

Гироскопическая квазирелятивистская динамика антиферромагнитного вихря на доменной границе ортоферрита иттрия

М. В. Четкин¹⁾, Ю. Н. Курбатова, Т. Б. Шапаева, О. А. Борщеговский

Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 ноября 2003 г.

После переработки 25 марта 2004 г.

Показано, что квазирелятивистская динамика антиферромагнитных вихрей на квазирелятивистской доменной границе ортоферрита иттрия вызвана необычно большой гироскопической силой.

PACS: 75.60.Ch

Исследование свойств спиновых вихрей в магнитоупорядоченных веществах представляет несомненный интерес для понимания механизмов нелинейной динамики, намагничивания и переманчивания.

В наших предшествующих работах были обнаружены и исследованы движущиеся антиферромагнитные вихри на динамической доменной границе ортоферрита иттрия [1–3]. Эти вихри наблюдались с помощью сопровождающих их уединенных изгибных волн, регистрируемых с использованием эффекта Фарадея в пластинках, вырезанных перпендикулярно оптической оси. Динамика антиферромагнитных вихрей исследовалась с помощью методики двукратной цифровой высокоскоростной фотографии в реальном масштабе времени.

Теория гироскопической динамики спиновых вихрей в доменных границах ферромагнетиков была развита в работах Сонина с соавторами [4, 5]. В этих работах было предсказано существование изгибных волн на доменных границах вблизи вертикальных блоховских линий. Динамика, результаты парных соударений и солитоноподобное поведение спиновых вихрей на доменных границах эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов были исследованы экспериментально в работах [6, 7] с использованием уединенных изгибных волн, сопровождающих эти вихри. Теоретическая трактовка этих экспериментальных результатов проведена на основе численных решений уравнений Слончевского и Ландау–Лифшица в [8, 9]. Колебания субдоменных границ в широких доменных границах пластинок феррита–граната иттрия с кубической анизотропией экспериментально исследованы в [10, 11]. Авторы этих работ считают, что исследованные ими субдо-

менные границы являются блоховскими линиями в доменной границе шириной порядка нескольких микрон, разделяющей два соседних домена.

Возможность существования антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферритов была предсказана теоретически в работах [12, 13]. Однако до наших работ они экспериментально обнаружены не были. Нами показано, что динамика антиферромагнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия является квазирелятивистской с предельной скоростью, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии и равной 20 км/с, так же как и динамика самой доменной границы во внешнем магнитном поле. Таким образом, антиферромагнитный вихрь является квазирелятивистским на квазирелятивистской доменной границе ортоферрита иттрия. В данной работе представлены результаты экспериментов по определению амплитуд уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри, в зависимости от их скорости движения вдоль доменной границы. Амплитуды уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри, оказались пропорциональными скорости движения этих вихрей вдоль доменной границы. Такой результат известен для пленок ферритов-гранатов, где, однако, скорости спиновых вихрей не превышают нескольких десятков метров в секунду. Полученный результат в ортоферрите иттрия подтверждает гироскопическую природу динамики антиферромагнитных вихрей в доменных границах этих слабых ферромагнетиков с взаимодействием Дзялошинского.

Двукратная высокоскоростная фотография движущейся доменной границы с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами представлена на рис.1. Доменная граница движется сверху вниз.

¹⁾e-mail: chetkin@magn145.phys.msu.su

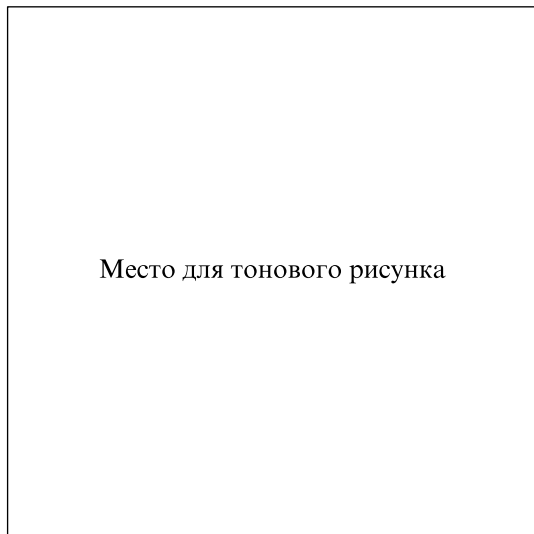


Рис.1. Двукратная высокоскоростная цифровая фотография динамической доменной границы с движущимися вдоль нее уединенными изгибными волнами, сопровождаемыми антиферромагнитными вихрями, в пластинке ортоферрита иттрия, вырезанной перпендикулярно оптической оси

Первое ее положение – переход от светлого к темному, второе – переход от темного к светлому. Время задержки между двумя световыми импульсами длительностью 250 пс равно 6 нс.

Двукратные высокоскоростные цифровые фотографии уединенных изгибных волн, подобные представленным на рис.1, позволяют определить скорость движения самой доменной границы v , скорость движения антиферромагнитного вихря вдоль доменной границы u и полную скорость вихря w . Экспериментальная зависимость $u(v)$ представлена на рис.2. Она сильно нелинейна, с ростом v достигает максимума $u = 16$ км/с при $v = 12$ км/с, а затем скорость движения антиферромагнитного вихря вдоль доменной границы уменьшается и асимптотически стремится к нулю при $v = 20$ км/с. В максимуме и после него для зависимости $u(v)$ справедливо соотношение $w^2 + v^2 = c^2$.

Экспериментальная зависимость полной скорости движения антиферромагнитного вихря от скорости движения доменной границы $w(v)$ представлена на рис.3, она также сильно нелинейна. Полная скорость движения вихря с ростом v нелинейно возрастает и при $v = 12$ км/с насыщается на уровне 20 км/с, равном скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. На растущем участке зависимости $w(v)$ имеет место равенство $w^2 = u^2 + v^2$. Таким образом, динамика антиферромагнитных вихрей

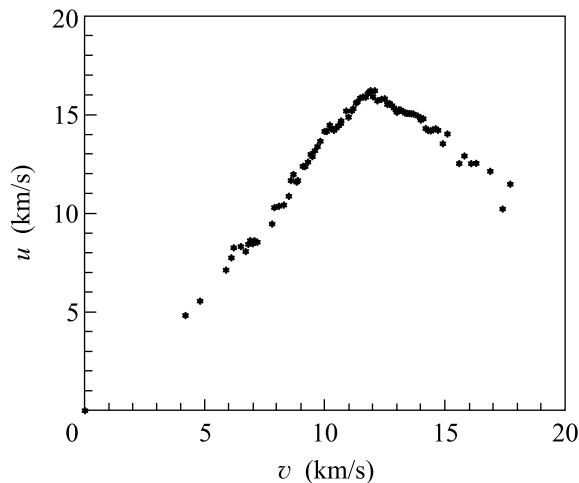


Рис.2. Зависимость скорости движения антиферромагнитного вихря вдоль доменной границы u от скорости ее движения v в пластинке ортоферрита иттрия толщиной 40 мкм, вырезанной перпендикулярно оптической оси

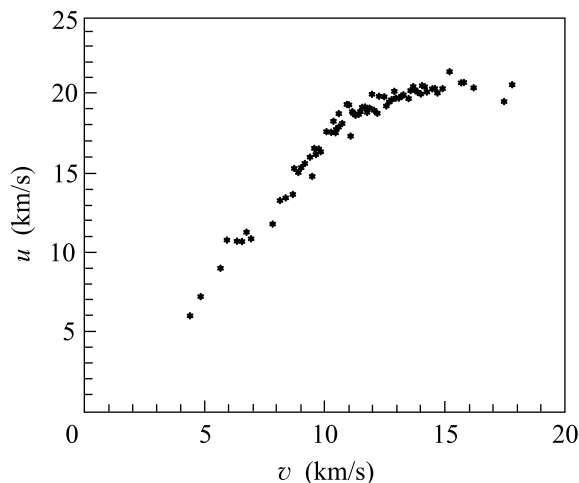


Рис.3. Зависимость полной скорости движения антиферромагнитного вихря w от скорости движения доменной границы v

на доменных границах ортоферрита иттрия является квазирелятивистской с предельной скоростью движения 20 км/с, равной скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Таким образом, исследованные антиферромагнитные вихри являются квазирелятивистскими на квазирелятивистской доменной границе.

Зависимость амплитуды уединенной изгибной волны a , сопровождающей антиферромагнитный вихрь, от скорости движения доменной границы, представлена на рис.4. Она, как и зависимость $u(v)$, представленная на рис.2, сильно нелинейна.

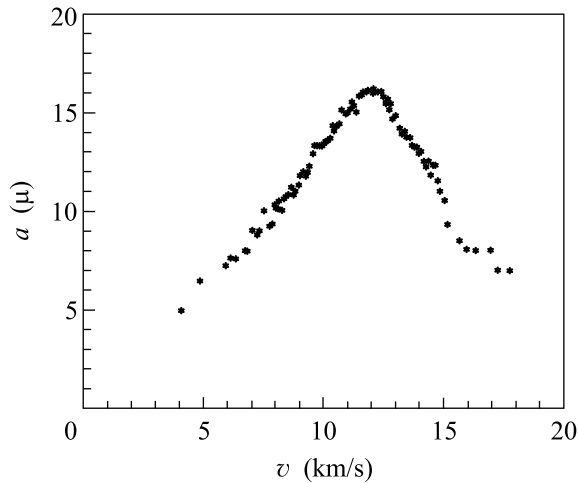


Рис.4. Зависимость амплитуд уединенных изгибных волн a , сопровождающих антиферромагнитные вихри на доменной границе ортоферрита иттрия, от скорости движения доменной границы v

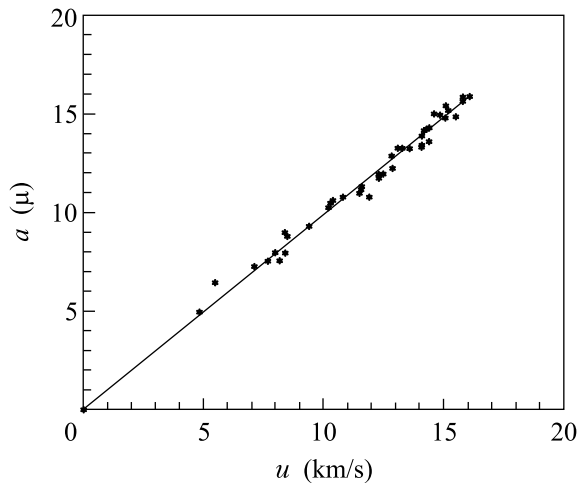


Рис.5. Зависимость амплитуды уединенной изгибной волны a , сопровождающей антиферромагнитный вихрь на доменной границе ортоферрита иттрия, от скорости его движения вдоль доменной границы u

Зависимости $a(v)$ и $u(v)$ при росте u до максимума практически подобны. Следовательно, связь a с u линейна, как видно из рис.5, и эта линейная зависимость экстраполируется практически в нуль. После максимума на зависимости $u(v)$ ситуация качественно аналогична описанной. Только точность определения амплитуд уединенных изгибных волн, сопровождающих антиферромагнитные вихри, здесь несколько ниже, чем на растущем участке. По-существу, представленные экспериментальные результаты, по нашему мнению, подтверждают гироскопическую природу динамики антиферромаг-

нитного вихря на движущейся доменной границе ортоферрита иттрия.

Теория квазирелятивистской динамики доменной границы во внешнем магнитном поле построена в работах [14,15]. Теория нелинейной квазирелятивистской динамики антиферромагнитных вихрей пока не построена. Для ее построения важен эксперимент, подтверждающий гироскопическую природу динамики антиферромагнитных вихрей на движущейся доменной границе ортоферрита иттрия, результаты которого представлены в этой работе.

Существующая теория гироскопической силы в ортоферритах, линейная по скорости движения доменной границы v , основана на результатах работ [16–18]. В лорентц-инвариантных системах эта сила равна нулю. В магнитном поле H_b , направленном вдоль оси b ортоферрита, она пропорциональна магнитному моменту m_b вдоль этой оси. В условиях нашего эксперимента эта сила очень мала и не объясняет результаты эксперимента [19]. Помимо выхода вектора l из плоскости ac под действием поля H_b , существует еще значительно больший выход векторов l и m из плоскости ac в движущейся доменной границе. Этот результат получен Барьяхтаром и Ивановым [20], а также Папаниколау [21]. По порядку величины m_b в этом случае сравнима с величиной слабого ферромагнитного момента из-за взаимодействия Дзялошинского–Мория. Величина m_b в движущейся доменной границе подтверждена и численным решением уравнения Ландау–Лифшица, проведенным Н. А. Усовым. Однако вклад этого динамического скоса подрешеток в гироскопическую силу пока не получен теоретически.

Полученные нами экспериментальные результаты по нелинейной гироскопической квазирелятивистской динамике антиферромагнитных вихрей в ортоферрите иттрия резко отличаются от того, что известно о гироскопической динамике блоховских линий в гранатах, где скорость движения этих линий пропорциональна скорости самой доменной границы.

Таким образом, квазирелятивистская динамика антиферромагнитных вихрей на квазирелятивистской доменной границе ортоферрита иттрия происходит под действием гироскопической силы, не нашедшей пока теоретической трактовки. Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований # 01-02-17120 и # 04-02-16572.

1. М. В. Четкин, Ю. Н. Курбатова, Т. Б. Шапаева, Письма в ЖЭТФ **73**, 34 (2001).
2. M. V. Chetkin and Yu. N. Kurbatova, Phys. Lett. **A260**, 108 (1999).

3. M. V. Chetkin, Yu. N. Kurbatova, and T. B. Shapaeva, *JMMM* **258–259**, 15 (2003).
4. А. В. Никифоров, Е. Б. Сонин, *Письма в ЖЭТФ* **40**, 325 (1984).
5. А. В. Никифоров, Е. Б. Сонин, *ЖЭТФ* **85**, 642 (1983).
6. М. В. Четкин, И. В. Парыгина, В. Б. Смирнов, *Письма в ЖЭТФ* **49**, 174 (1989).
7. М. В. Четкин, И. В. Парыгина, В. Б. Смирнов, *Письма в ЖЭТФ* **49**, 204 (1989).
8. М. В. Четкин, И. В. Парыгина, В. Г. Роман, Л. Л. Савченко, *ЖЭТФ* **105**, 176 (1994).
9. M. V. Chetkin, L. L. Savchenko, and V. V. Bondarenko, *JMMM* **183**, 313 (1998).
10. В. И. Никитенко, Л. М. Дедух, В. С. Горнаков, Ю. И. Кабанов, *Письма в ЖЭТФ* **32**, 152 (1980).
11. В. С. Горнаков, Л. М. Дедух, В. И. Никитенко, *ЖЭТФ* **94**, 245 (1988).
12. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, А. А. Халфина, *ФТТ* **21**, 1522 (1979).
13. A. P. Malozemov and J. C. Slonczewski, *Magnetic Domain Walls in Bubbles Materials*, Academic Press, NY, 1979.
14. А. К. Звездин, *Письма в ЖЭТФ* **29**, 605 (1979).
15. В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, М. В. Четкин, *УФН* **146**, 417 (1985).
16. А. Ф. Андреев, В. И. Марченко, *УФН* **130**, 39 (1980).
17. Ю. В. Мелехов, О. А. Переход, *ФТТ* **26**, 924 (1984).
18. А. К. Звездин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 6, 1999.
19. М. В. Четкин, Ю. Н. Курбатова, *ФТТ* **43**, 1503 (2001).
20. V. G. Bar'jakhtar, M. V. Chetkin, B. A. Ivanov, and S. N. Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons, Experiment and Theory*, Berlin, Springer tracts in modern physics, vol. **129**, 1994.
21. N. Papanicolaou, *Phys. Rev.* **B55**, 12290 (1997).