

Отражение антиферромагнитных вихрей на сверхзвуковой доменной границе в ортоферрите иттрия

М. В. Четкин, Ю. Н. Курбатова, Т. Б. Шапаева, О. А. Борщеговский

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 декабря 2006 г.

После переработки 15 января 2007 г.

Экспериментально обнаружено отражение уединенных изгибных волн на сверхзвуковой доменной границе ортоферрита иттрия от части доменной границы, движущейся со скоростью поперечного звука. Результат подтверждает изменение знака топологического заряда антиферромагнитного вихря, сопровождаемого уединенной изгибной волной при отражении, и доказывает их прямую связь.

PACS: 75.60.Ch

Спиновые вихри обязательно присутствуют в ферромагнетиках и ферримагнетиках ограниченных микрообъемов. Интерес к их исследованиям связан, в частности, с созданием сверхплотной магнитной памяти на так называемых магнитных точках пленок ферромагнитных металлов [1]. Прямое наблюдение спиновых вихрей в этом случае производится методом керровской микроскопии с высоким пространственным и временным разрешением [2]. Исследование плоскостных компонент намагниченности спиновых вихрей может производиться с помощью экваториального эффекта Керра. Формулы для изменений интенсивности света, отраженного в этом случае для гироэлектрической и гиромангнитной сред, получены в [3]. Керровская микроскопия использовалась ранее и для исследований пространственного распределения магнитных полей в микронных зазорах записывающих головок [4].

В доменных границах ферромагнитных пленок ферритов-гранатов существуют спиновые вихри – вертикальные блоховские линии [5, 6], движущиеся под действием гироскопических сил [5, 7, 8]. Динамика вертикальных блоховских линий (спиновых вихрей), в доменных границах эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов исследуется с помощью наблюдений уединенных изгибных волн, сопровождающих эти вихри на движущихся доменных границах [8–10]. После встречных столкновений в доменных границах ферритов-гранатов вертикальные блоховские линии продолжают двигаться с прежними скоростями в прежних направлениях, как и до столкновения. То есть вертикальные блоховские линии в пленках ферритов-гранатов обладают солитоноподобными свойствами. При более низких скоростях доменных границ наблюдается их частичная аннигиляция, а затем и полная аннигиляция [10, 11]. Подобные

свойства наблюдались и для джозефсоновских вихрей [12].

В предшествующих работах было показано, что на доменных границах ортоферрита иттрия могут генерироваться и двигаться с очень большими скоростями, вплоть до спин-волновой скорости, уединенные изгибные волны с резкими передними и затянутыми задними фронтами, отстающие как целое от самой доменной границы [13, 14]. Экспериментально обнаружена необычная нелинейная зависимость скорости уединенных изгибных волн вдоль доменной границы, u , от скорости самой доменной границы, v , с максимумом, положение которого зависит от амплитуды уединенной волны. Полная скорость уединенной волны w нелинейно возрастает с ростом скорости доменной границы, а затем насыщается на уровне 20 км/с, равном скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Экспериментально обнаружена квазирелятивистская динамика уединенной изгибной волны на квазирелятивистской доменной границе [13, 14]. Теория динамики наблюдаемых экспериментально уединенных изгибных волн, движущихся на доменных границах ортоферритов, пока не создана. Существующая физическая картина наблюдаемой динамики основана на аналогии с динамикой вертикальных блоховских линий – спиновых вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами, на доменных границах эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов. Мы полагаем, что наблюдаемые экспериментально уединенные изгибные волны на доменных границах ортоферрита иттрия сопровождаются антиферромагнитными вихрями. существование таких вихрей предложено Фарзтдиновым с сотрудниками [15] и Малоземовым со Слончевским [5]. Однако теория динамики таких вихрей, наблюдаемой на эксперименте, пока еще не создана. В связи с этим

представляет интерес исследовать свойства уединенных изгибных волн на доменных границах ортоферрита с тем, чтобы подтвердить их связь с существованием антиферромагнитных вихрей в этих слабых ферромагнетиках.

В доменных границах ортоферритов, где вращение вектора антиферромагнетизма \mathbf{l} и вектора слабого ферромагнетизма \mathbf{m} происходит в плоскости (ac) , гироскопическая сила равна нулю. Отличная от нуля гироскопическая сила может существовать в магнитных полях вдоль оси b [16, 17]. В этом случае $F = \pi M_0 v \nu H_b / \gamma H_E$ [17]. Здесь M_0 – магнитный момент подрешетки, H_b – магнитное поле вдоль оси b , H_E – обменное поле, γ – гиромагнитное отношение, v – скорость доменной границы, ν – топологический заряд вихря. Выход векторов \mathbf{l} и \mathbf{m} ортоферрита из (ac) происходит и в движущихся доменных границах ортоферрита [10, 18]. Компонента m_b в этом случае имеет следующий вид:

$$m_b = \frac{2v / \Delta_1(v)}{\gamma \delta M_0 \cos n[\xi / \Delta_1(v)]},$$

где $\xi = x - vt$, $\Delta_1(v) = \Delta_0(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Компонента m_b сравнима с m_c и эффективное поле сравнимо с полем Дзялошинского. При стационарном движении антиферромагнитного вихря гироскопическая сила должна уравниваться диссипативной силой, действующей на передний фронт L уединенной изгибной волны [19] $F_{\text{diss}} = m_{DW} \tau^{-1} u L$, $m_{DW} = M_0 / \gamma^2 \Delta H_E$, $\tau^{-1} = 2\alpha \gamma H_E$, $\alpha = 10^{-5}$ для YFeO_3 . Из этого условия можно определить амплитуду уединенной изгибной волны, сопровождающей антиферромагнитный вихрь с определенным топологическим зарядом. Наблюдаемые амплитуды уединенных изгибных волн в YFeO_3 в нашем эксперименте от 2 до 10 мкм, и топологические заряды антиферромагнитных вихрей изменяются от нескольких единиц до 2–3 десятков π .

В большой серии работ Никитенко, Дедуха и др. [20, 21] были исследованы субдомены в аномально широких доменных границах (порядка 1 мкм). Эти субдомены были отделены друг от друга доменными стенками, и вихри в этом случае могли возникать в местах пересечения неелевских и блоховских участков доменных границ субдоменов. Такая возможность ранее не обсуждалась.

Генерация антиферромагнитных вихрей и сопровождающих их уединенных изгибных волн происходит на доменной границе ортоферрита иттрия, движущейся со сверхзвуковой скоростью, при резком локальном торможении малой ее части [13, 14]. При этом в условиях эксперимента значительная часть доменной границы может продолжать еще двигаться

со скоростью поперечного звука. После генерации двух антиферромагнитных вихрей, движущихся в противоположные стороны, мы уменьшали скорость доменной границы с 12 км/с до 7–9 км/с с помощью импульса магнитного поля дополнительных катушек, как это описано в [14]. В данной работе экспериментально обнаружено, что при переходе антиферромагнитного вихря с части доменной границы, движущейся со сверхзвуковой скоростью, на часть границы, продолжающей еще двигаться со скоростью поперечного звука, происходит отражение антиферромагнитного вихря со сменой знака его топологического заряда. Вихрь после отражения меняет направление движения на доменной границе без изменения абсолютной величины его скорости. Регистрация динамики уединенных изгибных волн проводилась методом двукратной высокоскоростной фотографии [10, 13, 14] с использованием двух импульсов света длительностью 250 пс, задержанных друг относительно друга на 10–15 нс. На рис. 1, 2 представлены



Рис. 1. Двукратная высокоскоростная фотография динамической доменной границы с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами с резкими передними и затянутыми задними фронтами. Задержка между двумя световыми импульсами 10 нс. Доменная граница движется сверху вниз. На первом положении видны две уединенные изгибные волны, движущиеся в разные стороны. На втором положении видна отраженная уединенная изгибная волна, движущаяся в противоположном направлении падающей волны

двукратные высокоскоростные фотографии доменной границы с движущейся вдоль нее уединенной изгибной волной на пластинке ортоферрита иттрия толщиной 40 мкм, перпендикулярной оптической оси. Доменная граница движется сверху вниз и регистрируется как переход от серой части фотографии к чер-

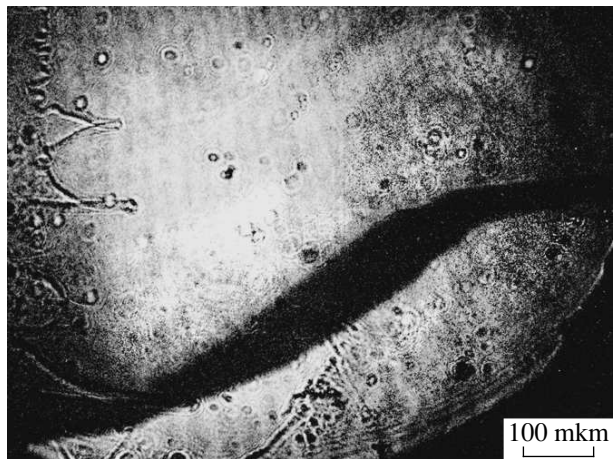


Рис.2. Двукратная высокоскоростная фотография динамической доменной границы с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами в прямом (слева направо) и обратном (справа налево) направлениях

ной. Вдоль доменной границы слева – направо движется уединенная изгибная волна с амплитудой около 10 мкм и резким передним фронтом. Ее скорость вдоль доменной границы $u = 18$ км/с, скорость самой доменной границы $v = 9$ км/с. Через интервал времени 10 нс положение доменной границы представлено переходом от черной части фотографии к серой, более светлой ее части. На верхней части фотографии рис.1 отчетливо видны уединенные изгибные волны с амплитудой 10 мкм, на нижней части рис.1 отчетливо видна уединенная изгибная волна с той же самой амплитудой, что и на первом положении, но движущаяся в противоположном направлении. Передние фронты всех уединенных изгибных волн одинаковые. На заднем фронте отраженной изгибной волны (рис.2) заметна модуляция. Уединенные изгибные волны рис.1, 2 не могут двигаться под действием магнитного поля, продвигающего доменную границу. Это магнитное поле только тормозит уединенные изгибные волны. Полученные результаты свидетельствуют об отражении уединенной изгибной волны от части доменной границы, движущейся со скоростью поперечного звука, со сменой знака топологического заряда антиферромагнитного вихря, сопровождаемого уединенной волной. Полученный нами результат аналогичен превращению кинк – антикинк на конце джозефсоновского контакта [22] и подтверждает вихревую природу наблюдаемого нами объекта, сопровождаемого уединенной изгибной волной на доменной границе ортоферрита иттрия. На аналогию антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия с джозефсоновскими вихрями было

обращено внимание в [14, 23]. Результаты, представленные на рис.1, 2, получены при скоростях доменной границы 7.5–9 км/с. Вихревую природу обнаруженного и исследованного нами явления подтверждают и результаты встречных столкновений уединенных изгибных волн. На рис.3 представлены результаты

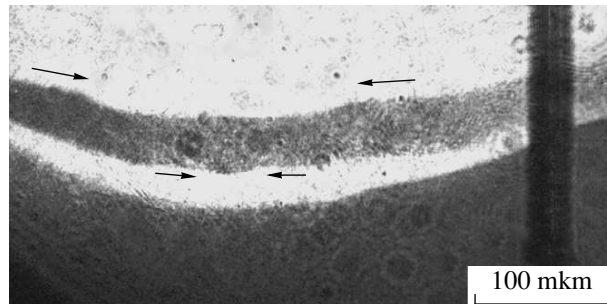


Рис.3. Трехкратная высокоскоростная фотография динамической доменной границы с движущимися вдоль нее сталкивающимися и аннигилирующими уединенными изгибными волнами, сопровождающими антиферромагнитные вихри в доменной границе ортоферрита иттрия

встречных столкновений уединенных изгибных волн с одинаковыми амплитудами на доменной границе, движущейся со скоростью 6 км/с. После столкновения, как это видно из трехкратной высокоскоростной фотографии, они полностью аннигилируют.

В целом, полученные экспериментальные результаты подтверждают существование антиферромагнитного вихря, сопровождаемого уединенной изгибной волной, на доменной границе ортоферрита иттрия. Так же, как и результаты встречных столкновений антиферромагнитных вихрей с одинаковыми и различными по абсолютной величине топологическими зарядами.

Работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 04-02-16572.

1. D. Sheka, J. Zagorodny, J. Cafuto et al., Phys. Rev. B **71**, 134420 (2005).
2. M. Buess, R. Hollinger, T. Haug et al., Phys. Rev. Lett. **93**(7), 077207 (2004).
3. Г. С. Кринчик, М. В. Четкин, УФН **98**, 3 (1969).
4. Г. С. Кринчик, М. В. Четкин, В. П. Золотарев и др., ПТЭ **6**, 182 (1968).
5. А. Малоземов, Дж. Слончевский, *Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами*, М.: Мир, 1982, стр. 384.

6. J. Miltat, G. Albuquerque, and A. Thiaville, *Spin Dynamics in Confined Structures I*, Eds. B. Hillebrands and K. Ounadjela, Berlin; Springer, 2002.
7. А. В. Никифоров, Е. Б. Сонин, Письма в ЖЭТФ **40**, 325 (1984).
8. М. В. Четкин, И. В. Парыгина, В. Б. Смирнов, Письма в ЖЭТФ **49**, 174 (1989).
9. A. Thiaville, J. Miltat, and J. B. Yusset, European Phys. Journ. B **23**(1), 37 (2001).
10. V. G. Bar'jakhtar, M. V. Chetkin, B. A. Ivanov, and S. N. Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons*, Springer tracts in modern physics, Berlin, vol. **129**, 1994.
11. M. V. Chetkin, I. V. Parygina, V. B. Smirnov et al., Phys. Lett. A **140**, 428 (1989).
12. K. Nakajima, H. Mizusawa, Y. Sawada et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 1667 (1990).
13. M. V. Chetkin and Yu. N. Kurbatova, IEEE Trans. Magn. **34**, 1075 (1998).
14. М. В. Четкин, Ю. Н. Курбатова, Т. Б. Шапаева, О. А. Борщеговский, ЖЭТФ **130**, 181 (2006).
15. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, А. А. Халфина, ФТТ **21**, 1522 (1979).
16. А. Ф. Андреев, В. И. Марченко, УФН **130**, 39 (1980).
17. Ю. В. Мелихов, О. А. Переход, ФТТ **26**, 924 (1984).
18. N. Papanicolaou, Phys. Rev. B **55**, 12290 (1997).
19. M. V. Chetkin and Yu. N. Kurbatova, Phys. Lett. A **260**, 108 (1990).
20. В. С. Горнаков, Л. М. Дедух, В. И. Никитенко и др., ЖЭТФ **63**, 1225 (1986)
21. Л. М. Дедух и др., УФН **145**, 158 (1985).
22. А. Бароне, Дж. Патерно, *Эффект Джозефсона*, М.: Мир, 1984.
23. А. К. Звездин, Краткие сообщения по физике, ФИАН **6**, 28 (1999).