

## УЕДИНЕННЫЕ ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ НА СВЕРХЗВУКОВОЙ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕ ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ

*М.В.Четкин, Ю.Н.Курбатова, В.Н.Филатов*

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

*119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 апреля 1997 г.

На сверхзвуковой доменной границе ортоферрита иттрия обнаружены и исследованы уединенные изгибные волны с резкими передними и затянутыми задними фронтами, напоминающие волны в пленках ферритов-гранатов, сопровождающие движущиеся вертикальные блоховские линии. Полная скорость уединенных изгибных волн в ортоферритах иттрия для всех наблюдаемых амплитуд равна предельной скорости доменных границ. Лобовые столкновения двух уединенных волн одинаковых амплитуд приводят к их аннигиляции. Они имеют топологические заряды, движутся и формируют динамические профили под действием гироскопических сил.

PACS: 75.60.Ch

Динамика топологических магнитных солитонов — вертикальных блоховских линий (ВБЛ) и их соударения к настоящему времени достаточно подробно исследованы и экспериментально и теоретически в пленках ферритов-гранатов. Эти исследования основаны на регистрации уединенных изгибных волн, возникающих под действием гироскопических сил, сопровождающих движущиеся ВБЛ. Указанная регистрация использует эффект Фарадея и двух- или трехкратную высокоскоростную фотографию в реальном масштабе времени [1]. Статические ВБЛ регистрируются и методом темнополовой анизотропной дифракции света [2].

Существование ВБЛ в ферритах-гранатах связано с возможностью разворота магнитных моментов не только в плоскости доменной границы, но и в перпендикулярной ей плоскости. Векторы антиферромагнетизма  $l$  ортоферритов, как правило, могут вращаться только в одной из плоскостей ( $ac$ ) или ( $ab$ ). В первом случае в этой же плоскости вращается вектор слабого ферромагнетизма [3]. До последнего времени ВБЛ в ортоферритах не наблюдались ни в статике, ни в динамике. Уединенные изгибные волны — кинки большой амплитуды на движущихся со звуковой скоростью доменных границах (ДГ) ортоферрита иттрия наблюдались в [4]. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования движения и соударений малоамплитудных уединенных волн на ДГ ортоферрита иттрия, которые могут быть интерпретированы как наблюдение динамических ВБЛ на движущихся со сверхзвуковыми скоростями ДГ ортоферрита. Наблюдение малоамплитудных кинков на сверхзвуковых ДГ ортоферрита иттрия опубликовано в [5]. Времена, в течение которых они наблюдались, составляли всего 4 нс. Их появление было достаточно случайным. Не были исследованы времена их жизни и соударения. В данной работе методом двухкратной высокоскоростной фотографии с использованием импульсов света длительностью 0,25 нс изучалась динамика доменных границ в тонких — в несколько десятков микрон толщиной — пластинках ортоферрита иттрия, вырезанных перпендикулярно оптической

оси. Световой импульс получен с помощью азотного лазера и усилителя с поперечным разрядом, накачивающим лазер на красителе. Такая установка использовалась нами ранее для исследований динамики ДГ в ортоферритах, но в данной работе в ней был сделан ряд усовершенствований. В частности, в разряднике лазера с поперечным разрядом использовалась пластинка из ситалла с маленьким отверстием, что обеспечивало стабильность времени срабатывания лазера и долгосрочную его работу. Единственная ДГ неелевского типа, перпендикулярная поверхности образца, устанавливалась с помощью градиентного магнитного поля, перпендикулярного поверхности образца с  $\text{grad } H = 800 \text{ Э/см}$ . Эта граница была перпендикулярна оси  $a$  пластинки. Магнитные моменты в доменах по разные стороны границы находились в плоскости, перпендикулярной оси  $a$ , и составляли с плоскостью образца углы  $\pm 40^\circ$ . ДГ, как обычно [6], приводилась в движение импульсным полем двух катушек с внутренним диаметром 1,5 мм, наклеенных на поверхности образца. Зависимость скорости ДГ в такой пластинке для различных ориентаций их в плоскости пластинки представлена на рис. 1. Для чисто неелевской ДГ область постоянства скорости ДГ

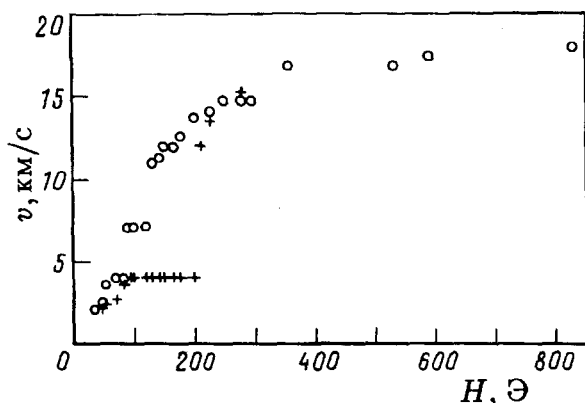


Рис. 1. Зависимость скорости доменных границ Нееля (+) и Блоха (o) от магнитного поля в пластинке  $\text{YFeO}_3$  толщиной 30 мкм, вырезанной перпендикулярно оптической оси

при ее равенстве скорости поперечного звука составляет 100 Э. Это весьма широкая область, и ее протяженность может быть связана со сравнительно небольшой в данном случае (30 мкм) толщиной исследуемого образца. Область постоянства скорости постепенно уменьшается при повороте ДГ в плоскости образца и для блоховской ДГ, параллельной оси  $a$ , практически исчезает в соответствии с более ранними экспериментальными данными и предсказанием теории [6]. При этом становится заметной область постоянства скорости ДГ при ее равенстве скорости поперечного звука. На тот же образец перпендикулярно статическому положению неелевской ДГ, имеющей максимальную область постоянства скоростей, наклеивались один или два одиночных провода диаметром 20 мкм, по которым пропускался ток, создающий локальные тормозящие магнитные поля в течение короткого, в несколько десятков наносекунд, интервала времени. Этот ток подавался тогда, когда вся ДГ уже приобретала определенную скорость за счет импульсного тока в продвигающих ДГ катушках. Теория ширины области постоянства скорости неелевской ДГ ортоферрита при ее равенстве скорости поперечного звука рассмотрена в [7], где нет учета конечной толщины образца. А эта последняя влияет на ширину

области постоянства скорости ДГ вблизи скорости звука. Переход неелевской ДГ со скорости поперечного звука на сверхзвуковую скорость в нашем эксперименте, как видно из рис. 1, происходил очень резко. Затем, после подачи замедляющего импульса на одиночные проводники, на почти прямолинейных участках ДГ, движущихся со скоростью 12 км/с снизу вверх, отчетливо наблюдались уединенные изгибные волны с резкими передними и затянутыми задними фронтами, целиком отстающие от ДГ и движущиеся справа налево вдоль нее. Темная полоса на рис. 2 представляет собой область, проходимую

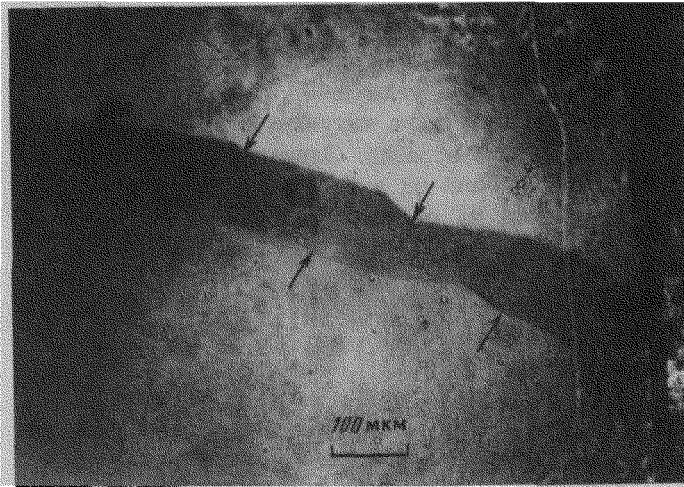


Рис. 2. Двухкратная высокоскоростная фотография уединенных изгибных волн на движущейся доменной границе в ортоферрите иттрия. Доменная граница движется снизу вверх, уединенные волны — справа налево. Временная задержка  $\Delta t = 9$  нс. Положения уединенных волн показаны стрелками

ДГ за время между двумя световыми импульсами. Скорости движения изгибных волн двух разных амплитуд вдоль ДГ, определенные из двухкратных высокоскоростных фотографий, были равны 16 км/с. Эти уединенные изгибные волны не меняли своего профиля в течение всего доступного в эксперименте времени наблюдения вплоть до 50–60 нс. Наблюдались уединенные изгибные волны, движущиеся и в противоположных направлениях, возникающие под действием импульсного тока в каждом из двух одиночных проводников. Интервал скоростей всей ДГ, при котором удавалось наблюдать эти уединенные изгибные волны, был очень узок, 200 м/с. При более низких и более высоких скоростях ДГ уединенные изгибные волны, движущиеся вдоль ДГ, не возникали и не наблюдались. На рис. 3 представлена двухкратная высокоскоростная фотография движущейся ДГ. Временная задержка между двумя световыми импульсами равна 9 нс. Вдоль ДГ бежит уединенная изгибная волна в направлении слева направо. На рис. 2 почти не виден одиночный проводник, он был приклеен близко к катушкам. На рис. 3 видны два проводника, пересекающие ДГ, и каждый из них мог создавать пару уединенных изгибных волн, движущихся в противоположные стороны. Скорости их движения вдоль ДГ по абсолютной величине в наших экспериментах не отличались. Отсюда может быть сделан вывод о том, что движение малоамплитудных кинков происходит под действием гироскопической силы, пропорциональной скорости ДГ. Эта скорость в ортоферритах очень велика и обеспечивает движение кинков всех наблюдаемых амплитуд с полной скоростью, равной 20 км/с. В случае ферритов-гранатов скорости ДГ существенно меньше, поэтому скорости волн, сопровождающих ВБЛ, были связаны с их топологическими зарядами и,

как следствие, с их амплитудами. В этом причина отличия ситуации в



Рис. 3. То же что и на рис. 2, для уединенной волны, движущейся слева направо

ферритах-гранатах и в ортоферрите иттрия. Предельная скорость ДГ в ортоферритах составляет 20 км/с и равна скорости спиновых волн на линейном участке их закона дисперсии. Все наблюдаемые нами экспериментально уединенные изгибные волны различных амплитуд в ортоферрите иттрия имели скорости движения вдоль ДГ 16 км/с. Между скоростями уединенных волн  $U$ , скоростью ДГ  $V$  и предельной скоростью  $c$  выполнялось соотношение

$$U^2 + V^2 = c^2. \quad (1)$$

Такое соотношение для малоамплитудных возмущений на одномерной границе ортоферрита было получено теоретически из линеаризованного уравнения движения [8]. Результат (1) получен экспериментально и относится к вполне заметным амплитудам нелинейных уединенных волн. Его смысл состоит в том, что передний фронт уединенной волны представляет собой часть ДГ, скорость которой не может превосходить предельную, равную  $c$ . Таким образом, существует сходство динамических профилей уединенных волн прогиба на сверхзвуковых ДГ ортоферрита иттрия с аналогичными профилями в пленках ферритов-гранатов, где они, несомненно, сопровождают вертикальные блоховские линии. Из этого сходства можно заключить, что и на сверхзвуковой ДГ ортоферрита возникают топологические образования типа ВБЛ. Этот вывод подтверждают прямые эксперименты по лобовым столкновениям двух уединенных изгибных волн одинаковых амплитуд, движущихся вдоль ДГ исследуемой пластинки ортоферрита. На рис. 4а при подсветке первым световым импульсом эти волны находятся на расстоянии 220 мкм. Через 5нс они уже почти аннигилировали. На рис. 4б видна полная аннигиляция. Теоретически динамика и механизм возникновения топологических магнитных солитонов на

ДГ ортоферритов пока не рассматривались. В возникновении изгибных уединенных волн и, возможно, связанных с ними топологических образований

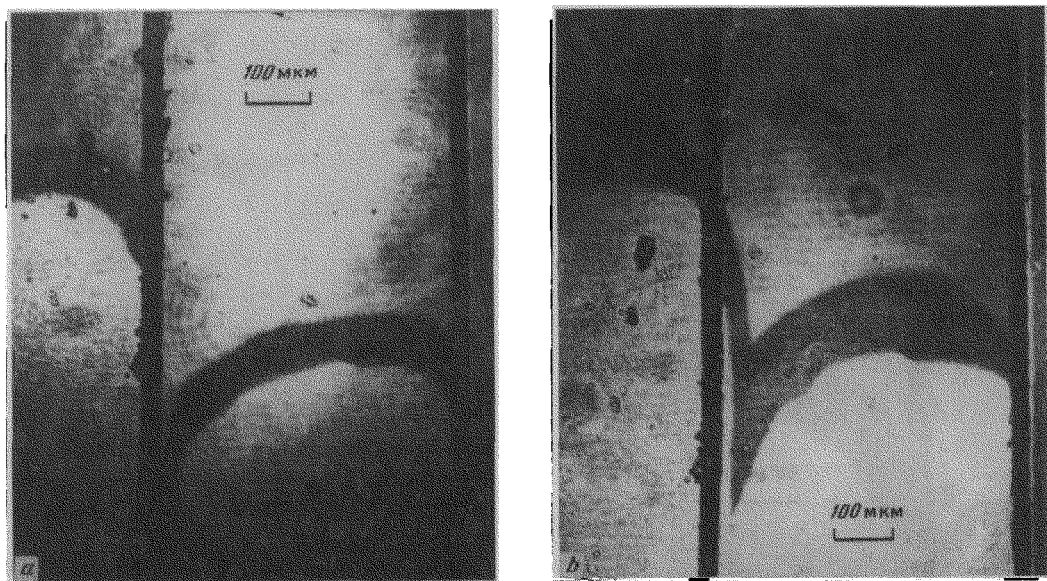


Рис. 4. Двухкратные высокоскоростные фотографии двух сталкивающихся уединенных изгибных волн. Начало процесса аннигиляции (а) -  $\Delta t = 5$  нс. Полная аннигиляция (б) -  $\Delta t = 9$  нс

типа ВБЛ существенная роль может принадлежать поверхности пластинки ортоферрита, где поле спиновой переориентации должно быть меньше, чем в массивном образце [9,10]. Правда, при магнитооптических исследованиях с помощью эффекта Керра, глубина формирования которого составляет, по-видимому, несколько десятков ангстрем, влияние поверхности было обнаружено только вблизи температуры спин-переориентации. В  $\text{YFeO}_3$  в обычных лабораторных магнитных полях никакого влияния обнаружено не было [11]. В [9] показано, что ДГ антиферромагнетика неелевской конфигурации остается устойчивой при выходе пары соседних спинов в перпендикулярную границе плоскость. В высоком поперечном магнитном поле такой выход может осуществляться в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Похожая ситуация, возможно, реализуется и в слабых ферромагнетиках, что, в принципе, может привести к образованию ВБЛ. Нам представляется, что неустойчивость сверхзвуковой доменной границы в ортоферрите иттрия, выражающаяся, в частности, в изменении ориентации плоскости ДГ, и отсутствие гистерезиса на зависимости скорости ДГ  $V$  от магнитного поля в сверхзвуковом диапазоне [6] могут способствовать образованию топологических образований на сверхзвуковой ДГ ортоферрита иттрия. Представляет интерес провести численные расчеты образования и динамики уединенных изгибных волн с учетом разворота магнитных моментов ДГ в плоскости, перпендикулярной  $(ac)$ . Модельные расчеты могут быть сделаны для малых параметров затухания, свойственных ортоферриту иттрия. Эти расчеты помогут представить характер профилей уединенных изгибных волн, их амплитуду, зависимость их от скорости ДГ и т. д. Общий же механизм рождения уединенных изгибных

волн на доменных границах ортоферритов требует отдельного теоретического рассмотрения с учетом роли поверхности и сверхзвуковой неустойчивости динамической ДГ ортоферрита. Следует заметить, что попытки затормозить или ускорить локальные участки динамической ДГ ортоферрита иттрия предпринимались ранее [6], но на значительно более протяженных участках. Они не привели к возникновению уединенных волн. Не исключено, что наблюдаемые в данной работе уединенные изгибные волны в ортоферрите иттрия значительно более устойчивы, чем аналогичные волны в ферритах-гранатах, что может позволить продвинуться в создании систем памяти на ВБЛ.

Авторы искренне благодарят А.М.Балбашова за предоставление монокристаллов ортоферрита, А.К.Звездина за обсуждение результатов работы, Д.М.Иеоманса с соавторами за любезную присылку препринта [10]. Работа была поддержана грантом 95-02-06188а Российского фонда фундаментальных исследований, за что авторы выражают свою глубокую благодарность.

- 
1. М.В.Четкин, И.В.Парыгина, Л.Л.Савченко, ЖЭТФ **110**, 1873 (1996).
  2. A.Thiaville, Ben Youssef, Y.Nakatani, and J.Miltat, J. Appl. Phys. **69**, 6090 (1991).
  3. К.П.Белов, А.К.Звездин, А.М.Кадомяца, Р.З.Левитин, *Ориентационные фазовые переходы в редкоземельных магнетиках*, М.: Наука, (1979).
  4. М.В.Четкин, С.Н.Гадецкий, Письма в ЖЭТФ **38**, 2600 (1983).
  5. M.V.Chetkin, Yu.N.Kurbatova, and A.I.Akhutkina, Phys. Lett. A **215**, 211 (1996), J. Appl. Phys. **79**, 6132 (1996).
  6. V.G.Barjakhtar, M.V.Chetkin, B.A.Ivanov, and S.N.Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons*, Springer Tracts in Modern Physics, v. 129, Berlin, 1994, p.182.
  7. С.В.Гомонов, А.К.Звездин, М.В.Четкин, ЖЭТФ **94**, 133 (1988).
  8. А.К.Звездин, А.Ф.Попков, Письма в ЖЭТФ **39**, 348 (1988).
  9. N.Papanicolaou, Phys. Rev B **51**, 15062 (1995).
  10. С.Micheletti, R.B.Giffits, and J.M.Yeomans, Preprint University of Oxford 96-235 (1996).
  11. Е.А.Балькина, Е.А.Ганьшина, Г.С.Кринчик, ЖЭТФ **93**, 1879 (1987).
  12. М.В.Четкин, С.В.Гомонов, Ю.Н.Курбатова, ФТТ **31**, 212 (1989).