

Генерация пар антиферромагнитных вихрей и их динамика на доменной границе ортоферрита иттрия

© М.В. Четкин, Ю.Н. Курбатова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 23 ноября 2000 г.
В окончательной редакции 1 февраля 2001 г.)

Исследована устойчивая генерация пар антиферромагнитных вихрей на доменной границе, движущейся со скоростью 12 km/s, при пересечении ею дефекта в тонкой пластинке ортоферрита иттрия. Скорости движения вдоль доменной границы вихря и антивихря, сопровождаемых уединенными изгибными волнами равны ± 16 km/s соответственно. Полная скорость антиферромагнитных вихрей была близка к предельной скорости доменной границы, равной 20 km/s. Такая высокая скорость может быть результатом действия только весьма большой гироскопической силы. Внешнее постоянное магнитное поле вдоль оси b ортоферрита ± 400 Oe очень слабо влияло на величину этой скорости. Эффективное магнитное поле, нарушающее Лорентц-инвариантность динамики, значительно превосходит указанную величину.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 98-02-16440).

Возможность существования ферромагнитных вихрей следует из уравнений движения магнитного момента Ландау–Лифшица [1,2]. Для экспериментального наблюдения статических магнитных вихрей в доменных границах пленок ферритов-гранатов развит метод анизотропной темнопольной дифракции света [3]. Предсказание действия гироскопических сил на магнитные вихри в доменных границах ферритов-гранатов было сделано в работе [4]. Динамика, парные соударения и солитоноподобное поведение магнитных вихрей в доменных границах пленок ферритов-гранатов, основанные на регистрации уединенных изгибных волн, сопровождающих эти вихри, исследованы в [5,6]. Теоретические предсказания возможности существования антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферритов при низких температурах сделаны в [7,8] а в легкоплоскостных антиферромагнетиках — в [9].

Первые экспериментальные наблюдения уединенных изгибных волн в доменных границах ортоферрита иттрия при комнатной температуре описаны в наших работах [10,11]. Для генерации волн использовалось резкое локальное замедление доменной границы, движущейся первоначально со сверхзвуковой скоростью 12 km/s, с помощью тормозящего магнитного поля одиночного провода, пересекающего доменную границу. Известно, что для доменной границы неелевского типа в конце области постоянства скорости ДГ, равной скорости поперечного звука, имеет место безгистерезисный переход со звуковой на сверхзвуковую скорость и обратно, и этот переход описывается правилом Максвелла [12]. Уединенные изгибные волны, сопровождающие антиферромагнитные вихри, исследованы в [13,14].

1. Результаты экспериментов

В данной статье приведены результаты исследования генерации пар уединенных изгибных волн в доменных границах ортоферрита иттрия, первоначально

движущихся со сверхзвуковой скоростью, и исследована их динамика в присутствии внешнего магнитного поля вдоль оси b кристалла. Результаты подтверждают закон сохранения топологического заряда пары антиферромагнитных вихря-антивихря, сопровождаемых уединенными изгибными волнами, в процессе их генерации. Исследования динамики в присутствии магнитных полей, перпендикулярных оси слабого ферромагнетизма ортоферрита, представленные в статье, важны для понимания природы сил, продвигающих антиферромагнитные вихри. Эксперименты по генерации антиферромагнитных вихрей в тонкой, толщиной 30 μm , пластинке ортоферрита иттрия при комнатной температуре проводились методом двукратной высокоскоростной фотографии, как и в предыдущих работах. Пластинка была вырезана перпендикулярно оптической оси. Нормаль к пластинке составляла 52° с осью c -слабого ферромагнетизма. Магнитное поле двух катушек с внутренним диаметром 1.5 mm, прикладываемых к образцу через тонкие покровные стекла, кроме компоненты по оси c имело примерно такую же по величине компоненту по оси b . Эта компонента важна для нарушения Лорентц-инвариантности динамики доменных границ в ортоферритах и может привести к возникновению ненулевой гироскопической силы, продвигающей антиферромагнитные вихри вдоль доменной границы. Оценки величин топологических зарядов антиферромагнитных вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами, из экспериментальных данных [13,14] и теоретических расчетов [15] согласуются между собой. На рис. 1 представлена двукратная высокоскоростная фотография движущейся снизу вверх доменной границы в пластинке ортоферрита иттрия. Первое положение доменной границы — переход от светлой части к темной — в нижней части фотографии. Второе положение доменной границы — переход от темной части к светлой. Темная полоса представляет собой область, пройденную доменной границей за время между двумя световыми импульсами. В левой части

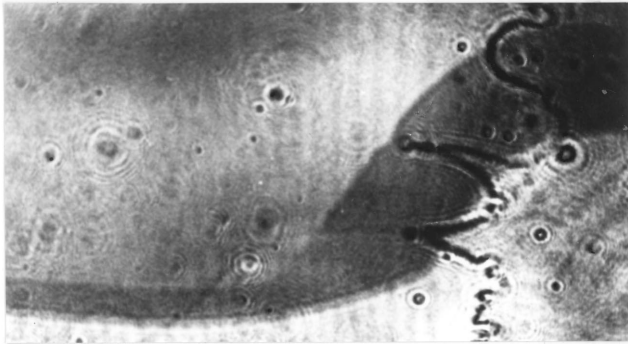


Рис. 1. Двукратная высокоскоростная фотография рождающейся пары уединенных изгибных волн, сопровождающих пару антиферромагнитных вихря и антивихря, во втором верхнем положении движущейся снизу вверх доменной границы в пластинке ортоферрита иттрия. Темная полоса — область, пройденная доменной границей за время между двумя световыми импульсами.

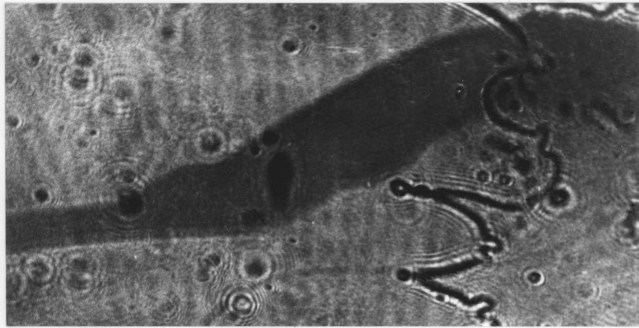


Рис. 2. Двукратная высокоскоростная фотография двух движущихся в противоположных направлениях уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихрь и антивихрь на доменной границе, движущейся со скоростью 12 km/s, в пластинке ортоферрита иттрия.

рисунка доменная граница имеет почти прямолинейную форму и движется со скоростью 4 km/s. В правой части фотографии происходит переход на сверхзвуковую скорость 12 km/s. В первом положении уединенных изгибных волн на доменной границе еще нет. Во втором положении доменной границы на рис. 1 отчетливо видна особенность, состоящая из двух прямолинейных пересекающихся участков, которые, как видно из рис. 2, являются фронтами уединенных изгибных волн и движутся в противоположные стороны. Генерация пары уединенных изгибных волн является очень стабильной. Всякий раз, когда доменная граница пересекает отмеченное стрелкой на рис. 1 положение при скорости движения 12–13 km/s, происходит генерация пары уединенных изгибных волн, как это показано на рис. 1, 2. Уединенные изгибные волны отстают как целое от доменной границы и имеют резкие прямолинейные передние и очень затянутые задние фронты. Из рис. 2 можно определить скорость движения волн вдоль доменной границы. Они движутся в противоположных направлениях с одинаковыми по

абсолютной величине скоростями 16 km/s. Внешнее магнитное поле, продвигающее доменную границу как целое, может только тормозить уединенные волны. Единственной возможной причиной движения уединенных изгибных волн вдоль доменной границы является гироскопическая сила, действующая на антиферромагнитные вихри и антивихри, сопровождаемые этими волнами. Генерация пары уединенных волн, как показано на рис. 1, 2, доказывает справедливость закона сохранения топологического заряда при генерации антиферромагнитных вихрей на сверхзвуковой доменной границе ортоферрита иттрия. С имеющимся в нашем распоряжении световым импульсом длительностью 250 ps мы не наблюдаем локального замедления части доменной границы вблизи дефекта, а видим только рождение пары уединенных волн. Квазистатическое продвижение доменной границы отчетливо показывает наличие дефекта, задерживающего доменную границу в месте генерации пары уединенных изгибных волн. В основе динамики доменных границ в ортоферритах лежит квазирелятивистская Лорентц-инвариантная σ -модель с предельной скоростью, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии [6,16]. При скорости доменной границы 12 km/s полная скорость движения каждой из двух уединенных волн близка к предельной и равна 19.5 ± 0.5 km/s. Такая скорость, по-видимому, может реализовываться под действием большой гироскопической силы, действу-

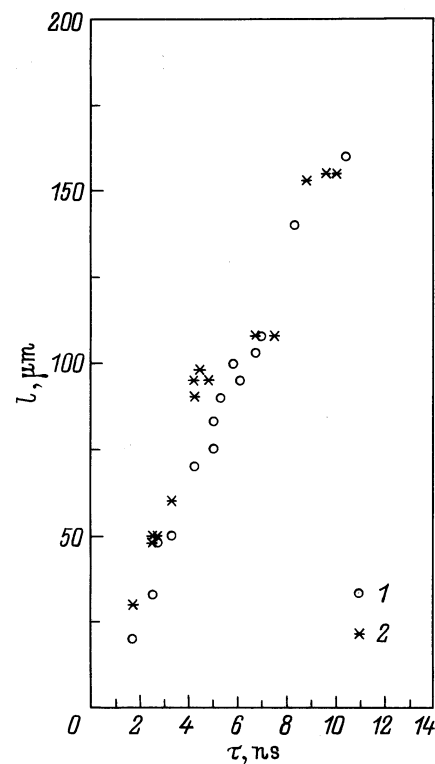


Рис. 3. Временная зависимость расстояний, пройденных антиферромагнитным вихрем и антивихрем в магнитном поле 400 Oe, направленном вдоль (1) и против (2) оси b в пластинке ортоферрита иттрия.

ющей на антиферромагнитные вихри. В магнитном поле вдоль оси b ортоферрита, как это было показано в работах [17,18], может нарушаться Лорентц-инвариантность динамики доменных границ. Согласно этим работам, гироскопическая сила вдоль доменной границы в этом случае пропорциональна магнитному полю, приложенному вдоль оси b ортоферрита. Указанные результаты применимы для скоростей, существенно меньших предельной скорости. В связи с этим представляет интерес исследование динамики уединенных изгибных волн в магнитных полях вдоль оси b кристалла. Зависимость расстояний, проходимых этими двумя волнами вдоль доменной границы в магнитном поле ± 400 Ое, от времени представлена на рис. 3. Скорость вихрей вдоль доменной границы близка к 16 km/s. Отличие скоростей в этих двух случаях не более 5–7%, так что эффективное поле, снимающее Лорентц-инвариантность динамики доменных границ и порождающее гироскопическую силу, значительно больше, чем использованное нами. Для более точного определения величины этого поля необходимо провести аналогичный эксперимент в более сильных магнитных полях вдоль оси b . Если магнитные подрешетки ортоферрита неэквивалентны, может возникнуть гироскопическая сила, пропорциональная не h_b , а полю Дзялошинского [6]. Для генерации пары антиферромагнитный вихрь–антивихрь существенное значение может иметь изменение магнитной анизотропии вблизи дефекта.

2. Обсуждение результатов

В центральной части антиферромагнитного вихря, движущегося под действием гироскопической силы, должна существовать антиферромагнитная фаза G_y [13,14]. Существование такой фазы известно при низких температурах в ортоферрите диспрозия. В исследуемом нами ортоферрите иттрия фазовый переход $G_z F_x \rightarrow G_y$ происходит при комнатной температуре в неустойчивой сверхзвуковой доменной границе при ее замедлении на локальном дефекте либо в тормозящем магнитном поле одиночного проводника. Возникновение двух уединенных волн, как показано на рис. 1, 2, идет одинаково в магнитных полях как вдоль, так и против оси b . Это означает, что знак гироскопической силы в этих двух случаях не изменяется. Импульсное магнитное поле вдоль оси b , создаваемое катушкой, продвигающей доменную границу со скоростью 12 km/s, составляло 120 Ое. Если бы знак гиросилы при изменении направления магнитного поля вдоль оси b изменялся, уединенные волны после их генерации должны были бы двигаться навстречу друг другу и аннигилировать, как это следует из наших более ранних работ [11,13,14], в которых антиферромагнитные вихри генерировались при локальном торможении сверхзвуковой доменной границы с помощью магнитного поля одиночных проводов, пересекающих доменную границу. Полная скорость антиферромагнитных вихрей в доменной границе ортоферрита иттрия, движущейся со

скоростью 12 km/s, близка к предельной скорости, равной 20 km/s для уединенных изгибных волн всех наблюдаемых амплитуд. Теория, описывающая динамику антиферромагнитных вихрей в ортоферритах и справедливая вплоть до предельной скорости их движения c , пока отсутствует. Из приведенных выше экспериментальных результатов следует, что эффективное магнитное поле, нарушающее Лорентц-инвариантность динамики, существенно больше, чем использованное нами постоянное магнитное поле вдоль оси b и чем проекция на ось b импульсного магнитного поля, создаваемого катушкой, продвигающей доменную границу ортоферрита. Об этом свидетельствует весьма слабая зависимость скорости антиферромагнитных вихрей от магнитного поля по этой оси.

Симметрия движущихся по инерции доменных границ ортоферритов в статике рассмотрена в [6,19]. При этом для границ ac -типа в динамике отлична от нуля компонента m_b слабого ферромагнитного момента вдоль оси b (пропорциональна V/c). Аналогичный результат справедлив и для движущихся под действием магнитного поля доменных границ. Это означает, что гироскопическая сила может быть пропорциональна V^2/c^2 . В условиях нашего эксперимента эта величина не мала и равна 0.36. Учет этой силы требует специального анализа и выхода за рамки приближения $V \ll c$, принятого во всех опубликованных к настоящему времени работах [15,17,18]. Анализ структуры движущихся доменных границ выполнен только для однородных доменных границ ac - и ab -типов. Для исследования симметрии доменных границ с антиферромагнитными вихрями необходим учет инвариантов более высоких порядков, чем для однородных границ.

Благодарим А.М. Балбашова за предоставленные монокристаллы, А.Ф. Попкова и С.С. Кротова за обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] R.K. Dodd, J.C. Eilbeck, J.D. Gibbon, H.C. Morris. Solitons and Nonlinear Wave Equations. Acad. Press., N. Y. (1983).
- [2] E.Y. Vedmedenko, H.P. Oepen, A. Ghazdli. Phys. Rev. Lett. **84**, 25, 5884 (2000).
- [3] A. Thiaville, Ben Youssef, Y. Nakatany, J. Miltat. J. Appl. Phys. **69**, 6090 (1991).
- [4] А.В. Никифоров, Э.Б. Сонин. Письма в ЖЭТФ **40**, 4, 325 (1984).
- [5] М.В. Четкин, И.В. Парыгина, Л.Л. Савченко. ЖЭТФ **110**, 6, 1873 (1996).
- [6] V.G. Bar'jakhtar, M.V. Chetkin, B.A. Ivanov, S.N. Gadetskiy. Dynamics of Topological Magnetic Solitons. Experiment and Theory. Vol. 129. Springer tracts in modern physics, Berlin, (1994).
- [7] М.М. Фарзтдинов, М.А. Шамсутдинов, А.А. Халфина. ФТТ **21**, 5, 1522 (1979).
- [8] A.P. Malozemov, J.C. Slonczewski. Magnetic Domain Walls in Babbles Materials. Academic Press, N. Y. (1979).
- [9] S. Komineas, N. Papanicolaou. Nonlinearity **11**, 265 (1998).
- [10] M.V. Chetkin, Yu.N. Kurbatova, A.I. Akhutkina. J. Appl. Phys. **79**, 8, 6132 (1996).

- [11] М.В. Четкин, Ю.Н. Курбатова, В.Н. Филатов. Письма в ЖЭТФ **65**, 10, 760 (1997).
- [12] С.В. Гомонов, А.К. Звездин, М.В. Четкин. ЖЭТФ **94**, 1, 133 (1988).
- [13] М.В. Четкин, Ю.Н. Курбатова, Т.Б. Шапаева. ЖЭТФ **115**, 6, 2160 (1999).
- [14] M.V. Chetkin, Yu.N. Kurbatova. Phys. Lett. **A260**, 108 (1999).
- [15] А.К. Звездин. Краткие сообщения по физике ФИАН **6**, 28 (1999).
- [16] А.К. Звездин. Письма в ЖЭТФ **29**, 10, 605 (1979).
- [17] Ю.В. Мелехов, О.А. Переход. ФТТ **26**, 3, 924 (1984).
- [18] М.М. Фарзтдинов, М.А. Шамсутдинов, Е.Г. Екомасов. ФТТ **30**, 6, 1866 (1988).
- [19] N. Paranicolaou. Phys. Rev. **B55**, 18, 12 290 (1997).