

ГЕНЕРАЦИЯ, ДИНАМИКА И СОУДАРЕНИЯ УЕДИНЕННЫХ ИЗГИБНЫХ ВОЛН НА ДОМЕННЫХ ГРАНИЦАХ ОРТОФЕРРИТА ИТТРИЯ

М. В. Четкин*, Ю. Н. Курбатова, А. И. Ахуткина, Т. Б. Шапаева

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

Поступила в редакцию 2 декабря 1998 г.

На доменных границах неелевского типа в пластинках ортоферрита иттрия обнаружены и исследованы уединенные изгибные волны с очень резкими передними и затянутыми задними фронтами, отстающие как целое от доменной границы и движущиеся с высокими, близкими к предельной скоростями. Встречные столкновения двух таких волн одинаковых амплитуд приводят к их полной аннигиляции. Аналогичные столкновения двух таких волн разных амплитуд приводят к возникновению одной волны с разностной амплитудой, движущейся в ту же сторону, что и волна большей амплитуды. Исследованные уединенные изгибные волны движутся, по-видимому, под действием гироскопических сил, действующих на магнитные вихри в доменных границах ортоферрита иттрия, аналогичные вертикальным блоховским линиям с выходом намагнитченности из плоскости (ac). Из равенства гироскопической силы силе трения, действующей на передний фронт уединенной изгибной волны, оценены амплитуды этих волн и величины топологических зарядов магнитных вихрей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Доменные границы в ортоферритах движутся с высокими сверхзвуковыми скоростями [1, 2] и с увеличением магнитного поля достигают рекордно большой предельной скорости 20 км/с равной скорости спиновых волн на линейном участке закона дисперсии [3]. Зависимость скорости доменной границы от магнитного поля во всех выполненных к настоящему времени экспериментах была неубывающей функцией без участков с отрицательной дифференциальной подвижностью. Магнитные вихри типа вертикальных блоховских линий в доменных границах ортоферритов не наблюдались экспериментально ни в статике, ни в динамике. В силу лоренц-инвариантности динамики доменных границ в ортоферритах [4, 5] гироскопические силы, способные продвигать магнитные вихри, должны быть равны нулю [6]. Эксперименты последних двух-трех лет показали, что на доменных границах ортоферрита иттрия существуют и движутся уединенные изгибные волны, отстающие как целое от этой границы [7–9]. Эти волны имеют резкие передние и затянутые задние фронты, напоминающие по форме аналогичные волны, сопровождающие магнитные вихри, — вертикальные блоховские линии, подробно исследованные экспериментально [6, 10] и теоретически [11–13] в пленках ферритов-гранатов с одноосной магнитной анизотропией. В последние несколько лет появился ряд теоретических работ, посвященных динамике магнитных вихрей в легкоплоскостных антиферромагнетиках с взаимодействием Дзялошинского [14]. Эти вихри

* E-mail: chetkin@magn145.phys.msu.su

вносят существенный вклад в термодинамические характеристики антиферромагнетиков и движутся с высокими скоростями. С упомянутыми выше работами по исследованию уединенных изгибных волн на доменных границах ортоферритов их объединяет необходимость выхода векторов антиферромагнетизма l и слабого ферромагнетизма m из плоскости легкого намагничивания для образования трехмерных магнитных вихрей, движущихся с высокими, вплоть до предельной, скоростями под действием гироскопических сил. Эти силы возникают под действием магнитного поля, перпендикулярного плоскости (ac) [15]. В данной работе будут систематизированы экспериментальные результаты по генерации, динамике и соударениям уединенных изгибных волн на движущихся доменных границах ортоферрита иттрия. Будет проведено сравнение этих данных с результатами по динамике и соударениям магнитных вихрей в пленках ферритов-гранатов, проведен качественный анализ гироскопической динамики уединенных изгибных волн в ортоферритах и оценены амплитуды этих волн, сопровождающих магнитные вихри. Возможность экспериментального наблюдения предельных скоростей движения доменных границ в ортоферрите иттрия в малых магнитных полях связана с рекордно малой величиной их безразмерного параметра затухания $\alpha \simeq 10^{-5}$ [6, 16]. Столь малое α обеспечивает возможность экспериментального наблюдения движения с предельными скоростями магнитных вихрей в доменных границах ортоферрита иттрия.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Генерация, динамика и результаты парных соударений уединенных изгибных волн в доменных границах ортоферрита иттрия исследовались с помощью методики двукратной высокоскоростной фотографии в реальном масштабе времени [6–10] с использованием двух импульсов света, задержанных по времени на 5–20 нс. Длительность световых импульсов лазера на красителе, накачиваемого импульсом от азотного лазера с поперечным разрядом, была равна 0.25 нс. Между электродами разрядника азотного лазера помещалась пластинка из ситалла с тонким отверстием. Это обеспечивало долговременную стабильную работу лазера. Использовались тонкие, толщиной 30–40 мкм, пластинки ортоферрита иттрия, вырезанные перпендикулярно оптической оси. В таких пластинках в отсутствие магнитного поля существуют полосовые доменные структуры с доменными границами неелевского типа, перпендикулярными оси a , лежащей в плоскости образца. С помощью магнитного поля перпендикулярного поверхности образца с градиентом 800 Э/см вдоль оси a устанавливалась единственная доменная граница неелевского типа (рис. 1). В центре этой доменной границы вектор m лежал вдоль или против оси a и был перпендикулярен плоскости границы. В такой границе ортоферрита векторы l и m вращаются обычно в плоскости ac либо по, либо против часовой стрелки. Поэтому, в принципе, в такой геометрии возможно существование переходных областей типа магнитных вихрей или вертикальных блоховских линий, отделяющих участки с противоположными направлениями вращения векторов l и m . Вращая градиентное поле вокруг оптической оси образца, можно было устанавливать в нем доменные границы неелевского, блоховского и промежуточного типов. Единственная в образце доменная граница приводилась в движение магнитным полем от двух катушек по 8 витков с внутренним диаметром 1.5 мм. Для генерации уединенных изгибных волн использовались одиночные проводники диаметром 20 мкм, перпендикулярные статическому положению доменной границы. По ним пропускались короткие импульсы тока, создающие

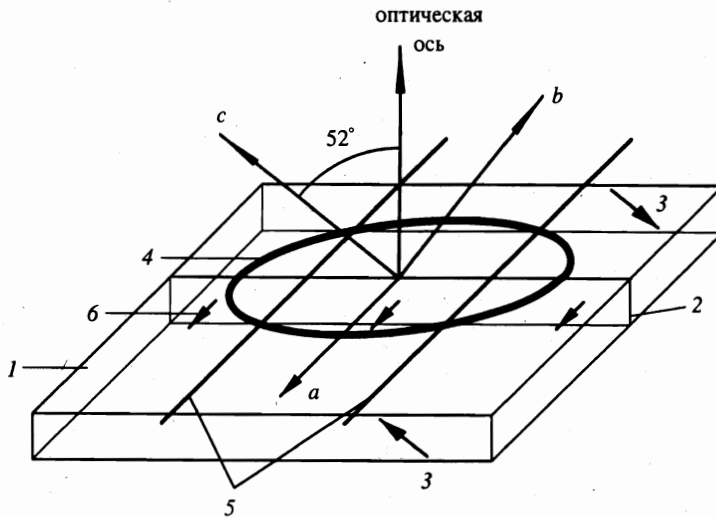


Рис. 1. Схема расположения основных управляющих элементов и намагниченности в двухдоменной пластинке ортоферрита иттрия перпендикулярной оптической оси для исследования генерации, динамики и соударений уединенных изгибных волн на доменной границе: 1 — пластинка ортоферрита, 2 — неелевская доменная граница, 3 — намагниченности соседних доменов, 4 — катушка для создания продвигающего доменную границу магнитного поля, 5 — уединенные проводники для создания магнитного поля, тормозящего локальные участки доменной границы, 6 — намагниченность в центре доменной границы

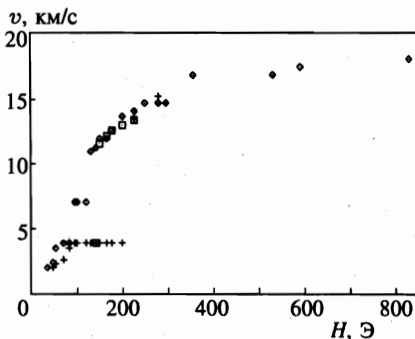


Рис. 2. Зависимости скорости движения доменных границ Нееля (+), Блоха (◊), и промежуточного типа (◻), от магнитного поля в пластинке $YFeO_3$ толщиной 30 мкм перпендикулярной оптической оси

магнитные поля, тормозящие локальные участки доменной границы, движущейся со сверхзвуковой скоростью. Зависимости скоростей доменных границ различных типов от магнитного поля в исследуемой пластинке представлены на рис. 2. Основные эксперименты проводились на доменной границе неелевского типа. Именно для такой границы область, где скорость постоянна и близка скорости поперечного звука, была максимальна и составляла около 100 Э. В более толстых пластинках для неелевской доменной границы и особенно для доменных границ блоховского и промежуточного типов области постоянства скорости были существенно меньше (см. рис. 2) и в них не удалось наблюдать генерации уединенных изгибных волн. Вопрос об интервале по-

стоянства скорости доменной границы равной скорости поперечного v_t и продольного v_l звуков теоретически рассмотрен только в одномерном случае [6, 17–19]. Что касается зависимости ширины области $\Delta H(v_t)$, где скорость доменной границы постоянна при ее равенстве скорости поперечного звука, от толщины пластинки ортоферрита, то качественно эта зависимость связана с искривлением первоначально плоской доменной границы при переходе на сверхзвуковую скорость. При этом возникает тормозящая сила поверхностного натяжения, обратно пропорциональная радиусу кривизны, и при толщинах образца 30–40 мкм она эквивалентна магнитному полю в несколько сот эрстед, направленному противоположно направлению движения. Это поле, замедляющее доменную границу, и приводит к увеличению области, где скорость постоянна и приблизительно равна скорости звука. Первые экспериментальные наблюдения уединенных изгибных волн в пластинках ортоферрита иттрия были сделаны в отсутствие уединенного провода [7]. В этом случае, по-видимому, происходило торможение участка доменной границы в верхней части образца на границе с витками катушек, создающих продвигающее магнитное поле. Процесс генерации уединенных волн в этих первых работах был значительно менее воспроизводимым, чем с помощью одиночного проводника, использованного впоследствии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментам по исследованию динамики и соударений уединенных изгибных волн на сверхзвуковой доменной границе ортоферрита иттрия предшествовали эксперименты по динамике доменных границ. Зависимости скоростей движения доменных границ в пластинке YFeO_3 толщиной 40 мкм для разных ориентаций плоскости границы представлены на рис. 2. Для доменной границы блоховского типа, когда в центральной плоскости ее статического положения вектор слабого ферромагнетизма m лежит в плоскости доменной границы и направлен вдоль оси a , особенность на скорости поперечного звука отсутствует. В доменной границе неелевского типа, когда в центральной плоскости ее статического положения вектор слабого ферромагнетизма m направлен перпендикулярно ее плоскости, существует максимально широкая область постоянства скорости, ΔH_t порядка 100 Э. В этом интервале скорость неелевской доменной границы равна скорости поперечного звука. Оба приведенных результата для блоховской и неелевской доменных границ соответствуют теоретическому анализу [6, 17–19] и результатам более ранних экспериментов [1–3]. Для доменных границ промежуточного типа ширины областей постоянства скоростей в окрестности скорости поперечного звука монотонно уменьшаются от максимума до нуля. Заметим, что приведенное выше определение типа доменной границы в ортоферрите соответствует данным более ранних работ по динамике и подвижности [6] и не соответствует их определению принятому в [20]. В этой последней работе за основу взяты вращения l в плоскости ac для неелевской и в плоскости ab для блоховской доменных границ. Эксперименты по генерации, динамике и соударениям уединенных изгибных волн проводились на доменных границах неелевского типа. При дальнейшем увеличении магнитного поля выше области постоянства скорость доменной границы очень резко увеличивается до 12 км/с. Последующее локальное быстро релаксирующее уменьшение скорости доменной границы с помощью короткого импульса тока в единственном проводнике, пересекающем доменную границу, приводило к генерации стационарных уединенных изгибных волн,

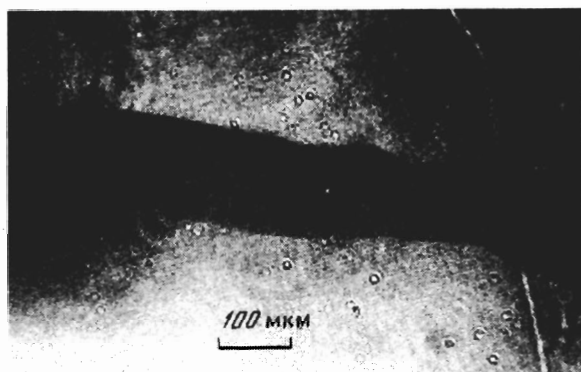


Рис. 3. Двукратная высокоскоростная фотография двух уединенных изгибных волн, движущихся справа налево на движущейся снизу вверх доменной границе YFeO_3 . Время задержки между световыми импульсами 9 нс

движущихся вдоль доменной границы в течение всего времени наблюдения. Пример таких волн показан на рис. 3, где отчетливо видны два положения двух уединенных изгибных волн, движущихся справа налево вдоль доменной границы, движущейся снизу вверх. Временная задержка между световыми импульсами равна 9 нс. Передние фронты этих волн весьма резкие, задние фронты затянуты, и обе эти волны движутся вдоль доменной границы со скоростью $u = 16$ км/с. Скорость доменной границы $v = 12$ км/с, так что между скоростями u , v и предельной скоростью доменной границы ортоферрита c существует соотношение $v^2 + u^2 = c^2$, т. е. полная скорость уединенной волны близка к предельной скорости доменной границы. А это означает, что уединенные волны движутся под действием весьма больших сил, которыми могут быть, по-видимому, только гироскопические силы. Действительно, продвигающее всю доменную границу снизу вверх магнитное поле может только тормозить передний фронт уединенной волны. Поле в плоскости пластинки YFeO_3 , которое, в принципе, может возникать от магнитов, создающих градиентное магнитное поле, не может превышать нескольких десятков эрстед. Его явно недостаточно для движения переднего фронта уединенной волны со скоростью, близкой к предельной равной 20 км/с. Амплитуды уединенных изгибных волн на рис. 3 равны 5 и 30 мкм, и обе эти волны движутся с полными скоростями 20 км/с. Изгибные волны в нашем эксперименте генерировались при локальном торможении доменной границы, движущейся первоначально только со скоростью 12 км/с. Этой величиной скорости заканчивается интервал сверхзвуковой неустойчивости доменной границы, и она находится строго в середине между предельной скоростью и скоростью поперечного звука.

На рис. 4 представлена двукратная высокоскоростная фотография, на которой отчетливо видны две уединенные изгибные волны одинаковых амплитуд, движущиеся в противоположные стороны с указанными выше скоростями на доменной границе, движущейся снизу вверх со скоростью 12 км/с. Движение в разные стороны связано, по-видимому, с разными знаками топологических зарядов магнитных вихрей типа

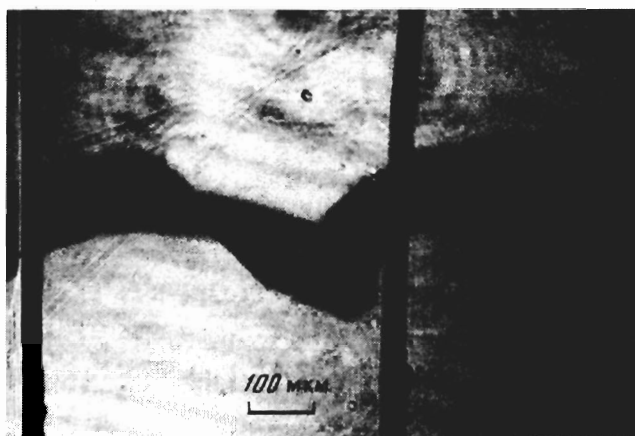


Рис. 4. Двукратная высокоскоростная фотография двух уединенных изгибных волн, движущихся в противоположных направлениях на доменной границе $YFeO_3$, движущейся снизу вверх. Время задержки между световыми импульсами 7 нс

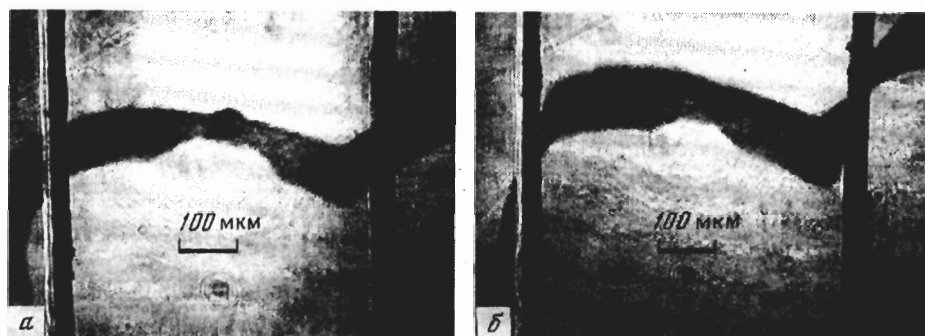


Рис. 5. Двукратные высокоскоростные фотографии двух сталкивающихся уединенных изгибных волн одинаковых амплитуд на доменной границе ортоферрита иттрия, движущейся снизу вверх: *а* — непосредственно перед столкновением, *б* — аннигиляция уединенных волн. Время задержки между световыми импульсами 6 нс

вертикальных блоховских линий, которые сопровождаются этими волнами. Различные участки локально замедленной части доменной границы движутся с различными меньшими и равными 12 км/с скоростями, так что уединенные изгибные волны могут двигаться вдоль доменных границ, движущихся не только со скоростью 12 км/с.

На рис. 5 показаны результаты встречных столкновений двух уединенных изгибных волн одинаковых амплитуд, генерируемых с помощью двух проводников, пересекающих доменную границу. В первом положении на рис. 5*а* они достаточно далеки друг от друга, во втором положении через 6 нс они почти аннигилировали. На рис. 5*б* они ан-

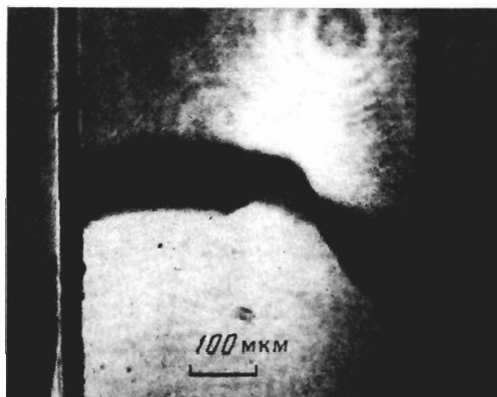


Рис. 6. Двукратная высокоскоростная фотография двух сталкивающихся уединенных изгибных волн разных амплитуд на доменной границе ортоферрита иттрия, движущейся снизу вверх. Время задержки между световыми импульсами 6 нс

нигилировали полностью. Этот результат может быть объяснен аннигиляцией равных по абсолютной величине, но различных по знаку топологических зарядов магнитных вихрей, сопровождаемых уединенными изгибными волнами. Две встречные уединенные волны различных амплитуд, движущиеся с одинаковыми по абсолютной величине скоростями, после столкновения образуют одну уединенную волну с амплитудой равной разности амплитуд сталкивающихся волн. Этот результат представлен на рис. 6. Образующаяся после столкновения уединенная волна продолжает двигаться в том же направлении, что и волна большей амплитуды перед столкновением. В целом динамические профили уединенных изгибных волн в ортоферрите иттрия качественно очень похожи на аналогичные профили таких волн в пленках ферритов-гранатов с одноосной анизотропией. Эти волны в ферритах-гранатах сопровождают магнитные вихри типа вертикальных блоховских линий. Динамика и соударения магнитных вихрей в ферритах-гранатах исследованы экспериментально [6, 10] и теоретически [11–13]. Установлено, что две вертикальные блоховские линии с одинаковыми по величине топологическими зарядами при лобовом столкновении могут аннигилировать полностью, частично аннигилировать, вести себя солитоноподобным образом и даже увеличивать свои топологические заряды вблизи критической скорости доменной границы. Максимальные скорости магнитных вихрей в доменных границах ферритов-гранатов не превышают 150–200 м/с и движутся они под действием гироскопических сил. В ортоферрите иттрия полная скорость уединенных изгибных волн близка к предельной скорости движения доменной границы. Этот факт свидетельствует о том, что движение уединенных изгибных волн происходит под действием больших гироскопических сил, пропорциональных большим скоростям движения доменных границ в ортоферритах. Эти силы должны быть пропорциональны скорости доменной границы v . Полученные нами экспериментальные результаты подтверждают этот вывод. Уменьшение скорости доменной границы приводит к уменьшению скорости уединенной изгибной волны. Экстраполяция зависимости $u(v)$ показывает, что и u в этом случае стремится к нулю.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженные экспериментально уединенные изгибные волны на доменных границах ортоферрита иттрия имеют амплитуды от нескольких единиц до нескольких десятков микрон. Они отстают как целое от доменной границы. Их передние прямолинейные фронты напоминают кинки большой амплитуды на доменной границе в YFeO_3 , движущейся со скоростью поперечного звука [21]. Движение кинков большой амплитуды происходит под действием продвигающего доменную границу целиком магнитного поля. Наклонный фронт кинка, являющийся доменной границей промежуточного типа, в соответствии с данными рис. 2 в том же магнитном поле имеет скорость большую, чем вся неелевская доменная граница. Передний фронт уединенной изгибной волны тоже является границей промежуточного типа, но он не может двигаться под действием внешнего магнитного поля, продвигающего всю доменную границу. Без учета внешнего магнитного поля, продвигающего доменную границу ортоферрита, уравнения движения этой границы являются лоренц-инвариантными [4-6]. Гиросила в этом случае должна быть равна нулю [6]. В магнитном поле H , продвигающем всю доменную границу как целое, лоренц-инвариантность нарушается и появляется гироскопическая сила, пропорциональная отношению H/H_E , где H_E — поле обменного взаимодействия. Эти силы в антиферромагнетике F_{AFM} и ферромагнетике F_{FM} связаны соотношением [14]

$$F_{AFM} = \frac{8H}{H_E} F_{GFM}.$$

Здесь присутствует малый множитель H/H_E . Однако скорость доменной границы в ортоферритах достигает больших величин $\sim 10^6$ см/с, что существенно больше, чем скорость движения доменной границы в ферромагнетиках, где она порядка 10^4 см/с. Гироскопическая сила, действующая на магнитный вихрь, при стационарном движении должна уравниваться силой трения, пропорциональной безразмерному параметру затухания $\alpha = 10^{-5}$. Эта величина для ортоферрита иттрия следует из подвижности доменных границ равной 10^4 см/с·Э (см. рис. 2) и из данных по антиферромагнитному резонансу [16]. Приравняв гироскопическую силу силе трения, действующей на передний фронт уединенной изгибной волны, можно оценить амплитуду уединенной изгибной волны, сопровождающей магнитный вихрь с определенным топологическим зарядом. Для заряда 2π амплитуда волны оказывается равной 0.1 мкм. Наблюдаемые в эксперименте амплитуды соответствуют топологическим зарядам от нескольких единиц до нескольких десятков π . Причем, в отличие от ферритов-гранатов, углы наклона передних фронтов относительно невозмущенной доменной границы для волн всех амплитуд одинаковы, а их полные скорости велики и близки к предельной скорости движения доменной границы. В одноосных пленках ферритов-гранатов, где динамика вертикальных блоховских линий и результаты их парных соударений исследованы экспериментально и теоретически, это были либо неелевские участки блоховской доменной границы, либо блоховские участки неелевской границы. Длины этих участков были существенно больше ширины доменной границы. В ортоферритах кроме вращения l и m в плоскости ac известно лишь вращение l в плоскости ab без вращения, но при изменении величины и знака m . Доменные границы в ортоферритах без вращения m предсказаны в [22, 23]. Они обнаружены в DyFeO_3 из анализа спектра ЯМР [24] при температурах существенно более высоких, чем температура перехода в антиферромагнитное состояние. В работе [25] была рассчитана «тонкая» структура неподвижной

доменной границы ортоферрита с чередующимися участками с поворотом и без поворота m . Динамика участков без поворота m при условии $v \ll c$ теоретически проанализирована в [26, 27]. Этот анализ не охватывает приведенных выше экспериментальных результатов по динамике и соударениям уединенных изгибных волн в YFeO_3 , где их скорости движения сравнимы или даже равны предельной скорости c . Для случая неелевской доменной границы в нашем эксперименте вращение l в плоскости ab не позволяет описать структуру магнитного вихря. Для этого необходимо анализировать возможность разворота векторов l и m в других, отличных от упомянутых выше плоскостях. Это потребует преодоления большой орторомбической анизотропии и приведет к тому, что длина магнитного вихря вдоль доменной границы будет меньше, чем ее ширина, в отличие от случая одноосных ферритов-гранатов. В принципе, большая орторомбическая магнитная анизотропия может быть уменьшена за счет движения доменной границы со скоростью, близкой к скоростям поперечного или продольного звука. Для возникновения спин-переориентационного перехода типа $G_x F_x \leftrightarrow G_y$ внутри доменной границы может иметь значение и поверхность образца [25, 28]. Выходу векторов l и m из плоскости ac может способствовать сверхзвуковая неустойчивость доменной границы ортоферрита, проявляющаяся, в частности, в резком наклоне ее плоскости и отсутствии гистерезиса на зависимости $v(H)$ в этой области. Для полного теоретического анализа динамики и соударений магнитных вихрей в слабых ферромагнетиках необходимо провести анализ этих процессов на базе численного моделирования трехмерных уравнений движения магнитного момента, аналогично уже проведенному анализу этих процессов в ферритах-гранатах с одноосной анизотропией [13]. Представляет интерес распространить этот анализ и на пленки ферритов-гранатов с орторомбической анизотропией, где магнитные вихри еще не наблюдались до сих пор экспериментально.

5. ВЫВОДЫ

1. На доменных границах неелевского типа в пластинках ортоферрита иттрия обнаружены и исследованы уединенные изгибные волны с резкими передними и затянутыми задними фронтами, движущиеся с очень высокими скоростями, близкими к предельным скоростям доменных границ в этих слабых ферромагнетиках, и отстающие как целое от доменной границы. Эти волны не могут двигаться под действием внешнего магнитного поля, продвигающего доменную границу как целое. Такое поле может только тормозить передние фронты уединенных изгибных волн. Не могут они двигаться и со скоростями, близкими к предельной под действием небольших плоскостных полей перпендикулярных плоскости доменной границы.

2. Встречные столкновения двух одинаковых по амплитуде уединенных изгибных волн на доменной границе ортоферрита иттрия, движущейся со скоростью около 12 км/с, приводят к их полной аннигиляции. Аналогичные столкновения двух разных по амплитуде уединенных изгибных волн приводят к появлению одной уединенной волны с разностной амплитудой, движущейся в ту же сторону, что и волна с большей амплитудой до столкновения.

3. Полученные экспериментальные результаты в ортоферрите иттрия и сравнение их с результатами исследований динамики и соударений магнитных вихрей (вертикальных блоховских линий) в ферритах-гранатах показывают, что уединенные изгибные волны в ортоферритах также сопровождают движущиеся под действием гироскопиче-

ских сил магнитные вихри с выходом намагниченности в них из плоскости ac . Эти силы пропорциональны как малому отношению магнитного поля, продвигающего доменную границу как целое, к обменному полю, так и весьма большой скорости этой границы, и при стационарном движении уравновешиваются силой трения, действующей на передний фронт уединенной изгибной волны и пропорциональной очень малому безразмерному параметру затухания в уравнениях движения Ландау—Лифшица.

Авторы благодарят А. К. Звездина и А. Ф. Попкова за обсуждение результатов, а А. М. Балбашова за предоставление монокристаллов ортоферрита иттрия. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 98-02-16440).

Литература

1. М. В. Четкин, А. Н. Шалыгин, А. Де ла Кампа, ФТТ **19**, 3470 (1977).
2. С. Н. Tsang, R. L. White, and R. M. White, J. A. P. **49**, 6052 (1978).
3. М. В. Четкин, А. Де ла Кампа, Письма в ЖЭТФ **27**, 168 (1978).
4. А. К. Звездин, Письма в ЖЭТФ **29**, 605 (1979).
5. В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, А. Л. Сукстанский, ЖЭТФ **78**, 1509 (1980).
6. V. G. Bar'jakhtar, M. V. Chetkin, B. A. Ivanov, and S. N. Gadetskiy, *Dynamics of Topological Magnetic Solitons*, Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 129, Springer, Berlin (1994), p. 182.
7. M. V. Chetkin, Yu. N. Kurbatova, and A. I. Akhutkina, Phys. Lett. A **215**, 211 (1996).
8. М. В. Четкин, Ю. Н. Курбатова, В. Н. Филатов, Письма в ЖЭТФ **65**, 760 (1997).
9. M. V. Chetkin and Yu. N. Kurbatova, IEEE Trans. on Magnetics **34**, 1075 (1998).
10. M. V. Chetkin, I. V. Parygina, V. B. Smirnov et al., Phys. Lett. A **140**, 428 (1989).
11. А. К. Звездин, А. Ф. Попков, И. П. Яремá, ЖЭТФ **98**, 1070 (1990).
12. Е. Е. Котова, В. М. Четвериков, ЖЭТФ **98**, 2011 (1990).
13. L. L. Savchenko, M. V. Chetkin, and V. B. Bondarenko, JMMM **183**, 313 (1998).
14. B. A. Ivanov and D. D. Sheka, Phys. Rev. Lett. **72**, 404 (1994).
15. А. Ф. Андреев, В. И. Марченко, УФН **130**, 39 (1980).
16. A. A. Mukhin, V. D. Travkin, S. P. Lebedev et al., J. de Phys. **7**, S-1-713 (1997).
17. В. Г. Барьяхтар, Б. А. Иванов, А. Л. Сукстанский, ЖЭТФ **75**, 2183 (1978).
18. А. К. Звездин, А. Ф. Попков, ФТТ **21**, 1334 (1979).
19. А. К. Звездин, А. А. Мухин, ЖЭТФ **102**, 577 (1992).
20. N. Papanicolaou, Phys. Rev. B **55**, 12290 (1997).
21. М. В. Четкин, С. Н. Гадецкий, Письма в ЖЭТФ **38**, 260 (1983).
22. М. М. Фарзтдинов, С. Д. Мальгинова, ФТТ **12**, 2955 (1970).
23. Л. Н. Булаевский, В. Л. Гинзбург, Письма в ЖЭТФ **11**, 404 (1970).
24. А. В. Залесский, А. М. Саввинов, И. С. Желудев, ЖЭТФ **68**, 1449 (1975).
25. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, А. А. Халфина, ФТТ **21**, 1522 (1979).
26. Ю. В. Мелехов, О. А. Переход, ФТТ **25**, 713 (1983).
27. М. М. Фарзтдинов, М. А. Шамсутдинов, Е. Г. Екомасов, ФТТ **30**, 1866 (1988), ФТТ **32**, 1542 (1990).
28. C. Micheletti, R. B. Griffiths, and J. H. Yeomans, J. Phys. A **30**, L233 (1997).