

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Торможение доменной границы в пленке феррита–граната с помощью фемтосекундных лазерных импульсов

К. Х. Прабхакара,^{1,а} Т. Б. Шапаева,^{2,б} М. Д. Давыдова,^{3,в} К. А. Звездин,^{3,г}
 А. К. Звездин,⁴ К. Девис,¹ А. И. Кирилук,¹ Т. Райзинг,¹ А. В. Кимель¹

¹ Университет св. Раббауда, Институт молекул и материалов.
 Нидерланды, г. Наймеген, 135 Heuyendaalseweg, 6525 AJ, Nijmegen

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 физический факультет, кафедра магнетизма.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

³ Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

⁴ Институт общей физики имени А. М. Прохорова. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

Поступила в редакцию 28.07.2021, после доработки 02.09.2021, принята к публикации 23.09.2021.

При использовании метода, объединяющего двукратную высокоскоростную фотографию и метод накачки-зондирования было обнаружено, что фемтосекундный лазерный импульс способен изменять скорость движущейся доменной границы в пленке феррита-граната. Изменение скорости доменной границы зависит от энергии возбуждающего оптического импульса и скорости самой доменной границы и не зависит от поляризации импульса накачки. Этот результат не связан с локальным перемагничиванием, и его нельзя объяснить локальным нагревом материала, поскольку увеличение температуры приводит к росту подвижности доменной границы. Для объяснения полученных результатов была предложена модель, в которой причиной торможения доменной границы является генерация вертикальных блоховских линий, вызванная импульсом накачки.

Ключевые слова: двукратная высокоскоростная фотография, метод накачки-зондирования, оптическое перемагничивание, динамика доменных границ, вертикальные блоховские линии.

УДК: 537.622. PACS: 75.40.Gb, 75.60.Ch, 75.60.Jk, 75.70.Kw.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых устройств для записи и обработки информации является стимулом для интенсивного поиска механизмов, позволяющих управлять динамикой доменных границ (ДГ). В настоящее время движением ДГ и ее тонкой структуры можно управлять не только с помощью магнитного поля. В литературе описаны различные методы управления динамикой ДГ с помощью электрического поля [1, 2] и спин-поляризованного электрического тока [3–5]. Хорошо известно, что движение ДГ может быть вызвано светом, и этот процесс играет ключевую роль в недавно открытом полностью оптическом перемагничивании в ферромагнитных металлах [6–8]. Поскольку динамика ДГ, вызванная ультракороткими лазерными импульсами, может быть рассмотрена в качестве основы для достижения высокоэффективной и сверхбыстрой оптоспинтроники, которая объединяет хранение магнитных данных и передачу фотонных данных [9, 10], понимание физики движения границы, которое управляется светом, может стать основой новых технологий для записи и обработки магнитно-кодированной информации.

Несмотря на интенсивные исследования динамики ДГ под действием оптических импульсов [7, 8, 11, 12], эксперименты, в которых движение грани-

цы возбуждается светом, весьма немногочисленны и оставляют много открытых вопросов [13, 14]. Например, способно ли оптическое возбуждение влиять на скорость движения ДГ. Неопределенность в этом вопросе может привести к неоднозначности в определении фактической динамики ДГ [8]. Указанная выше проблема ранее не исследовалась, ее решению посвящена настоящая работа.

С помощью метода, объединяющего двукратную фотографию и метод накачки-зондирования, было исследовано влияние фемтосекундных лазерных импульсов на движущуюся доменную стенку в висмут-замещенном феррите-гранате.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовали пленку Vi-содержащего феррита-граната, выращенную на подложке с ориентацией [111]. Поле анизотропии при комнатной температуре составляло ≈ 7 кЭ. Для создания в образце единственной доменной границы использовали градиентное магнитное поле величиной 3.4 кЭ/см, создаваемое постоянными магнитами (рис. 1, а). Помимо компоненты поля, перпендикулярной плоскости образца, эти магниты имели компоненту, ориентированную в плоскости образца, перпендикулярно плоскости доменной границы (H_y^{\parallel}), ее величина была около 5 кЭ. Дополнительно с помощью электромагнита создавали постоянное магнитное поле той же ориентации. Таким образом, суммарное плоскостное магнитное поле (H_y^0) могло достигать 6.7 кЭ. Постоянное плоскостное поле стабилизирует структуру динамической доменной

^а E-mail: t.b.shapaeva@gmail.com

^б E-mail: shapaeva@mail.ru

^в E-mail: davydova@phystech.edu

^г E-mail: zvezdin.ka@phystech.edu

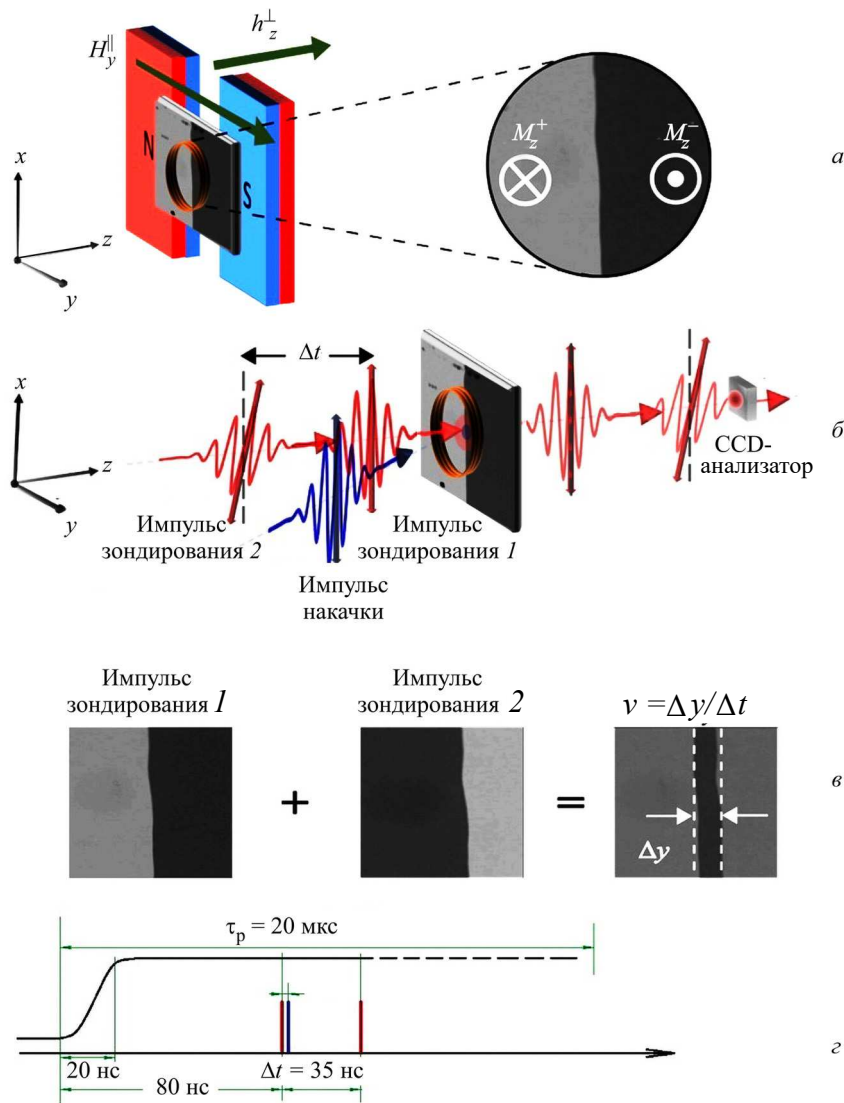


Рис. 1. Объединение двукратной фотографии и метода накачки-зондирования. *a* — Создание единственной доменной границы в пленке феррита-граната. M_z^+ и M_z^- — направление намагниченности в соседних доменах, H_y^{\parallel} — постоянное магнитное поле, перпендикулярное плоскости доменной границы, создаваемое постоянными магнитами; h_z^{\perp} — импульсное магнитное поле, управляющее динамикой доменной границы; *б* — взаимное расположение импульсов накачки и зондирования. Два оптических зондирующих импульса, разделенных временным интервалом Δt , освещают динамическую доменную границу. Импульс накачки действует на движущуюся границу после первого зондирующего импульса; *в* — фотографии доменной структуры, полученные с помощью каждого из лучей зондирования по отдельности, и сумма этих изображений. Ширина темной полосы на последнем кадре Δy — расстояние, пройденное доменной границей за интервал времени между двумя зондирующими импульсами Δt [16]; *г* — взаимное расположение импульса магнитного поля с длительностью τ_p и световых импульсов в геометрии импульс зондирования 1 — импульс накачки — импульс зондирования 2

границы и позволяет достичь скоростей вплоть до 4 км/с и выше [15]. В нашем эксперименте скорость движения ДГ не превышала 0.6 км/с.

Для управления динамикой ДГ была использована пара соосных катушек, расположенных на поверхности образца. Длительность импульса напряжения, подаваемого в эти катушки, составляла $\tau_p = 20$ мкс, его переднего фронта — 20 нс (рис. 1, *г*). После окончания действия импульса магнитного поля ДГ возвращалась в положение равновесия под действием градиентного поля.

1.1. Метод, объединяющий двукратную фотографию и метод накачки—зондирования

Положение динамической ДГ фиксировали с помощью метода двукратной фотографии. Два линейно-

поляризованных импульса с длиной волны 800 нм и длительностью 70 фс освещали движущуюся границу с интервалом $\Delta t = 35$ нс (рис. 1, *б, г*). Импульс накачки (400 нм, 70 фс), действующий на динамическую ДГ через 1 нс после первого зондирующего импульса (рис. 1, *г*), был сфокусирован в пятно диаметром ~ 50 мкм и был расположен на образце так, чтобы возбуждать именно движущуюся ДГ. Изображения доменной структуры, полученные с помощью каждого из зондирующих лучей, имели обратный контраст (рис. 1, *в*). При совмещении этих изображений возникала темная полоса, ширина которой Δy — это расстояние, пройденное ДГ за интервал времени между двумя зондирующими импульсами Δt . Таким образом, по одной двукратной

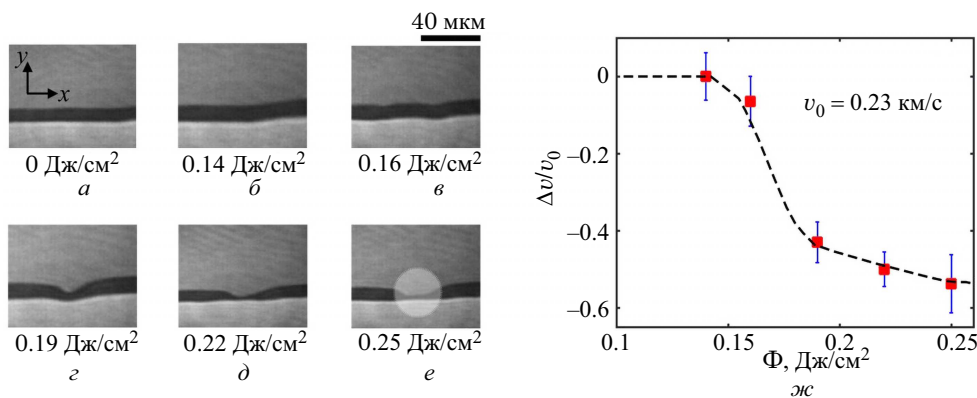


Рис. 2. Влияние импульса накачки на динамическую доменную границу. *a–e* — двукратные фотографии, иллюстрирующие влияние импульсов накачки разной энергии Φ на динамическую доменную границу. Граница движется снизу вверх со скоростью 0.23 км/с. Светлый круг на фотографии *e* указывает пространственное расположение импульса накачки; *ж* — Относительное изменение скорости движения доменной границы $\Delta v/v_0$ в зависимости от энергии возбуждающего импульса [16]

фотографии, выполненной в описанной геометрии, можно определить скорость границы в области влияния импульса накачки и вне ее. Все временные интервалы, представленные на рис. 1, *з*, оставались неизменными на протяжении всего эксперимента.

Таким образом, временное разрешение установки определяется задержкой между первым и вторым зондирующим импульсами и составляет 35 нс. Следует отметить, что на основе этой установки, регулируя задержку между импульсами накачки и зондирования, может быть реализована не только геометрия «импульс зондирования 1—импульс накачки—импульс зондирования 2» (probe 1—pump—probe 2), но и геометрия «импульс накачки—импульс зондирования 1—импульс зондирования 2» (pump—probe 1—probe 2). Все описанные ниже эксперименты были выполнены по первому сценарию.

1.2. Влияние импульса накачки на динамическую доменную границу

На рис. 2 показана серия двукратных фотографий, демонстрирующих влияние мощного оптического импульса на динамическую ДГ [16]. Граница движется снизу вверх со скоростью 0.23 км/с. Импульс накачки помещен на пути движущейся границы так, как показано светлым кругом на рис. 2, *e*. В отсутствие импульса накачки ДГ движется равномерно (рис. 2, *a*). При увеличении интенсивности оптического импульса движение ДГ в возбужденной области замедляется по сравнению с движением вне этой области, как показано на рис. 2, *б–e*. Все фотографии, представленные на этом рисунке, были получены с использованием одного импульса накачки и одной пары зондирующих импульсов. После обработки серии фотографий была построена зависимость модуля относительного изменения скорости движения ДГ $|\Delta v|/v_0$ от энергии возбуждающего импульса (рис. 2, *ж*). Видно, что импульсы накачки с энергией ниже некоторого порогового значения ~ 0.17 Дж/см² не оказывают влияния на динамическую ДГ. Если энергия возбуждающего импульса превышает это значение, наблюдается замедление границы. Модуль относительного изменения скорости возрастает с ростом энергии импульса накачки

и может достигать 50 % от первоначальной скорости. В этом эксперименте импульс накачки был линейно поляризован вдоль оси *x*. Измерения проводили при комнатной температуре (290 К).

На рис. 3 показана серия двукратных фотографий, иллюстрирующих влияние импульса накачки с фиксированной энергией 0.22 Дж/см² на доменные границы, которые движутся с разными скоростями. На всех фотографиях граница движется снизу вверх. Оптический импульс замедляет ДГ, если она движется медленно. Если скорость границы выше некоторого критического значения, никакого влияния света не наблюдается.

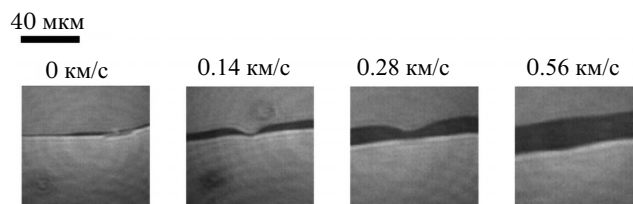


Рис. 3. Фотоиндуцированное торможение доменной границы в зависимости от скорости ее движения. Двукратные фотографии показывают влияние одиночного импульса накачки с энергией 0.22 Дж/см² на доменную границу, движущуюся с разными скоростями. Граница движется снизу вверх [16]

Чтобы выявить механизм взаимодействия света с веществом, ответственный за изменение скорости ДГ, которое вызвано импульсом накачки, было исследовано влияние поляризации возбуждающего импульса на динамику границы. На рис. 5 показана серия двукратных фотографий, сделанных при различных энергиях и поляризациях возбуждающего импульса. Эксперименты проводили в присутствии трех видов линейной поляризации: вертикальной (π_V), горизонтальной (π_H) и промежуточной (45°), а также двух видов круговой поляризации: правой (σ^+) и левой (σ^-) соответственно. ДГ движется снизу вверх. Эти фотографии наглядно показывают отсутствие влияния поляризации импульса накачки на движение ДГ. Следовательно, наблюдаемое нами

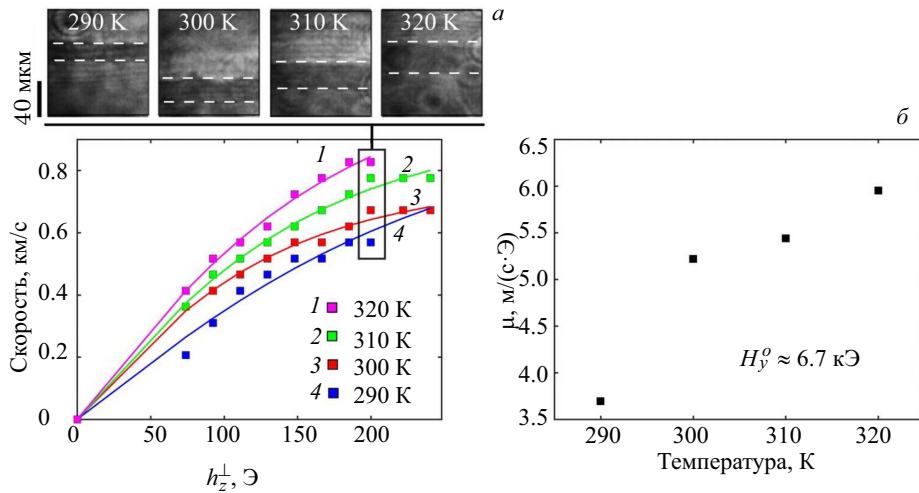


Рис. 4. Динамика доменной границы при нагревании вблизи комнатной температуры: *а* — скорость движения доменной границы в зависимости от амплитуды импульсного магнитного поля h_z^\perp . Измерения проводили в присутствии плоскостного магнитного поля $H_y^0 \approx 6.7$ кЭ и нескольких температурах образца. Сплошные цветные линии рассчитаны по формуле (1). Фотографии в верхней части рисунка соответствуют точкам данных в прямоугольной рамке на графике ($h_z^\perp \approx 200$ Э). Белые пунктирные линии на фотографиях показывают начальное и конечное положения границы, которая движется снизу вверх; *б* — подвижность доменной границы, полученная из данных рисунка *а* с использованием уравнения (1) в зависимости от температуры [16]

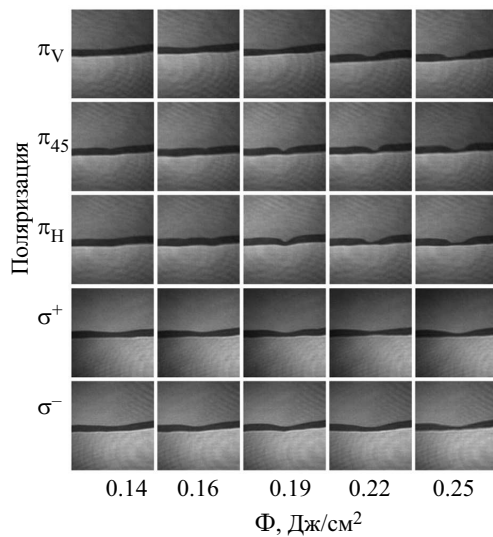


Рис. 5. Влияние импульса накачки разных поляризаций на движение доменной границы. Двукратные фотографии показывают влияние импульсов накачки различных энергий на динамическую доменную границу для пяти различных состояний поляризации возбуждающего импульса: три вида линейной поляризации: вертикальная (π_V), горизонтальная (π_H) и промежуточная (45°); а также правой (σ^+) и левой круговой (σ^-) поляризации соответственно [16]

явление носит тепловой характер, поэтому следующим этапом исследований было изучение влияния однородного нагрева на динамику ДГ.

1.3. Динамика ДГ при однородном нагревании вблизи комнатной температуры

Для изучения влияния однородного нагрева на движение ДГ была исследована динамика границы при различных температурах образца немного выше комнатной. По предварительным оценкам оптические импульсы, используемые в нашем эксперименте, вызывают локальный нагрев образца не более чем

на 30 К [17]. Измерения проводили для нескольких амплитуд импульсного поля h_z^\perp . Фотографии, представленные в верхней части рис. 4, *а*, наглядно демонстрируют, что при фиксированной амплитуде импульсного магнитного поля скорость движения ДГ увеличивается при нагревании. Данные, полученные после обработки серии фотографий, были аппроксимированы уравнением, которое было ранее получено авторами работы [18] и использовано для описания динамики ДГ в [19]:

$$v(h_z^\perp) = \frac{\mu h_z^\perp}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu h_z^\perp}{v_{\max}}\right)^2}} \quad (1)$$

Здесь μ — подвижность ДГ, определяемая как тангенс угла наклона начального линейного участка зависимости $v(h_z^\perp)$, а v_{\max} — скорость насыщения ДГ. Полученные значения подвижности представлены на рис. 4, *б* в зависимости от температуры образца. Эти результаты согласуются с ранее опубликованными данными [20] и показывают, что однородный нагрев приводит к увеличению подвижности ДГ.

Поскольку однородный нагрев приводит к ускорению ДГ, на следующем этапе исследований в качестве возможной причины торможения ДГ после действия импульса накачки было рассмотрено локальное перемангничивание, вызванное мощным оптическим импульсом.

1.4. Оптическое перемангничивание в ферритах-гранатах

Ранее уже было отмечено, что временное разрешение нашей установки определяется задержкой между первым и вторым зондирующими импульсами и составляет 35 нс, поэтому все события, происходящие внутри этого временного интервала, остаются невидимыми для нас. Очевидно, что эти события могут влиять на наблюдаемый результат.

Например, если результатом воздействия импульса накачки является формирование локальной доменной структуры, то преобразование этой структуры под действием импульса магнитного поля, управляющего динамикой ДГ, может привести к такому изменению положения границы, которое может быть ошибочно интерпретировано как изменение скорости ее движения.

Формирование локальной доменной структуры после воздействия импульса накачки в геометрии, аналогичной геометрии нашего эксперимента, ранее было описано в работе [17]. На рис. 6, а показана серия фотографий, демонстрирующих результат влияния импульса накачки разной энергии в присутствии плоскостного поля H_y^0 на однородно намагниченную область. Чем выше энергия возбуждающего импульса и величина плоскостного поля, тем больше размер перемагниченной области, вид которой меняется от круглого домена до системы концентрических колец. Если импульс накачки с достаточно высокой энергией действует на статическую ДГ, то перемаг-

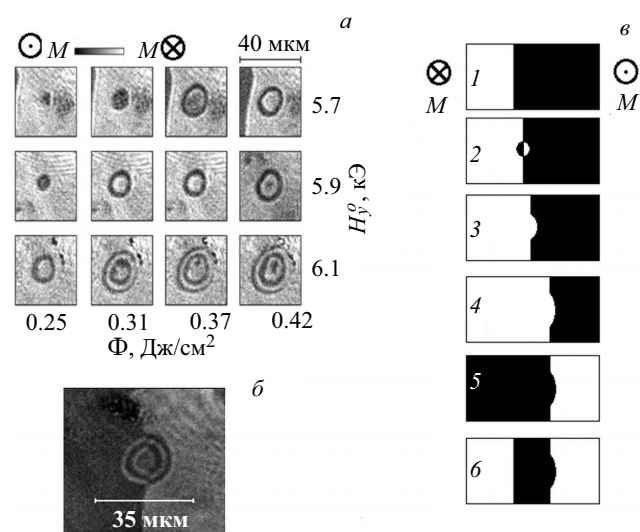


Рис. 6. Оптическое перемагничивание в феррите-гранате: а — серия фотографий, демонстрирующих результат влияния импульса накачки разной энергии в присутствии плоскостного поля H_y^0 на однородно намагниченную область. Фотографии сделаны через 3.45 нс после действия импульса накачки [17]; б — фотография, демонстрирующая влияние импульса накачки на двухдоменную область, сделана через 3.45 нс после действия оптического импульса с энергией 0.31 Дж/см² в присутствии плоскостного магнитного поля $H_y^0 = 6.1$ кЭ; в — схематичное изображение эволюции доменной структуры после локального перемагничивания, которое вызвано действием импульса накачки, в присутствии импульсного магнитного поля управляющего движением доменной границы: 1 — положение динамической доменной границы, которое фиксирует первый зондирующий импульс; 2 — возникновение локальной доменной структуры примерно через 3.45 нс после действия импульса накачки, аналогично той, которая представлена на рис. 6, б; 3 — изменение доменной структуры под действием импульсного магнитного поля; 4 — положение доменной границы, которое фиксирует второй зондирующий импульс; 5 — предыдущее изображение, выполненное в обратном контрасте; 6 — схематичное изображение двукратной фотографии доменной границы (объединение изображений 1 и 5)

ниченная область выглядит так, как показано на рисунке рис. 6, б. В работе [17] было показано, что локальная доменная структура возникает примерно через 3.45 нс после воздействия импульса накачки, т.е. если это событие происходит в условиях нашего эксперимента, оно остается для нас невидимым. Рассмотрим, может ли локальное перемагничивание быть причиной наблюдаемого торможения ДГ. На рис. 6, в схематично показана эволюция доменной структуры в этом случае. На рис. 6, в-1 показано положение динамической ДГ, которое фиксирует первый зондирующий импульс. На рис. 6, в-2 показано возникновение локальной доменной структуры через 3.45 нс после влияния импульса накачки. Эта структура аналогична той, которая представлена на рис. 6, б. Поскольку действие происходит в присутствии импульсного магнитного поля, управляющего движением ДГ и способствующего расширению светлого домена за счет темного, через некоторое время после локального перемагничивания возникший маленький темный домен исчезает за счет расширения светлого (рис. 6, в-3 и 4). Если предположить, что рис. 6, в-4 — это изображение доменной структуры, полученное после действия второго зондирующего луча, то для создания двукратной фотографии, которая схематично показана на рис. 6, в-6, рис. 6, в-4, нужно изобразить в обратном контрасте так, как показано на рис. 6, в-5. Таким образом, на двукратной фотографии, схематично изображенной на рис. 6, в-6, наблюдается уширение темной полосы, которая показывает расстояние, пройденное ДГ за интервал времени между двумя световыми импульсами, что можно интерпретировать как ускорение ДГ. Поскольку это противоречит тому, что мы наблюдали в эксперименте, очевидно, что локальное перемагничивание, вызванное действием импульса накачки в присутствии плоскостного магнитного поля, не может быть причиной торможения ДГ.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рис. 7 объединяет результаты всех экспериментов [16]. Импульсы накачки малой мощности не оказывают заметного влияния на динамику ДГ. При увеличении мощности импульса накачки влияние оптически возбуждения на движущуюся ДГ особенно заметно при скоростях движения границы, меньше некоторой критической величины. В этом случае относительное уменьшение скорости движения ДГ может достигать 40–50 %. На рис. 7 области с заметным влиянием света на динамику ДГ и без него разделены красной пунктирной линией.

Поскольку замедление ДГ, вызванное импульсом накачки, нельзя объяснить ни локальным нагревом, ни локальным перемагничиванием, причина торможения ДГ может быть связана с изменением ее внутренней структуры после действия возбуждающего импульса. Известно, что структура статической и динамической ДГ различны [21, 22]. В движущейся блоховской ДГ намагниченность приобретает компоненту перпендикулярную плоскости границы. Величина этой компоненты возрастает с ростом скорости движения ДГ. Резкое уменьшение анизотропии после действия импульса накачки изменяет

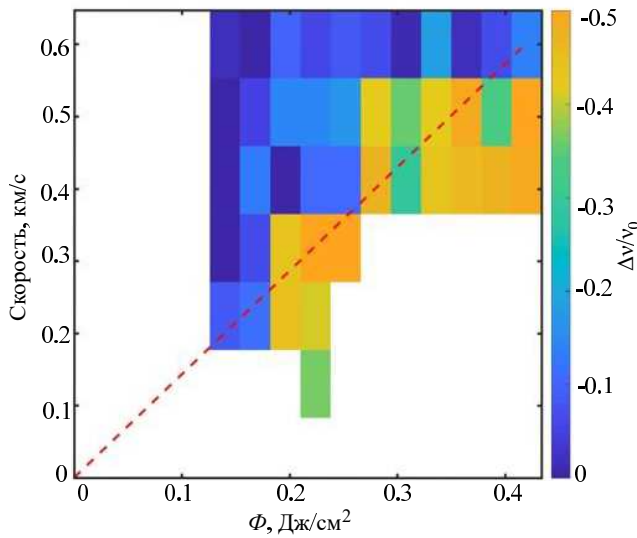


Рис. 7. Относительное изменение скорости движения доменной границы, индуцированное светом, как функция скорости границы и мощности импульса накачки. Цветовая шкала показывает величину относительного изменения скорости движения доменной границы. Красная пунктирная линия разделяет области с заметным влиянием импульса накачки на динамику доменной границы и без него [16]

величину и направление эффективного поля [17], что может привести к формированию неелевской границы внутри блоховской. Иначе говоря, результат воздействия мощного оптического импульса на динамическую ДГ — это появление внутри ДГ магнитных вихрей (вертикальных блоховских линий (ВБЛ)). Подвижность ДГ разного типа различна, поэтому положение ВБЛ внутри динамической ДГ можно определить по положению уединенной волны, сопровождающей ВБЛ. Эта волна отстает как целое от движущейся границы [21, 23].

На рис. 8, а схематично показана структура блоховской доменной границы, содержащей две пары ВБЛ с противоположными по знаку топологическими зарядами (синие и красные области на рис. 8, а). Направление вращения вектора M внутри ВБЛ может проходить как по, так и против часовой стрелки, эти области на рис. 8, а показаны желтыми и зелеными стрелками соответственно. Динамика ВБЛ в ДГ пленок ферритов-гранатов была исследована достаточно подробно экспериментально и теоретически [23–26]. Авторы работ [21] и [25] показали, что скорость движения ВБЛ вдоль ДГ определяется гироскопической силой F_g , величина которой пропорциональна скорости движения самой границы. При фиксированной скорости движения ДГ вихри с меньшим по модулю топологическим зарядом движутся быстрее. Ранее было отмечено, что положение вихря внутри динамической ДГ можно определить по положению уединенной волны, сопровождающей этот вихрь. Расчеты показали, что вихрь с минимальным топологическим зарядом, равным π , сопровождается уединенной волной с амплитудой порядка нескольких десятых мкм, что невозможно наблюдать с помощью магнитооптики.

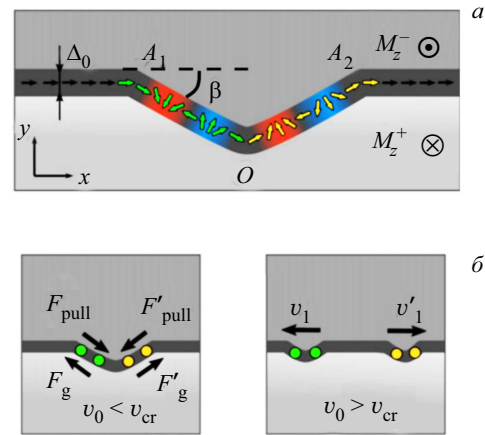


Рис. 8. Доменная граница с тонкой структурой в пленке феррита–граната. а — Структура кластеров вертикальных блоховских линий, возникающих в блоховской доменной границе. Желтые и зеленые стрелки показывают участки границы, в которых вращение вектора M происходит по и против часовой стрелки соответственно. Красным и синим цветом внутри доменной границы выделены области, которые содержат вихри с противоположными топологическими зарядами. Δ_0 — ширина доменной границы, $M_z^{+(-)}$ — направление намагниченности в доменах, β — угол изгиба доменной границы; б — на ВБЛ, возникшие внутри динамической доменной границы, действуют противоположно направленные силы: F_g и F_{pull} . Если скорость доменной границы $v_0 < v_{cr}$, ВБЛ образуют кластер, положение которого на доменной границе можно наблюдать экспериментально; в — если скорость границы $v_0 > v_{cr}$ ВБЛ не образуют кластер и движутся по отдельности [16]

В работе [16] было показано, что в условиях нашего эксперимента динамику ВБЛ определяет баланс двух сил, одна из которых (F_g) заставляет двигаться вихри в противоположных направлениях, а другая (F_{pull}) притягивает их друг к другу и стремится объединить в кластеры (рис. 8, б и в). Поскольку сила F_g пропорциональна скорости движения ДГ, а F_{pull} пропорциональна энергии импульса накачки, баланс этих сил позволяет получить линейную связь между скоростью движения ДГ и энергией импульса накачки, что и наблюдается в эксперименте (красная пунктирная прямая на рис. 7). Величина скорости v_{cr} , при которой влияние импульса накачки на динамическую ДГ становится заметно, согласно оценкам, выполненным в работе [16], составляет порядка 100 м/с. Следует отметить, что преобладание гироскопической силы и распад вихрей на отдельные объекты, не позволяет наблюдать их в нашем эксперименте.

На рис. 9 схематично показано влияние импульсов накачки с разной энергией (Φ) на доменную границу, движущуюся с разными скоростями ($V_{дг}$). Область воздействия возбуждающего импульса выделена оранжевым цветом. Линия 1 на всех рисунках показывает положение ДГ, которое фиксирует первый зондирующий импульс до действия импульса накачки. Линия 2 показывает ускорение границы, вызванное локальным нагревом после действия импульса накачки. Чем больше энергия импульса накачки, тем сильнее локальный нагрев динамической ДГ, следовательно, скорость движения границы возрастает сильнее. Чем больше скорость движения

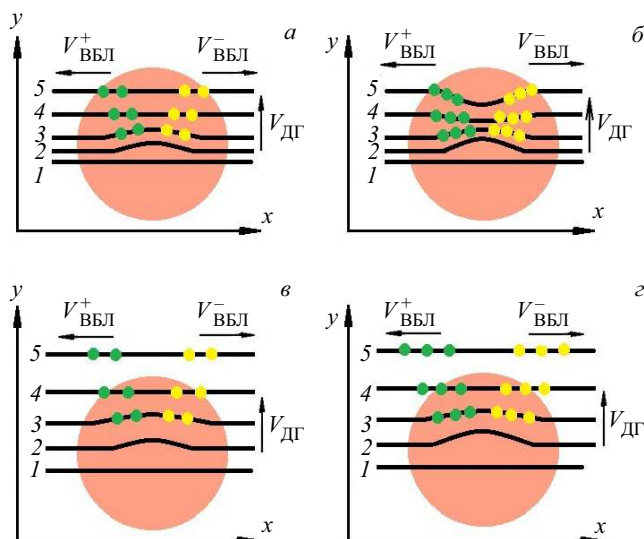


Рис. 9. Схематичное изображение влияния импульсов накачки на динамическую доменную границу. Область воздействия импульса накачки выделена оранжевым цветом. Линия 1 — положение доменной границы до действия импульса накачки, линия 2 — локальное ускорение границы, вызванное нагревом после действия импульса накачки, линия 3 — формирование пар вертикальных блоховских линий с противоположными по знаку топологическими зарядами (желтые и зеленые круги), линии 4 и 5 — движение ДГ с тонкой структурой. $V_{ДГ}$ — скорость движения ДГ, $V_{ВБЛ}^{+(-)}$ — скорость движения ВБЛ с противоположными по знаку топологическими зарядами, Φ — энергия импульса накачки. а — $V_{ДГ} = 0.2$ км/с, $\Phi = 0.14$ Дж/см²; б — $V_{ДГ} = 0.2$ км/с, $\Phi = 0.25$ Дж/см²; в — $V_{ДГ} = 0.6$ км/с, $\Phi = 0.16$ Дж/см²; г — $V_{ДГ} = 0.6$ км/с, $\Phi = 0.41$ Дж/см²

границы, тем больше угол выхода вектора M из плоскости границы. Это приводит к формированию пар ВБЛ — тонкой структуры доменной границы. Иначе говоря, чем больше энергия импульса накачки (рис. 9, б и г), тем больше вихрей возникает внутри ДГ. Линия 3 показывает ДГ с тонкой структурой. ВБЛ с равными по модулю и противоположными зарядами (желтые и зеленые круги) движутся в противоположных направлениях с равными по модулю скоростями ($V_{ВБЛ}^{+(-)}$). Скорость вихрей зависит от скорости движения ДГ: чем больше скорость границы, тем быстрее движутся внутри нее вихри (рис. 9, в и г). Ранее уже было отмечено, что участки доменной границы, содержащей ВБЛ, имеют меньшую подвижность, поэтому ускорение границы, вызванное локальным нагревом, компенсируется торможением из-за наличия ее тонкой структуры (линии 4 и 5 на рис. 9, а). Если энергия импульса накачки велика, возникшие внутри ДГ ВБЛ образуют кластеры, что в случае малой скорости границы приводит к преобладанию торможения ДГ (линия 5 на рис. 8, б). Если скорость движения ДГ велика (рис. 9, в и г), она быстрее покидает нагретую область. ВБЛ, возникшие внутри границы, не образуют кластеры, поскольку скорость их движения вдоль ДГ велика. В этом случае наличие тонкой структуры ДГ компенсирует ускорение, вызванное нагревом, и не приводит к заметному торможению границы (линии 4 и 5 на рис. 9, в и г). Линия 5 на рис. 9, а–г показывает положение ДГ, которое в экс-

перименте фиксирует второй зондирующий импульс. Таким образом, рассматривая линию 5 и линию 1 на рис. 9, а–г можно получить положения ДГ, которые мы наблюдаем в эксперименте с помощью двух лучей зондирования.

К сожалению, условия нашего эксперимента не позволяют определить точное время, необходимое для рождения пары вихрей, а также время, необходимое для объединения отдельных вихрей в кластеры. Кроме того, для более корректного рассмотрения необходимо учитывать то, что температура возбужденной области за время, прошедшее между импульсом накачки и вторым импульсом зондирования, постепенно восстанавливается, а это значит, что изменившиеся характеристики материала возвращаются к исходным значениям, что, безусловно, отражается на динамике ДГ. Для более детального исследования процессов, происходящих в системе, необходимо провести эксперименты с меньшим временем задержки между импульсом накачки и вторым зондирующим импульсом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода, объединяющего двукратную фотографию и метод накачки-зондирования, было показано, что при определенных значениях энергии импульса накачки и скорости движения доменной границы оптический импульс вызывает торможение границы, величина которого может составлять до 50% скорости. Этот результат не связан с локальным перемагничиванием, не зависит от поляризации импульса накачки, и его нельзя объяснить локальным нагревом материала, поскольку увеличение температуры приводит к росту подвижности доменной границы. Для объяснения торможения границы под действием оптического импульса была предложена модель, согласно которой к уменьшению скорости границы приводит изменение ее внутренней структуры.

Авторы благодарят Т. Тоонена, С. Семина, К. Берхута за техническую поддержку, а также О. Третьякова за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van De Wiele B., Leliaert J., Franke K.J. A., Van Dijken S. // New J. Phys. 2016. **18**, N 3. 033027.
2. Van Dijken S., Hämmäläinen S. J., Franke K.J. A. et al. // Phys. Rev. 2015. **5**, N 1. 011010.
3. Shibata J., Tatara G., Kohno H. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2011. **44**, N 38. 384004.
4. Kim K.J., Yoshimura Y., Ono T. // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. **56**, N. 8. 0802A4.
5. Grollier J., Chanthbouala A., Matsumoto R. et al. // Comptes Rendus Phys. 2011. **12**, N 3. P. 309.
6. Lambert C-H., Mangin S., Varaprasad B. S. D. Ch. S. et al. // Science. 2014. **345**, N 6202. P. 1337.
7. Quessab Y., Medapalli R., El Hadri M. S. et al. // Phys. Rev. B. 2018. **97**, N 5. 054419.
8. Medapalli R., Afanasiev D., Kim D.K. et al. // Phys. Rev. B. 2017. **96**, N 22. 224421.
9. Janda T., Roy P. E., Otxoa R. M. et al. // Nat. Commun. 2017. **8**, N 15226. P. 1.

10. *Lalieu M.L.M., Lavrijsen R., Koortmans B.* // Nat. Commun. 2019. **10**, N 1. P. 110.
11. *Stupakiewicz A., Maziewski A., Davidenko I., Zablotskii V.* // Phys. Rev. B — Condens. Matter Mater. Phys. 2001. **64**, N 6. 064405.
12. *Ogawa N., Koshibae W., Beekman A.J.* et al. // Proc Natl Acad Sci. USA. 2015. **112**, N 29. P. 8977.
13. *Pfau B., Schaffert S., Muller L.* et al. // Nat. Commun. 2012. **3**, N 1. P. 1100.
14. *Герасимов М.В., Ильин С.В., Логунов М.В.* и др. // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 5. С. 106.
15. *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б.* // ФТТ. 2010. **52**, № 9. С. 1795.
16. *Prabhakara K.H., Shapaeva T.B., Davydova M.D.* et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2021. **33**. 075802.
17. *Davies C.S., Prabhakara K.H., Davydova M.D.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2019. **122**, N 2. P. 027202.
18. *Иванов Б.А., Кулагин Н.К.* // ЖЭТФ. 1997. **112**. С. 953.
19. *Четкин М.В., Курбатова Ю.Н., Шапаева Т.Б.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. **74**, № 10. С. 1480.
20. *Боков В.А., Волков В.В.* // ФТТ. 2008. **50**, № 2. С. 193.
21. *Bar'jakhtar V.G., Chetkin M.V., Ivanov B.A., Gadetskiy S.N.* Dynamics of Topological Magnetic Solitons. (Springer tracts in modern physics, Berlin), **129**, 1994.
22. *Шамсутдинов М.А., Ломакина И.Ю., Назаров В.Н., Харисов А.Т.* Ферро- и антиферродинамика. М.: Наука, 2009.
23. *Четкин М.В., Смирнов В.Б., Попков А.Ф.* и др. // ЖЭТФ. 1988. **94**, № 11. С. 164.
24. *Morris T.M., Zimmer G.J., Humphrey F.B.* // J. Appl. Phys. 1976. **47**. P. 721.
25. *Звездин А.К., Попков А.Ф., Ярема И.П.* // ЖЭТФ. 1990. **98**. С. 1070.
26. *Hubert A.* // AIP Conference Proceedings. 1974. **18**, N 1. P. 178.

Domain Wall Deceleration in a Ferrite–Garnet Film by Femtosecond Laser Pulses

K. H. Prabhakara^{1,a}, T. B. Shapaeva^{2,b}, M. D. Davydova^{3,c}, K. A. Zvezdin^{3,d}, A. K. Zvezdin⁴, C. S. Davies¹, A. I. Kirilyuk¹, Th. Rasing¹, A. V. Kimel¹

¹*Radboud University, Institute for Molecules and Materials, 6525 AJ, Nijmegen, the Netherlands*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 141700, Dolgoprundy, Russia*

⁴*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia*

E-mail: ^at.b.shapaeva@gmail.com, ^bshapaeva@mail.ru, ^cdavydova@phystech.edu, ^dzvezdin.ka@phystech.edu

Using a method that combines double high-speed photography and a pump-probe method, it was found that a femtosecond laser pulse is able to change the domain wall velocity in a ferrite film. The combination of these methods was used for the first time. The change in the velocity of the domain wall depends on both the energy of the pump pulse and the domain wall velocity itself, and does not depend on the pump pulse polarization. This result is not associated with local magnetization reversal and cannot be explained by local heating of the material, since a temperature increase leads to an increase of the domain wall mobility. To explain the results, we propose a model in which the domain wall velocity is controlled by the photo-induced generation of vertical Bloch lines.

Keywords: double high-speed photography, pump-probe technic, optical magnetization reversal, domain wall dynamics, vertical Bloch lines.

PACS: 75.40.Gb, 75.60.Ch, 75.60.Jk, 75.70.Kw.

Received 28 July 2021.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2021. 76, No. 6. Pp. 447.*

Сведения об авторах

1. Прабхакара Киран Хорабаил — PhD, аспирант; тел.: (495) 939-50-40, e-mail: t.b.shapaeva@gmail.com.
2. Шапаева Татьяна Борисовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: shapaeva@mail.ru.
3. Давыдова Маргарита Дмитриевна — аспирантка; тел.: (495) 939-50-40, e-mail: davydova@phystech.edu.
4. Звездин Константин Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-40, e-mail: zvezdin.ka@phystech.edu.
5. Звездин Анатолий Константинович — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-50-40, e-mail: zvezdin@gmail.com.
6. Девис Карл — PhD, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-40, e-mail: t.b.shapaeva@gmail.com.
7. Кирилук Андрей Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-50-40, e-mail: a.kirilyuk@science.ru.nl.
8. Райзинг Тео — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-50-40, e-mail: t.b.shapaeva@gmail.com.
9. Кимель Алексей Вольдемарович — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-50-40, e-mail: a.kimel@science.ru.nl.