном масштабе времени цифровых фотографий с тремя положениями динамической доменной границы за время действия одного импульса магнитного поля (рис.1). Луч красного света при помощи зеркал 7 и 9 делится на 3 луча. Первый и третий лучи проходят через общий поляризатор 13, а второй - через поляризатор 14. Далее каждый из лучей фокусируют с помощью линзы 15 на исследуемый образец с некоторой задержкой друг относительно друга. Затем, пройдя через анализатор 21, лучи попадают в объектив цифрового фотоаппарата. Взаимным расположением главных плоскостей поляризаторов 13 и 14 и анализатора 21 добиваются оптически противоположных контрастов доменных структур (рис.2). В результате на цифровом фотоаппарате регистрируют

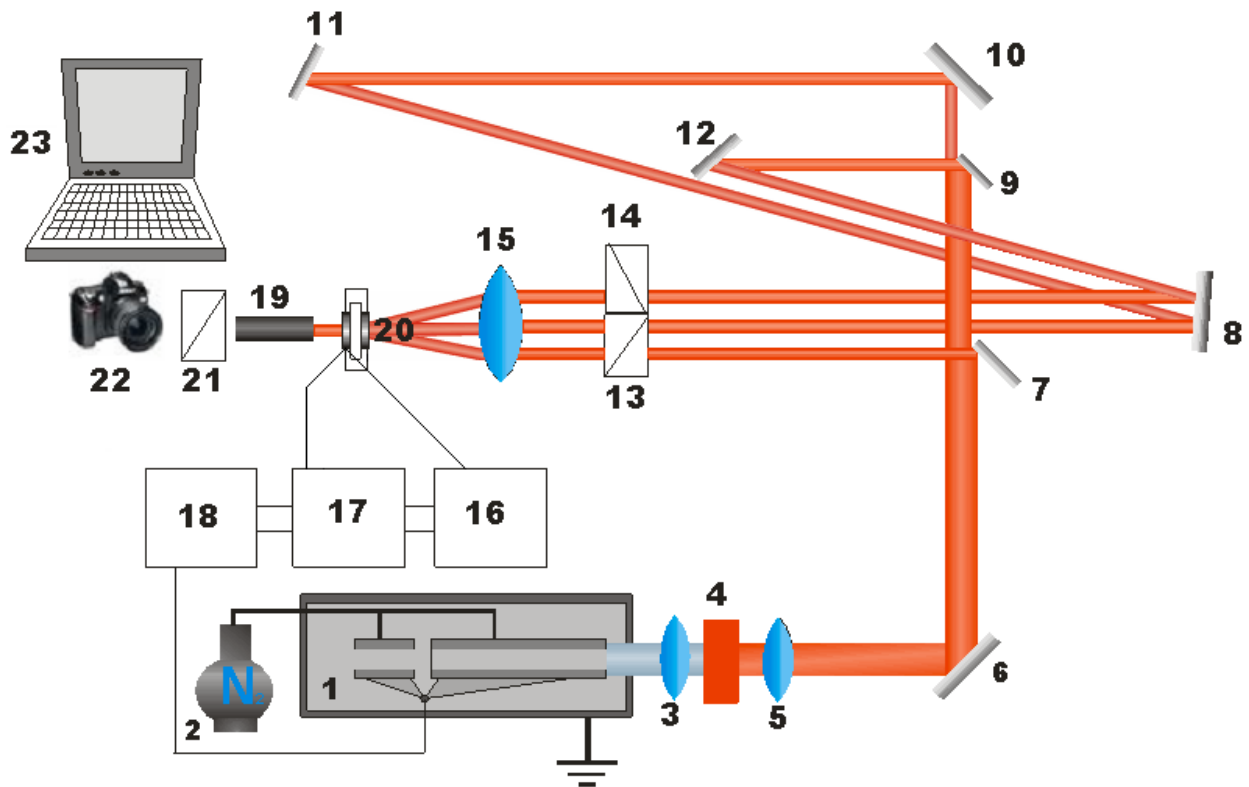


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования динамики ДГ методом трехкратной высокоскоростной фотографии: 1 – лазер; 2 – сосуд Дьюара с азотом; 3,5,15 – линзы; 4 – кювета с красителем; 6 – 12 – зеркала; 13,14 – поляризаторы; 16,17,18 – блок импульсных генераторов, 19 – микроскоп, 20 – подложка с пластинкой ортоферрита иттрия, катушками и проводами, создающими импульсное магнитное поле; 21 – анализатор; 22 – фотокамера, 23 – компьютер.

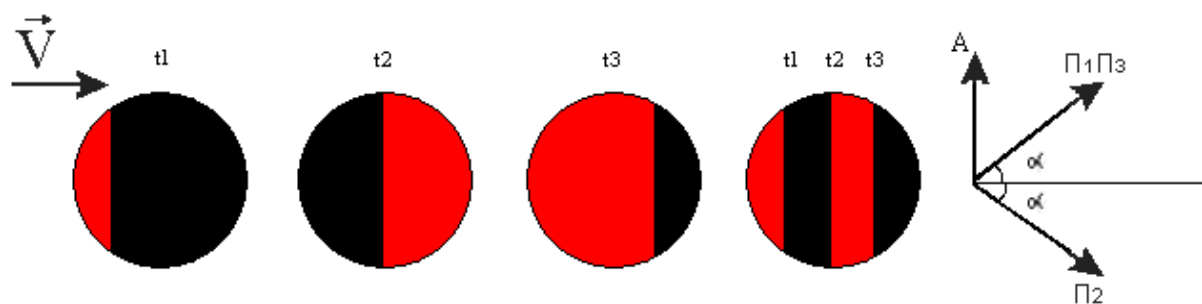


Рис.2. Схематическое изображение получения трехкратных высокоскоростных фотографий.

Движение ДГ в образце происходит со скоростью V . t_1, t_2, t_3 – моменты времени, когда соответственно первый, второй и третий лучи проходят через образец, Π_1, Π_2, Π_3 – направление главных плоскостей поляризаторов и анализатора A . α – угол фарадеевского вращения.

динамическую доменную структуру в виде темных и светлых полос, границами раздела между которыми и являются доменные границы. Пример трехкратной высокоскоростной фотографии, полученной описанным выше методом, изображен на рис.3. На фотографии доменная граница движется слева направо. Первому положению ДГ соответствует переход от светлой части фотографии к темной, второму – от темной к светлой, и третьему - вновь от светлой части к темной. Из фотографии отчетливо видно, что вдоль доменной границы сверху вниз движется уединенная изгибная волна, которая сопровождает АФМ вихрь. Эта волна имеет резкий передний и затянутый задний фронты.

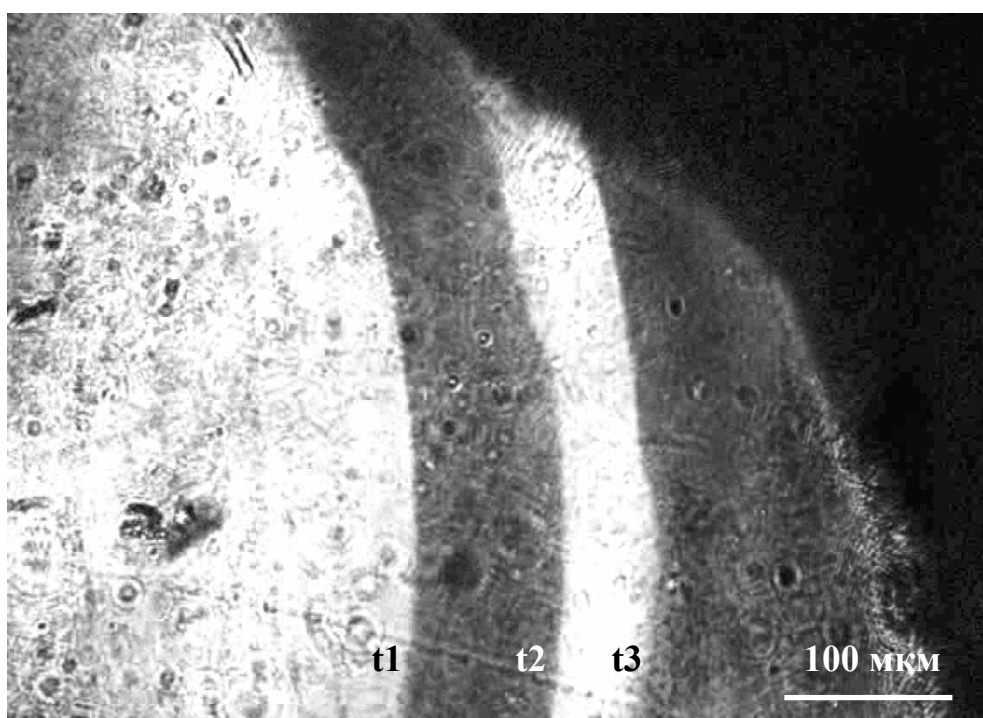


Рис.3. Трехкратная высокоскоростная фотография динамической доменной структуры.
 $t_2 - t_1 = 8$ нс, $t_3 - t_2 = 6$ нс; $v = 11.5$, $w = 20$, $u = 16.4$.

Третья глава. В третьей главе описывается квазирелятивистская сверхзвуковая динамика доменных границ в пластинках YFeO_3 . Представленные в работе экспериментальные зависимости скорости движения доменных границ от величины внешнего магнитного поля для

исследуемых образцов толщиной 40, 50 и 80 мкм (рис.4) хорошо согласуются с квазирелятивистской формулой
$$v(H) = \frac{\mu H}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu H}{c}\right)^2}},$$

полученной А.К.Звездиным, В.Г.Барьяхтаром и Б.А.Ивановым, где H - продвигающее магнитное поле, v – скорость ДГ, μ - подвижность ДГ. Подвижности доменных границ в этих образцах равны 10000, 12000 и 14000 см/с·Э соответственно.

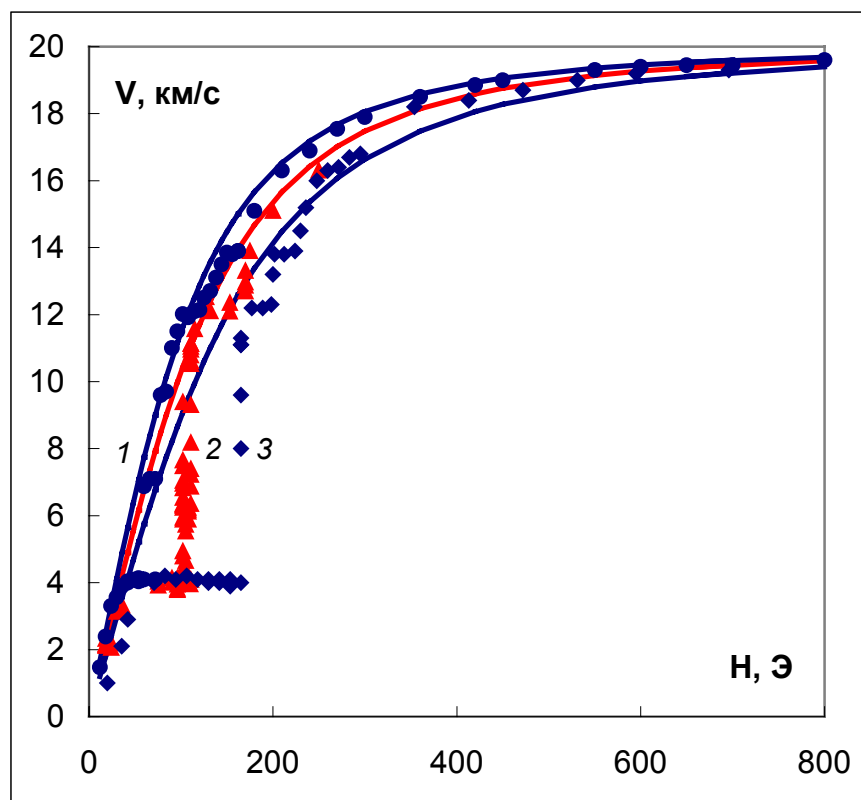


Рис.4. Зависимость скорости движения доменной границы от величины импульсного магнитного поля для пластинок ортоферрита иттрия толщиной 80 мкм – 1, 50 мкм - 2 и 40 мкм – 3. Сплошными кривыми изображены теоретические зависимости.

Кроме этого в данной главе обсуждаются особенности, существующие на полевой зависимости скорости доменной границы в ортоферрите иттрия. На этой зависимости наблюдаются области постоянства скорости движения ДГ в виде “полочек”, обусловленные магнитоупругими

аномалиями. Сильнее других магнитоупругие аномалии выражены при скоростях движения ДГ, равных скорости поперечного (4 км/с) и, реже, продольного (7 км/с) звука в ортоферрите иттрия. Существование звуковых полочек связано с торможением доменных границ, вызванных излучением акустических фононов.

Четвертая глава. В четвертой главе представлены результаты исследования динамики уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри, в пластинках ортоферрита иттрия разных толщин.

Скорость движения УИВ, сопровождающей вихрь, вдоль доменной границы (u) сначала монотонно возрастает с ростом скорости движения самой ДГ (v), достигает максимума, а затем уменьшается по мере приближения скорости движения ДГ к ее предельному значению. Убывающий участок зависимости $u(v)$ хорошо описывается соотношением $u^2 + v^2 = c^2$, полученным А.К.Звездиным и А.Ф.Попковым [3] при анализе динамики кинков больших амплитуд на доменной границе ортоферрита иттрия, где c – максимальная скорость спиновых волн равная 20 км/с (рис.5, рис.7). Причем на возрастающей части зависимости имеет место соотношение $u^2 + v^2 = w^2$. А полная скорость движения уединенной изгибной волны (w), сопровождающей АФМ вихрь, с ростом скорости движения доменной границы (v) достигает насыщения при скоростях (v), соответствующих максимуму на зависимости $u(v)$ (рис.6, рис.8).

Такая необычная динамика уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, является следствием действия на вихри очень больших гироскопических сил, приводящих к насыщению полной скорости движения УИВ ($w=20$ км/с) при скоростях движения ДГ, существенно меньших предельной. Динамика вихрей, также как и доменных границ, является сверхзвуковой и квазирелятивистской с

предельной скоростью движения 20 км/с, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Квазирелятивизм динамики антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия является результатом присутствия в Лагранжиане этого кристалла Лорентц-инвариантной части. Эта часть Лагранжиана ответственна и за квазирелятивизм динамики самих доменных границ ортоферритов.

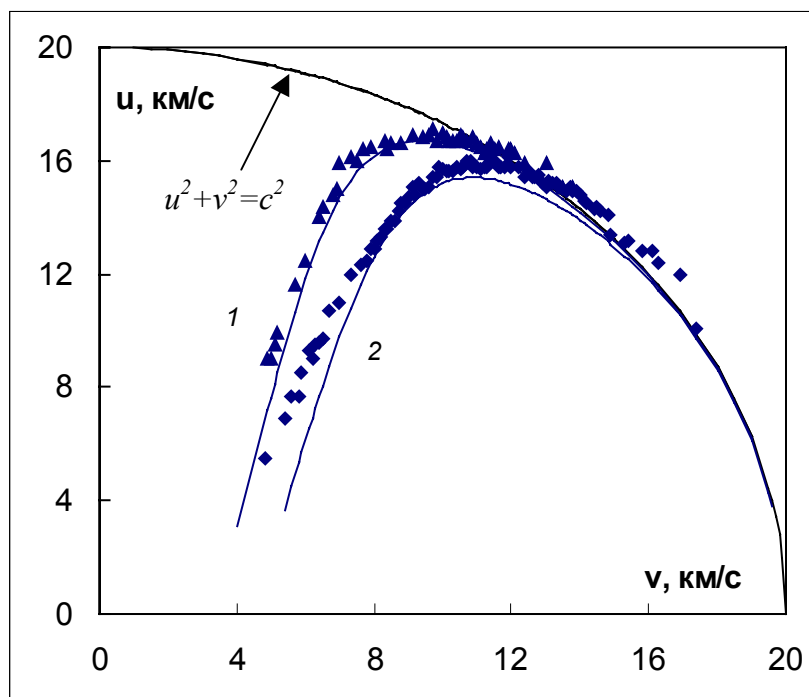


Рис.5. Зависимость скорости движения АФМ вихря вдоль доменной границы от скорости самой доменной границы для пластинок YFeO_3 толщиной 40 и 80 мкм. Сплошными кривыми 1 и 2 изображены эмпирические зависимости.

1 — 80 мкм, $\alpha = 3,2$; 2 — 40 мкм, $\alpha = 2,6$

Было установлено, что от толщины исследуемого образца зависит максимальная величина амплитуд уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри. При исследовании образца толщиной 80 мкм максимальная амплитуда УИВ составила ~ 9 мкм, в то время как в образце, имеющем толщину 40 мкм, ~ 16 мкм.

Из рис.5 видно, что зависимость $u(v)$, построенная для образца толщиной 80 мкм, имеет максимум в области меньших скоростей v и

больших скоростей u по сравнению с положением максимума на подобной зависимости для образца толщиной 40 мкм. А полная скорость движения АФМ вихря выходит на насыщение при меньших скоростях v для более толстого образца толщиной 80 мкм (рис.6).

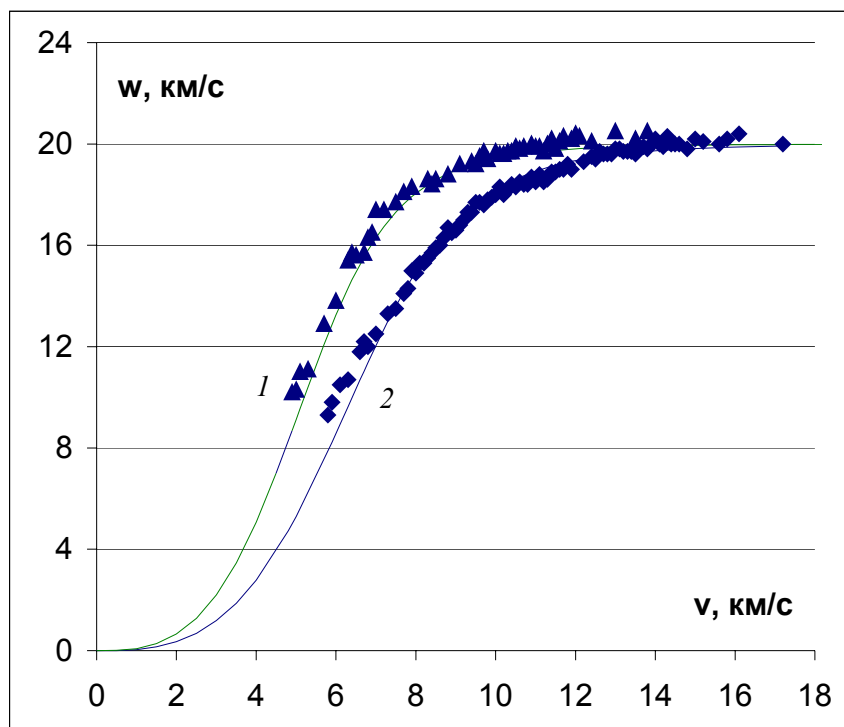


Рис.6. Зависимость полной скорости движения АФМ вихря от скорости доменной границы для пластинок YFeO_3 толщиной 40 и 80 мкм. Сплошными кривыми 1 и 2 изображены эмпирические зависимости.

1 — 80 мкм, $\alpha = 3,2$; 2 — 40 мкм, $\alpha = 2,6$.

На рис.7 представлены зависимости $u(v)$ соответствующие разным интервалам амплитуд УИВ, сопровождающих АФМ вихри, для образцов, имеющих толщины 40, 50 и 80 мкм. Видно, что положение максимума смещается с изменением амплитуды УИВ, а значит и топологического заряда АФМ вихря. По мере уменьшения амплитуды УИВ, максимум на зависимости $u(v)$ смещается в область меньших скоростей v и больших скоростей u .

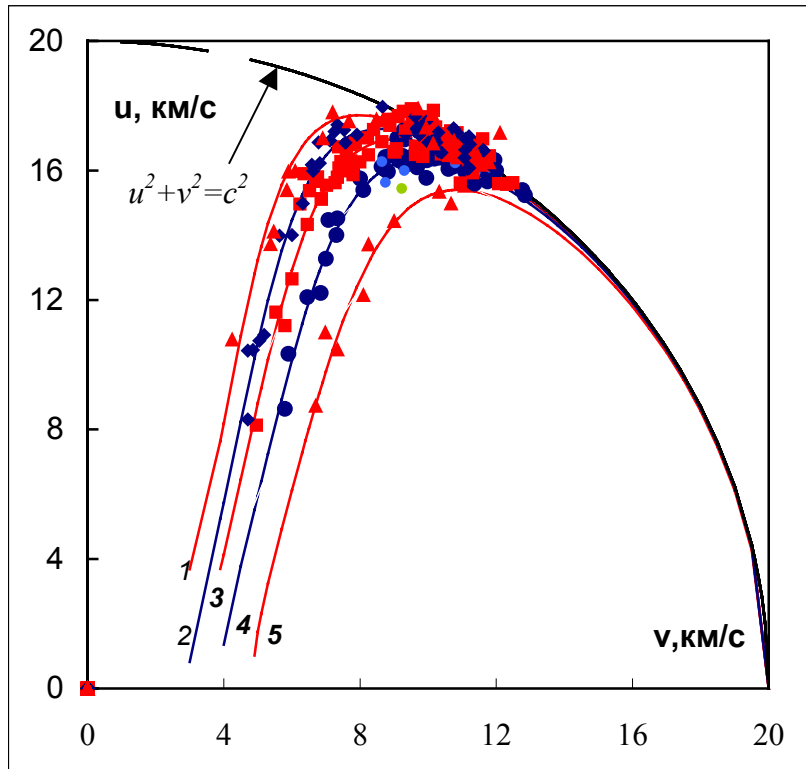


Рис.7. Зависимость скорости движения АФМ вихря вдоль доменной границы от скорости самой доменной границы для разных амплитуд уединенных изгибных волн (A), сопровождающих вихри, и соответствующих им коэффициентов α из эмпирической зависимости. Экспериментальные зависимости построены для образцов YFeO_3 толщиной 40, 50 и 80 мкм.

1 — $\alpha = 4$ ($A = 2 - 4$ мкм); 2 — $\alpha = 3,6$ ($A = 4 - 6$ мкм); 3 — $\alpha = 3,4$ ($A = 6 - 9$ мкм); 4 — $\alpha = 3$ ($A = 9 - 11$ мкм); 5 — $\alpha = 2,6$ ($A = 11 - 16$ мкм).

Полная же скорость движения УИВ (w), сопровождающей антиферромагнитный вихрь, с ростом скорости ДГ (v) выходит на насыщение раньше при меньших амплитудах уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри (рис.8).

Полученные результаты хорошо согласуются с эмпирической

формулой $w(v) = \frac{c(\frac{\alpha v}{c})^3}{\sqrt{1 + (\frac{\alpha v}{c})^6}}$. А выражение $u(v) = \sqrt{\left(\frac{c(\frac{\alpha v}{c})^3}{\sqrt{1 + (\frac{\alpha v}{c})^6}}\right)^2 - v^2}$,

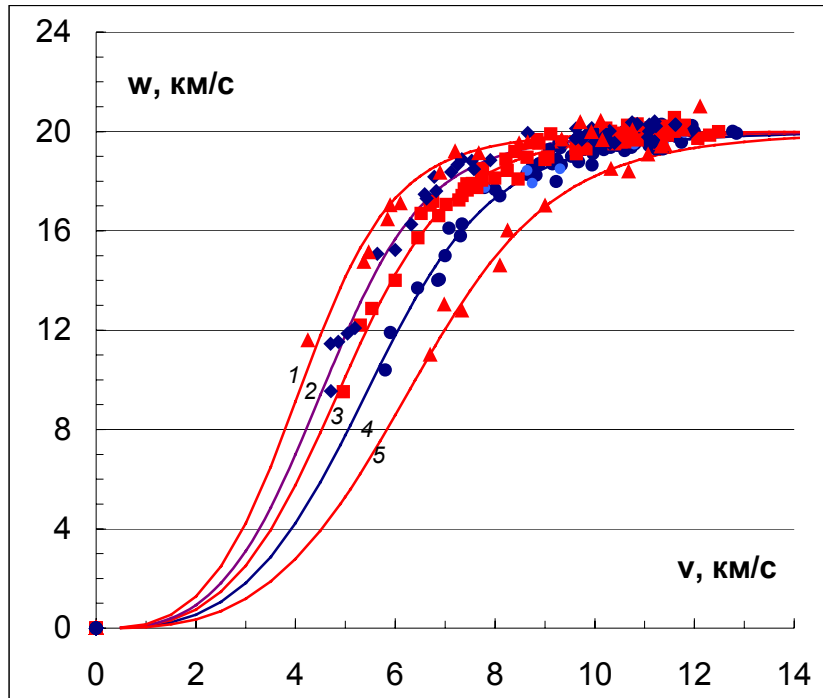


Рис.8. Зависимость полной скорости АФМ вихря от скорости движения доменной границы для разных амплитуд уединенных изгибных волн (A), сопровождающих вихри, и соответствующих им коэффициентов α из эмпирической зависимости. Экспериментальные зависимости построены для образцов YFeO_3 толщиной 40, 50 и 80 мкм.

1 — $\alpha = 4$ ($A = 2 - 4$ мкм); 2 — $\alpha = 3,6$ ($A = 4 - 6$ мкм); 3 — $\alpha = 3,4$ ($A = 6 - 9$ мкм); 4 — $\alpha = 3$ ($A = 9 - 11$ мкм); 5 — $\alpha = 2,6$ ($A = 11 - 16$ мкм).

полученное путем подстановки формулы для $w(v)$ в выражение $u^2(v) = w^2(v) - v^2$, на убывающем участке хорошо согласуется с уже известным соотношением $u^2 + v^2 = c^2$.

Одна из первых попыток теоретического описания динамики АФМ вихрей принадлежит авторам работы [4]. Ими была получена зависимость скорости движения АФМ вихря вдоль ДГ от скорости движения самой

границы
$$u = \frac{v \sqrt{(a_0^2 - 1) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}}{\sqrt{1 + (a_0^2 - 1) \frac{v^2}{c^2}}}$$
, где a_0 - безразмерный коэффициент,

равный отношению гироскопической силы, продвигающей вихрь, к силе,

тормозящей его. При достаточно больших значениях параметра a_0 это уравнение хорошо описывает характер динамики АФМ вихрей на убывающей части зависимости, что подтверждает наличие большой гироскопической силы (рис.9).

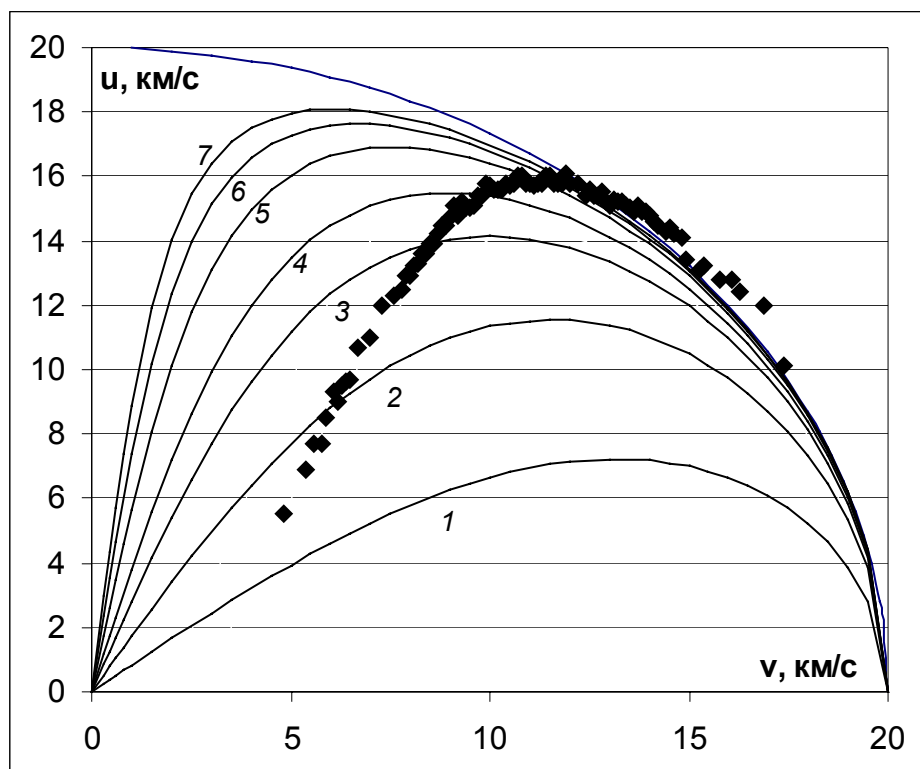


Рис.9. Сравнение экспериментальной (•) и теоретических [4] зависимостей скорости движения АФМ вихря вдоль доменной границы от скорости движения самой ДГ в пластинке YFeO_3 для различных коэффициентов a_0 . 1 - $a_0=1,3$; 2 - $a_0=2$; 3 - $a_0=3$; 4 - $a_0=4$; 5 - $a_0=5$; 6 - $a_0=6$; 7 - $a_0=7$.

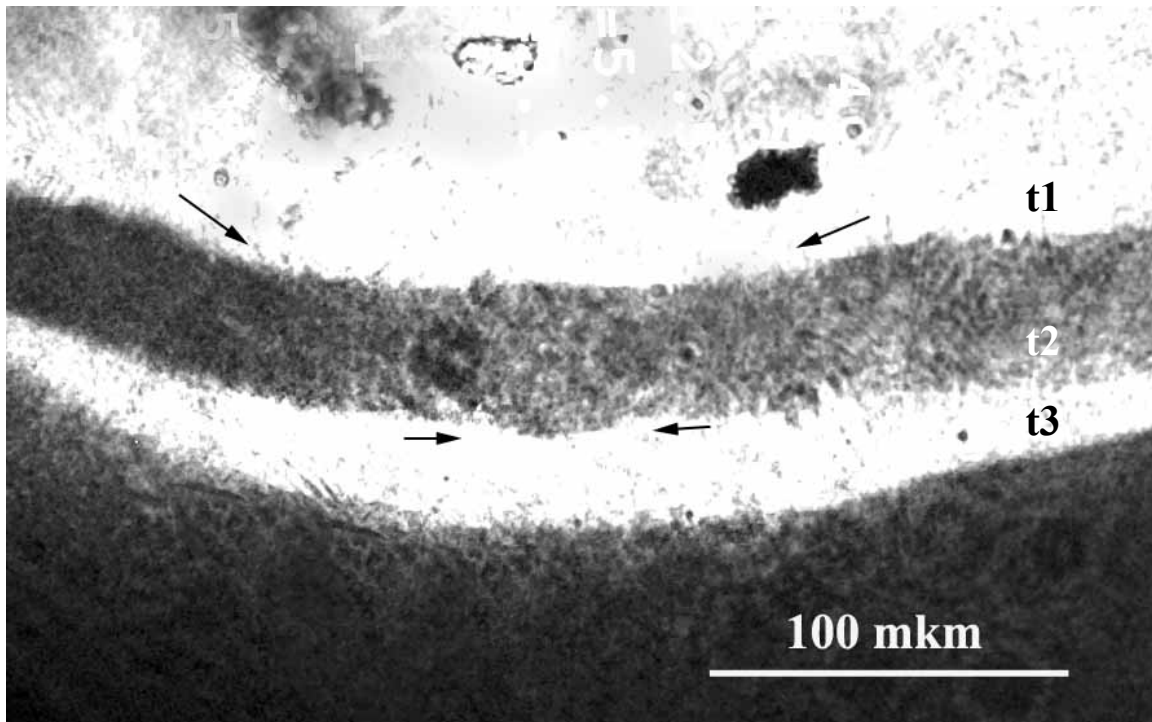
А в работе [5] приведены численные оценки некоторых параметров распространяющейся вдоль доменной границы уединенной изгибной волны, сопровождающей спиновый вихрь, в антиферромагнитных кристаллах.

Результаты столкновения пары уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, показали отсутствие солитоноподобного поведения АФМ вихрей, наблюдаемого ранее в ферритах–гранатах, где уединенные изгибные волны, сопровождающие спиновые вихри, при

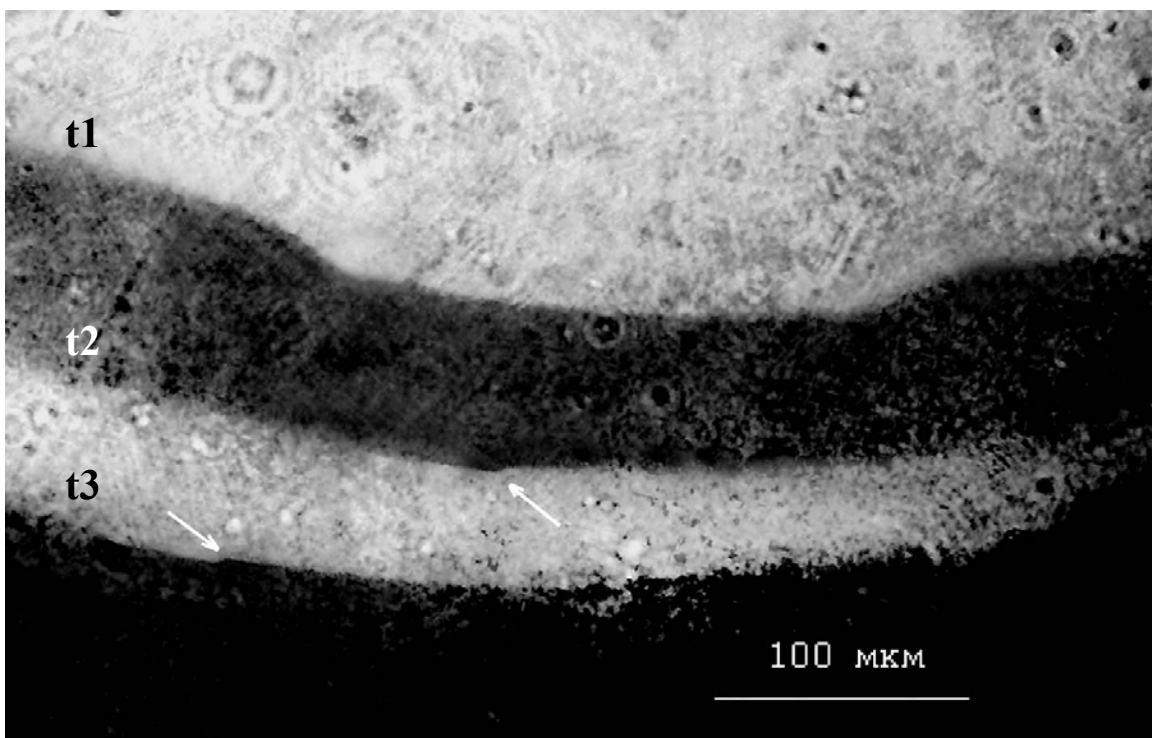
достаточно больших скоростях проходили насквозь друг друга. Аннигиляция АФМ вихрей, сопровождаемых УИВ, наблюдалась вплоть до скоростей движения ДГ, близких к скорости звука. На рис.10 представлены фотографии, иллюстрирующие полное (а) и частичное (б) вычитание УИВ, сопровождающих АФМ вихри, движущихся навстречу друг другу. Движение доменной границы происходит сверху вниз. Такое поведение уединенных изгибных волн можно объяснить лишь существованием необычно больших гироскопических сил, действующих на АФМ вихри.

Исследование столкновений УИВ, несомненно, представляет интерес с точки зрения получения изгибных волн малых амплитуд, несущих малый топологический заряд АФМ вихрей. Генерация таких волн на локальных дефектах или от тормозящего магнитного поля проводов крайне затруднительна. Также эти результаты могут оказаться полезными для обнаружения перехода от малых гироскопических сил к большим.

В диссертационной работе впервые представлены результаты по отражению уединенных изгибных волн, движущихся вдоль сверхзвуковой части ДГ, от части границы, движущейся со скоростью поперечного звука. Эти исследования проводились в пластинке ортоферрита иттрия, имеющей толщину 40 мкм. Генерация АФМ вихрей в образце происходила при резком локальном торможении части ДГ, движущейся со скоростью ~ 12 км/с, на дефекте образца. При такой скорости доменная граница становилась сильно неустойчивой, что способствовало выходу вектора \vec{l} из легкой плоскости ac на трудное направление b кристалла. Другая, довольно значительная часть ДГ, продолжала двигаться со скоростью поперечного звука, равной 4 км/с. В результате уединенная изгибная волна, сопровождающая антиферромагнитный вихрь, движущаяся вдоль сверхзвуковой части ДГ, достигнув звуковой её части, отражалась и продолжала свое движение в противоположном направлении с прежней



(a)



(б)

Рис.10. Трехкратные высокоскоростные фотографии, иллюстрирующие полную (а) и частичную (б) аннигиляцию АФМ вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами. Амплитуда результирующей УИВ (б) равна 2 мкм. $t_2 - t_1 = 8$ нс, $t_3 - t_2 = 6$ нс.

по модулю скоростью. При этом топологический заряд отраженного АФМ вихря, сопровождаемого уединенной изгибной волной, менял свой знак, не меняясь при этом по абсолютной величине.

На рис.11 представлена двукратная высокоскоростная фотография доменной границы, движущейся сверху вниз, с распространяющейся вдоль нее уединенной изгибной волной, сопровождающей АФМ вихрь. На первом положении доменной границы УИВ движется слева направо, а на втором, отразившись, - справа налево.

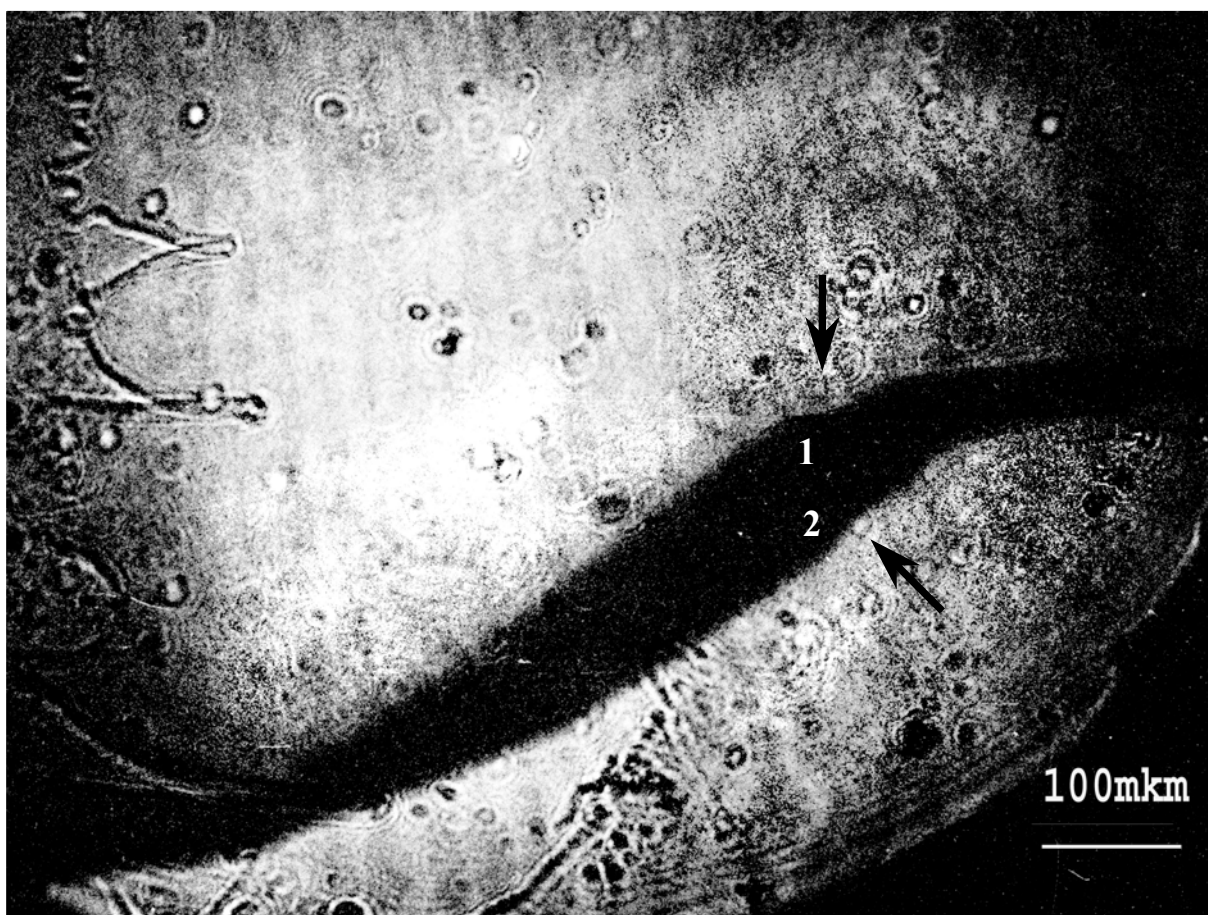


Рис.11. Двукратная высокоскоростная фотография, иллюстрирующая отражение УИВ, сопровождающей АФМ вихрь, от участка ДГ, движущегося со скоростью поперечного звука. 1- начальная волна, 2 – отраженная волна; $v=10$ км/с, $w=20$ км/с, $u=17,9$ км/с.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1) Разработан метод трехкратной высокоскоростной фотографии, позволивший существенно расширить возможности исследования динамики уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, в пластинках ортоферрита иттрия.

2) Исследования динамики уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри, в пластинках YFeO_3 разных толщин показали, что с увеличением толщины исследуемого образца максимальные амплитуды УИВ уменьшаются.

3) Экспериментально установлено, что зависимость скорости движения УИВ, сопровождающей антиферромагнитный вихрь, вдоль доменной границы (u) от скорости самой доменной границы (v) имеет необычный нелинейный вид с максимумом, положение которого зависит от амплитуды УИВ. Максимум достигается тем раньше, чем меньше амплитуда УИВ. По мере приближения скорости доменной границы к предельному значению 20 км/с, равному скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии, скорость УИВ стремится к нулю. Это является следствием квазирелятивистской динамики АФМ вихря на квазирелятивистской доменной границе. Полная же скорость УИВ (w) с ростом скорости доменной границы (v) нелинейно растет и насыщается на уровне 20 км/с. Происходит это тем раньше, чем меньше амплитуда УИВ.

4) Необычный вид нелинейных зависимостей полной скорости движения УИВ (w), сопровождающих АФМ вихри, и скорости движения УИВ вдоль ДГ (u) от скорости самой ДГ (v) может объясняться лишь существованием чрезвычайно больших гироскопических сил, действующих на вихри. Это приводит к тому, что полная скорость движения УИВ достигает насыщения при скорости движения ДГ существенно меньшей ее предельной скорости. Зависимости $w(v)$ и $u(v)$ удовлетворительно описываются эмпирическими квазирелятивистскими формулами, представленными в диссертации. Для убывающего участка

зависимости $u(v)$ эта формула хорошо согласуется с уже известным выражением $u^2+v^2=c^2$, где c – скорость спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии.

5) Получены результаты по лобовому столкновению двух уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, с разными амплитудами при скоростях движения ДГ, близких к скорости звука. В результате таких столкновений возможно получение УИВ малых амплитуд ~ 1 мкм, генерация которых известными методами довольно затруднительна. Солитоноподобного поведения АФМ вихрей в пластинках ортоферрита иттрия до сих пор не наблюдали. Дальнейшие исследования в данном направлении могут способствовать обнаружению предела перехода от больших гироскопических сил к малым.

б) При исследовании динамики уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, было обнаружено отражение УИВ, движущихся вдоль сверхзвуковой части доменной границы от участка ДГ, движущегося со скоростью поперечного звука. Причем величина амплитуды УИВ оставалась неизменной, а значит не изменялась и величина топологического заряда вихря, менялся только его знак.

Полученные результаты по необычной квазирелятивистской динамике уединенных изгибных волн, сопровождающих АФМ вихри, не наблюдаемой ранее ни в одном из магнитоупорядоченных веществ, и аннигиляция вихрей свидетельствуют о существовании необычно больших гироскопических сил, действующих на АФМ вихри. А отражения, наблюдаемые в пластинках ортоферрита иттрия, лишней раз подтверждают вихревую природу изучаемых объектов. Развитие теории гироскопической силы и релаксации позволит теоретически обосновать описанные в работе экспериментальные результаты.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщеговский О.А. Гироскопическая квазирелятивистская динамика антиферромагнитного вихря на доменной границе ортоферрита иттрия //Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 79. - Вып. 9. – С. 527 – 530.

2. Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщеговский О.А. Гироскопическая квазирелятивистская динамика антиферромагнитного вихря на квазирелятивистской доменной границе ортоферрита иттрия //Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ), XIX международная школа–семинар. – Москва. – Июнь. – 2004. – С. 84 – 85.

3. Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B., Borschegovsky O.A. Quasirelativistic, gyroscopic dynamics of antiferromagnetic vortices on quasirelativistic domain wall of an yttrium orthoferrite //Phys. Lett. A. - 2005. – V. 337. P. 235 – 240.

4. Chetkin M.V., Kurbatova Yu.N., Shapaeva T.B., Borschegovsky O.A. Quasirelativism of the antiferromagnetic vortices dynamics in the yttrium orthoferrite //International Symposium on Magnetism (MISM). – Moscow. – June. – 2005. – P. 333.

5. Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщеговский О.А. Динамика антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия //Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ), XX международная школа–семинар. – Москва. – Июнь. – 2006. – С. 57 – 58.

6. Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщеговский О.А. Генерация и гироскопическая квазирелятивистская динамика антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия //ЖЭТФ. – 2006. – Т. 130. - С. 181 – 188.

7. Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б., Борщеговский О.А. Отражение антиферромагнитных вихрей на сверхзвуковой доменной

границе в ортоферрите иттрия //Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 85. - С. 232-235.

8. Борщеговский О.А. Динамика доменных границ и антиферромагнитных вихрей в образцах ортоферрита иттрия //”Ломоносов 2007”. – Москва, МГУ. - 2007.

Цитируемая литература.

[1]. Малоземов А., Слончевский Дж. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами //Мир. – Москва. – 1982.

[2]. Фарзтдинов М.М., Шамсутдинов М.А., Халфина А.А. Структура доменных границ в ортоферритах //ФТТ. – 1979. - Т. 21. - Вып. 5. - С. 1522-1527.

[3]. Звездин А.К., Попков А.Ф. Распространение спиновых волн в движущейся доменной границе //Письма в ЖЭТФ. – 1984. - Т. 39. - Вып. 8. - С. 348-351.

[4]. Екомасов Е.Г., Шабалин М.А. Динамика неелевской доменной границы с “тонкой” структурой в редкоземельных ортоферритах //ФТТ. - 2001. - Т. 43. - Вып. 7. - С.1211 - 1213.

[5]. Звездин А.К. Нелинейная динамика спиновых вихрей в антиферромагнетиках //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 1999. – Т. 6. - Вып. 28. – С. 28 – 34.