

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ И ЗАРОЖДЕНИЕ СУБМИКРОННЫХ МАГНИТНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕТОДАМИ ЛОКАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. С. Логгинов, А. В. Николаев, Е. П. Николаева, В. Н. Онищук*

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

Поступила в редакцию 9 августа 1999 г.

Экспериментально и теоретически исследуется эффект зарождения вертикальных линий Блоха в магнитной пленке феррита-граната под действием импульсного оптического излучения. Методами высокоскоростной фотографии и анизотропной темнопольной микроскопии изучены особенности зарождения линий Блоха и процессы релаксации доменной структуры после локального воздействия импульса лазера. Установлены оптимальные параметры оптического воздействия, обеспечивающие контролируемое зарождение линий Блоха. Развивается теоретическая модель, связывающая природу зарождения блоховских линий с движением доменных границ, вызванным локальным изменением распределения полей размагничивания в результате температурного уменьшения намагниченности в месте фокусировки оптического излучения. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности контролируемого зарождения магнитных структур размером меньше или порядка 0.1 мкм путем локального оптического воздействия.

PACS: 75.60.Ch, 75.70.Kw

1. ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация устройств магнитной памяти, уменьшение «размера бита» и увеличение плотности хранения данных делают актуальным поиск новых физических механизмов и способов записи-считывания информации в магнитной среде и требуют детального понимания поведения намагниченности на масштабах порядка десятков и сотен нанометров [1]. Среди различных подходов к детектированию, модификации и исследованию магнитной структуры вещества на субмикронном уровне особый интерес представляют оптические методы. Это обусловлено как интересом к фундаментальным аспектам взаимодействия вещества с электромагнитным излучением, так и практическими нуждами развития новых поколений устройств с оптической и термомангнитной записью информации.

В связи с этим представляют интерес впервые описанные в [2] новые физические эффекты зарождения и продвижения вертикальных блоховских линий в доменной границе в пленке феррита-граната под действием сфокусированного лазерного излучения. Линии Блоха представляют собой устойчивые магнитные вихри, разделяющие участки доменной границы противоположной полярности [3]. Характерный размер вертикальных блоховских линий — десятые и сотые доли микрометра.

Суть перечисленных эффектов состоит в том, что воздействие однократного лазерного импульса (имеющего длительность $\simeq 10$ нс и сфокусированного в центр полосового домена в область диаметром порядка 3–4 мкм) по мере увеличения его энергии вызывает 1) перемещение вертикальных блоховских линий в доменной границе; 2) зарождение пары вертикальных блоховских линий на исходно свободных от линий границах; 3) необратимое изменение формы доменной стенки и доменной структуры в целом.

*E-mail: asl@osc.phys.msu.su

В отличие от традиционной техники термомагнитной записи (в которой записывается магнитный домен, и его размер определяется, как правило, эффективным диаметром сфокусированного лазерного пучка или искусственно созданным потенциальным рельефом [4, 5]), обнаруженные в [2] эффекты демонстрируют возможность зарождения устойчивой структуры внутри доменной стенки (имеющей размер $\lesssim 0.1$ мкм) за счет действия лазерного луча, сфокусированного в область размером в единицы микрон.

Настоящая работа является развитием работы [2] и посвящена определению параметров оптического воздействия и уточнению его физического механизма, позволяющего реализовать контролируемое зарождение линий Блоха, а также более подробному описанию оригинальной экспериментальной методики, реализованной в этих целях.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе был использован образец пленки феррита-граната, выращенный на подложке ориентации $\langle 111 \rangle$ и имеющий состав $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$. Образец имеет следующие параметры: намагниченность насыщения $4\pi M_s = 173$ Гс; поле коллапса $H_{col} = 126$ Э; период равновесной полосовой структуры 8.5 мкм; толщина пленки 7.5 мкм; фактор качества $Q = 3.8$.

Эксперимент проводился на основе объединения методов высокоскоростной фотографии и анизотропного темнопольного наблюдения (PADO — polarized anisotropic dark-field observation).

Метод высокоскоростной фотографии позволяет исследовать в реальном масштабе времени быстрые динамические процессы преобразования доменных структур [6, 7]. Для визуализации структуры намагниченности в фиксированные моменты времени после начала исследуемого динамического процесса, инициированного каким-либо внешним воздействием, образец подсвечивается коротким импульсом поляризованного света. Длительность импульса подсветки выбирается много меньше характерного времени изучаемого процесса. Получаемое магнитооптическое изображение представляет собой «мгновенное» распределение намагниченности, возмущенной внешним воздействием. Варьируя время задержки между началом воздействия и импульсом подсветки, можно проследить эволюцию этого возмущения.

Для контроля внутренней структуры доменной границы и визуализации вертикальных линий Блоха, размер которых лежит ниже предела пространственного разрешения стандартной «светлопольной» магнитооптической микроскопии, применялось анизотропное темнопольное наблюдение. В этом методе луч подсветки в микроскопе падает на образец под некоторым углом и минуя объектив, а изображение формируется только светом, рассеянным на доменной границе за счет эффекта магнитооптической дифракции и несущим информацию о мелкомасштабных неоднородностях намагниченности (см. вставку на рис. 1) [8, 9]. Плоскость падения света перпендикулярна плоскости доменной границы. При этом граница выглядит как светлая полоса на темном фоне, локальные изменения яркости изображения доменной границы трактуются как места локализации вертикальных блоховских линий (см. рис. 2, контраст изображения инвертирован, линии Блоха отмечены стрелочками).

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источником оптического воздействия, модифицирующего структуру доменной границы, является азотный лазер ЛГИ-21 (1) с длиной волны $\lambda \simeq 337$ нм и длительностью импульса $\tau \simeq 10$ нс. Излучение лазера фокусируется кварцевой линзой 2 в кювету 3 с раствором красителя родамин 6Ж и переизлучается на длине волны $\lambda \simeq 540$ нм. Момент излучения и его интенсивность контролируются лавинным фотодиодом. Излучение красителя после прохождения системы поляризаторов 4, 6 фокусируется объективом 7 с числовой апертурой 0.2 на образец 8. Диаметр сфокусированного пучка при этом составляет около 4 мкм. Внесение перед объективом дополнительных линз позволяет уменьшить или увеличить диаметр сфокусированного пятна. Позиционирование сфокусированного пучка на образце проводится прецизионными механическими подачами объектива. Световой импульс, переизлученный красителем и попадающий на образец («записывающий» импульс), имеет максимальную энергию $W_{max} \sim 10^{-6}$ Дж (при нестабильности около 15%). Плавное изменение амплитуды (энергии) светового импульса достигается путем изменения взаимного углового положения системы поляризаторов 4, 6 (см. рис. 1).

Для визуализации структурных изменений намагниченности в результате воздействия «записывающего» импульса лазера 1 снова используется оптическая подсветка, осуществляемая вторым импульсным лазером ЛГИ-21 (14), излучение которого (после преобразования длины волны красителем окса-

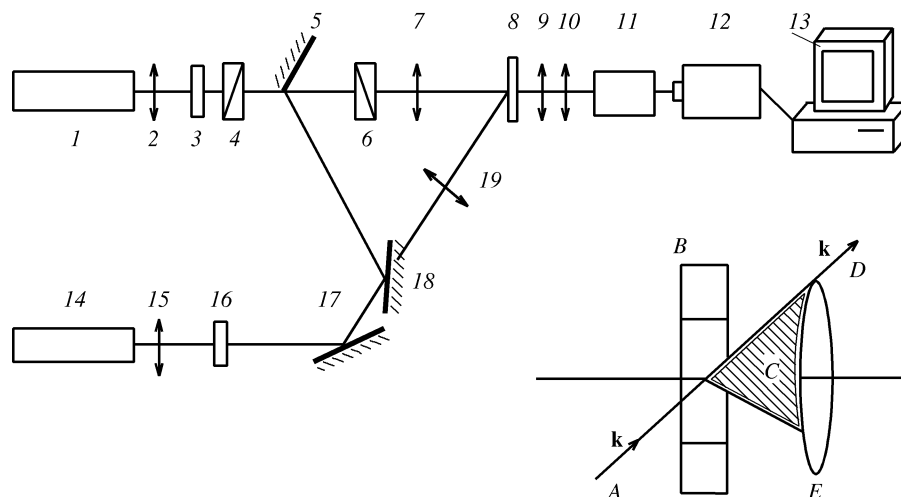


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки высокоскоростной фотографии и анизотропной темнопольной подсветки: 1, 14 — импульсные азотные лазеры ЛГИ-21; 2, 15 — кварцевые линзы; 3, 16 — кварцевые кюветы с красителями соответственно родамин и оксазин; 4, 6 — кристаллические поляризаторы; 5, 17, 18 — зеркала; 7, 19 — фокусирующие объективы; 8 — образец; 9, 10 — поляризационный микроскоп; 11 — электронно-оптический преобразователь с усилителем яркости изображения; 12 — видеокамера на ПЗС-матрице; 13 — компьютер. На вставке показана оптическая схема односторонней темнопольной подсветки: *A* — падающий пучок; *B* — образец; *C* — дифрагировавший пучок; *D* — прямой пучок; *E* — объектив

зин) разделяется полупрозрачным зеркалом 18 на два канала (см. рис. 1). Один канал выводится на оптическую ось, совпадающую с осью первого лазера ЛГИ-21, и используется для прямой (светлопольной) подсветки образца и регистрации доменной структуры в геометрии магнитооптического эффекта Фарадея. Излучение во втором канале направляется на образец под углом так, чтобы был реализован режим односторонней темнопольной подсветки. Такая организация оптической схемы позволяет использовать как светлопольную, так и темнопольную геометрию для наблюдения одного и того же участка образца и визуализации магнитных структур разного пространственного масштаба. Используя метод высокоскоростной фотографии и изменяя время задержки между «записывающим» импульсом и импульсом подсветки, можно проследить динамические процессы в доменной структуре и характер изменения внутренней структуры доменной стенки.

Получаемые доменные структуры наблюдаются в поляризационный микроскоп 9, 10 и регистрируются при помощи электронно-оптического преобразователя 11 с усилителем яркости изображения и видеокамеры 12 на ПЗС-матрице, сопряженной с компьютером 13.

Перед началом эксперимента путем размагничи-

вания образца из монодоменного состояния в присутствии постоянного магнитного поля (направленного в плоскости магнитной пленки) создавалась равновесная решетка полосовых доменов, стенки которых свободны от вертикальных блоховских линий.

Эксперименты проводились по следующему алгоритму. Видеокамерой, соединенной с компьютером, на экране монитора создавалось исходное изображение доменных стенок, полученное методом односторонней темнопольной подсветки. Затем генерировался однократный «записывающий» импульс лазера заданной энергии, после чего с помощью светлопольного или темнопольного наблюдения фиксировались динамические преобразования в доменной структуре или внутренней структуре доменной границы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1. Влияние параметров оптического воздействия на зарождение линий Блоха

Зарождение линий Блоха в условиях эксперимента [2] не имело регулярного характера. При фиксированных параметрах воздействия не каждый импульс лазера приводил к образованию вертикаль-

Рис. 2. Типичные изображения линий Блоха, зарождающихся в доменных границах после воздействия «записывающего» импульса лазера. Знак \otimes показывает место фокусировки лазера, вертикальные блоховские линии отмечены стрелками. Фотографии получены в одностороннем темном поле, контраст инвертирован

ных блоховских линий. В настоящей работе установлены закономерности, связывающие воспроизводимость результатов со степенью фокусировки оптического излучения, с взаимным расположением области фокусировки и доменных границ, с энергией фокусируемого излучения.

3.1.1. Влияние степени фокусировки оптического излучения на вероятность зарождения вертикальных блоховских линий при его локализации в центре полосового домена

Воздействие сфокусированного в центр домена лазерного пучка диаметром 4 мкм и с энергией импульса $W \simeq 0.2W_{max}$ приводит к зарождению пары вертикальных блоховских линий на исходно свободных от линий границах. На рис. 2 представлены типичные темнопольные изображения, получаемые после однократного воздействия импульса (место фокусировки пучка показано знаком \otimes). Как видно, на стенках образуются области измененного контраста, соответствующие парам линий Блоха. По своему виду в одностороннем темном поле и по динамической реакции на импульсы поля в плоскости магнитной пленки и поля смещения они идентичны линиям, зарождающимся в доменных границах «традиционным» способом — при движении границы со скоростью, превышающей критическую [3].

Сближение зарождающихся пар (например, при помощи импульсов поля, направленного в плоскости магнитной пленки вдоль границы) приводит к их аннигиляции. Отсюда следует, что пары являются незакрученными [3]. После однократного воздействия лазерного импульса зарождается максимально четыре вертикальные блоховские линии (две пары). Их количество и положение на доменной границе относительно места фокусировки пучка лазера заранее предсказать не удастся.

Вероятность зарождения пар вертикальных блоховских линий возрастает с увеличением амплитуды (энергии) оптического импульса, однако, начиная с некоторого уровня, дальнейшее увеличение энергии приводит к образованию дефектов магнитной пленки, тогда как зарождение линий по-прежнему остается нерегулярным.

При увеличении степени фокусировки луча — уменьшении размера пятна до 2–2.5 мкм — диапазон энергий, при которых отмечается зарождение вертикальных блоховских линий, но еще не наступают необратимые изменения структуры образца [2], заметно сокращается. Даже при сравнительно небольших энергиях светового импульса ($W < 0.2W_{max}$) наблюдается формирование дефектов образца. Добиться воспроизводимого зарождения вертикальных блоховских линий при этом не удастся.

Увеличение диаметра сфокусированного пятна до 4.5–5 мкм приводит к изменениям характера зарождения вертикальных блоховских линий. С ростом диаметра световое пятно начинает захватывать близлежащие доменные границы, и в результате однократного воздействия импульса лазера линии Блоха возникают преимущественно не на стенках, ближайших к местоположению луча, а на соседних с ними (см. рис. 3г). В этой геометрии зарождение вертикальных блоховских линий также носит нерегулярный характер и происходит с вероятностью, не достигающей единицы.

3.1.2. Влияние положения светового пучка относительно доменных границ на зарождение вертикальных блоховских линий

На рис. 4 представлена гистограмма вероятности зарождения вертикальных блоховских линий под действием светового импульса для различных положений пучка относительно доменной границы. Пучок смещается в направлении перпендикулярном доменной границе, начало отсчета оси x на рисунке соответствует центру доменной стенки. Диаметр

Рис. 3. Зарождение линий Блоха в результате воздействия лазерного пучка, сфокусированного в область диаметром 4.5 мкм. На фотографиях представлены: исходное изображение доменной структуры (а); мгновенные динамические конфигурации доменной структуры через 100 нс (б) и 300 нс (в) после приложения «записывающего» импульса лазера; результирующие пары вертикальных блоховских линий (з). Знак ⊗ показывает место фокусировки лазерного пучка. Фотографии (а) и (з) получены в одностороннем темном поле, контраст инвертирован

пучка в фокусе в данных экспериментах составляет около 3 мкм, мощность импульса $W = 0.2W_{max}$. Как видно из рисунка, зарождение блоховских линий имеет место при смещении центра пучка на 1.5–2 мкм относительно доменной границы и при некотором его положении вероятность зарождения вертикальных блоховских линий достигает единицы. Последняя определялась по 50–75 реализациям. Типичные фотографии, иллюстрирующие взаимное положение доменной границы и лазерного пучка при надежном зарождении линий Блоха, а также результирующую пару таких линий представлены на рис. 5м. Отметим, что пучок лазера несколько смещен от центра домена в сторону доменной стенки, но не захватывает ее.

3.1.3. Влияние мощности лазерного пучка на зарождение вертикальных блоховских линий

Вероятность зарождения линий Блоха в зависимости от мощности импульсов лазера рассмотрена для фиксированного положения пучка в окрестности точки надежной генерации вертикальных блоховских линий, определенной выше. При мощностях $W < 0.13W_{max}$ изменение внутренней структуры стенки не отмечается. Начиная с $W \simeq 0.15W_{max}$ наблюдается зарождение линий Блоха, а при $W > 0.16W_{max}$ вероятность зарождения существенно увеличивается (см. гистограмму на рис. 6). В то же время из рис. 6 видно, что только для одного значения W вероятность генерации составляет

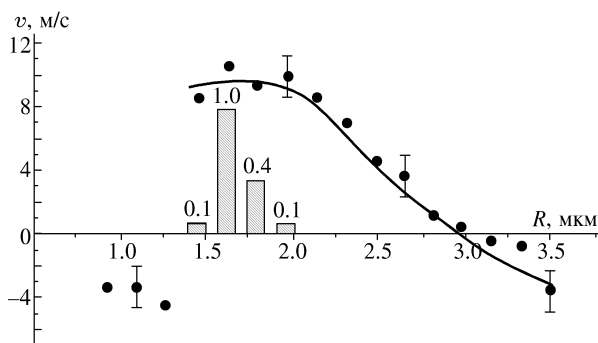


Рис. 4. Гистограмма вероятности зарождения линий Блоха и скорость v движения доменной границы в изгибе для различных положений R центра сфокусированного лазерного пучка относительно доменной границы. Энергия лазерного импульса $W = 0.2W_{max}$

точно единицу. Причина этого состоит в том, что эффект зарождения линий существенно зависит от положения пучка относительно доменной границы (на рис. 4 видно, что последовательные смещения центра пучка с шагом примерно 0.15 мкм вызывают сначала рост вероятности зарождения линий с 0.1 до 1, а затем падение до 0.4). В проводимых же экспериментах единственная возможность плавного изменения энергии импульсов состоит в изменении взаимного углового положения поляризаторов (см. рис. 1). При этом даже при тщательной юстировке оптической системы поворот поляризатора ведет к

Рис. 5. Мгновенные динамические конфигурации доменной структуры в различные моменты времени после приложения «записывающего» импульса лазера. Знак \otimes показывает место фокусировки лазера. Изображения получены: до импульса (*а, жс*); с задержками 100 нс (*б, з*); 300 нс (*в, и*); 700 нс (*г, к*); 1000 нс (*д, л*) относительно момента излучения импульса и после завершения динамических процессов (*е, м*). Блоховские линии отмечены стрелками. Фотографии (*а-е*) получены в геометрии прямой светлополюсной подсветки при скрещенных поляризаторах; *а жс-м* — при помощи метода темного поля (контраст изображений инвертирован)

неизбежному смещению центра сфокусированного пучка на образце и отходу от оптимальных условий зарождения вертикальных блоховских линий. Для точек гистограммы (см. рис. 6) с $W > 0.16W_{max}$ и вероятностью зарождения линий меньше единицы последовательная тонкая корректировка положения пучка с использованием прецизионных позиционеров дает возможность наблюдать зарождение пары линий Блоха с вероятностью единица.

3.2. Динамические процессы в доменной структуре и доменной границе после воздействия импульса лазера

Используемый в работе метод высокоскоростной фотографии позволяет в реальном масштабе времени провести исследование особенностей зарождения линий Блоха и динамических процессов, протекающих в доменной структуре и доменной границе после воздействия импульса лазера.

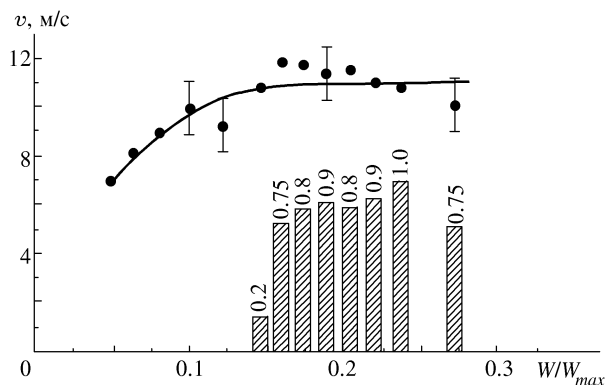


Рис. 6. Гистограмма вероятности зарождения линий Блоха и скорость v движения доменной границы в изгибе в зависимости от энергии импульсов лазера W для фиксированного положения пучка относительно доменной границы

На рис. 5 приведены характерные серии фотографий, демонстрирующие процессы в доменной границе и зарождение на ней пары вертикальных блоховских линий в результате воздействия импульса лазера в условиях, соответствующих их зарождению с вероятностью единица (при этом сфокусированный пучок смещен к одной из доменных границ относительно центра домена, см. п. 3.1.2). На рис. 5а–е представлены «мгновенные» конфигурации доменной структуры, полученные в геометрии прямой светлополюсной подсветки при скрещенных поляризаторах. Как видно на фотографиях, в месте фокусировки оптического импульса, отмеченного крестиком, возникает темная область, а ближайшая к пучку доменная стенка смещается, формируя изгиб. (В случае локализации пучка в центре домена наблюдается аналогичная картина с симметричным отклонением обеих границ, см. [2].) Изгиб нарастает в течение первых 200 нс после воздействия импульса лазера. Затем он медленно релаксирует к исходному состоянию за 1500–2000 нс одновременно с исчезновением темной области. Фотографии 5ж–м показывают тот же участок образца и тот же процесс при наблюдении методом темного поля, позволяющим визуализировать линии Блоха. При этом изгиб доменной границы выглядит как локальное изменение яркости изображения стенки, что затрудняет наблюдение точного места и момента зарождения пары линий Блоха. В то же время на рис. 5 видно перемещение блоховских линий от предполагаемого места их зарождения (в непосредственной близости от места локализации оптического пучка) к стационарному положению. На фотографиях линии Блоха становятся заметны на краях изгиба доменной границы спустя примерно 300 нс после приложения импульса лазера. В дальнейшем блоховские линии продолжают свое движение с постепенно убывающей скоростью и достигают конечного положения через 1500–2000 нс после воздействия «записывающего» импульса. На начальных этапах движения скорость линий Блоха составляет примерно 30 м/с.

Регистрация изгиба доменной границы в различные моменты после приложения импульса лазера позволяет построить график смещения границы в зависимости от времени и определить ее скорость. Характерные зависимости смещения доменной границы от времени в центре изгиба представлены на рис. 7. Графики соответствуют режимам фокусировки луча в центре домена (1) и вблизи доменной стенки (2). На зависимостях видны участки начального линейного смещения стенки, ее квазистабильного положения и, наконец, медленной релаксации к

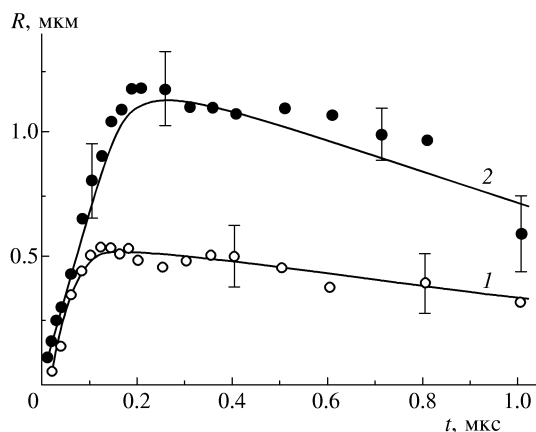


Рис. 7. Временная зависимость смещения доменной границы в центре изгиба при фокусировке лазерного пучка в центре домена (1) и вблизи доменной стенки (2) при энергии лазерного импульса $W = 0.2W_{max}$

исходному положению. Сравнивая кривые (1) и (2), можно заметить, что в случае фокусировки лазера вблизи доменной границы стенка движется дальше (смещаясь на большее расстояние), в то время как общий характер движения стенки и ее скорость на начальном этапе в обоих случаях одинаковы.

По временным графикам смещения доменной границы для различных энергий импульсов были получены кривые зависимости скорости ее движения от энергии W . Скорость определялась на начальном линейном участке движения. Характерная зависимость, полученная для случая локализации пучка вблизи границы, показана на рис. 6. (При симметричном положении пучка лазера относительно доменной границы график скорости ее движения в пределах ошибки измерений совпадает с представленным на рис. 6.) Для заданной энергии W определена скорость границы в зависимости от положения сфокусированного пятна относительно границы (см. график на рис. 4). Гистограммы на рис. 4 и 6 демонстрируют вероятности зарождения вертикальных блоховских линий, соответствующие экспериментальным точкам.

На графике рис. 4 видно, что в зависимости от локализации центра пучка относительно доменной границы ее скорость принимает положительные или отрицательные значения. Это соответствует различным типам искажения рассматриваемой границы после приложения импульса лазера и смене направления движения в зависимости от координаты сфокусированного пятна. Начало координат при этом

совмещено со статическим положением исследуемой границы. Движению доменной границы влево (при положении пучка справа от границы) соответствует положительный знак скорости, вправо — отрицательный. Сплошная линия на рис. 4, построенная методом наименьших квадратов в приближении к функции Гаусса, отражает основные тенденции изменения скорости границы. На рис. 8 представлены характерные динамические конфигурации доменных границ, иллюстрирующие изменение режима их движения при пошаговом смещении пучка лазера перпендикулярно границе (смещение пучка схематически представлено на вставках над фотографиями). Рисунок 8а соответствует положению центра сфокусированного пучка точно на доменной границе, которая в этом случае практически не смещается. При перемещениях пучка вправо таким образом, что его центр находится в домене, а край захватывает доменную границу, последняя смещается, «втягиваясь» в перегретую область (рис. 8б). Скорость движения доменной границы при этом невелика (рис. 4, $R = 0.9\text{--}1.3$ мкм). Как только левая граница пучка выходит за пределы доменной границы (рис. 8в), направление смещения границы меняется, а скорость достигает максимальных значений (рис. 4, $R = 1.5\text{--}2.0$ мкм). Форма изгиба доменных стенок в случае, когда лазерный пучок находится на примерно равном расстоянии от стенок, приведена на рис. 8г. При этом скорость доменной границы в пределах ошибки измерений не изменяется (рис. 4, $R = 2.0\text{--}2.2$ мкм). С дальнейшим сдвигом сфокусированного пятна смещение левой стенки уменьшается и меняет знак (рис. 8д, е). Соответствующее изменение скорости стенки и смена ее знака показаны на рис. 4, $R = 2.5\text{--}3.5$ мкм. На рис. 8е заметен характерный волнообразный изгиб доменной границы, соответствующий режиму, когда край лазерного пучка только начинает захватывать область границы.

Исследование динамики доменной границы после приложения импульса излучения, сфокусированного в области различного диаметра (см. п. 3.1.1), показывает, что если область фокусировки начинает захватывать доменные границы, они «втягиваются» в экспонированную область, рис. 3б, в. На рис. 3 можно заметить движение и следующей пары доменных стенок в направлении области фокусировки пучка. Как отмечалось выше, в используемой геометрии эксперимента возможно зарождение вертикальных блоховских линий не на стенках, ближайших к сфокусированному пучку, а на соседних с ними (см. рис. 3).

Рис. 8. Изменение режима движения доменных границ при пошаговом смещении пучка лазера перпендикулярно границам. Смещение пучка схематически приведено на вставках над фотографиями. Динамические изображения границ получены методом высокоскоростной фотографии с задержкой 80 нс после воздействия импульса лазера

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из представленных выше иллюстраций, локальное оптическое воздействие на пленку феррита-граната приводит к смещению участков доменной границы и (при определенных условиях) к зарождению на них линий Блоха. Согласно гипотезе, предложенной в [2], движение границ обусловлено локальным возмущением поля размагничивания образца. Темная область, представленная на рис. 3б, в, 5б–е и 8, возникает на участке образца с пониженным фарадеевским вращением, которое вызвано локальным уменьшением величины намагниченности насыщения пленки (а возможно, и переходом в парамагнитную фазу) из-за лазерного нагрева. Локальное изменение намагниченности при нагреве и последующем остывании существенно изменяет распределение полей размагничивания в этой области, что вызывает смещение близлежащей доменной границы. График смещения доменной границы в зависимости от времени (рис. 7) подтверждает «тепловую» гипотезу о характере ее движения: начальный этап движения соответствует быстрому разогреву магнитной пленки, сменяющемуся ее остыванием и расплыванием теплового пятна

с медленной релаксацией доменной границы к исходному положению. Расчет конфигурации доменной границы полосового домена в присутствии цилиндрической локальной немагнитной области показал хорошее качественное согласие предложенной физической модели и результатов эксперимента (см. ниже) [10].

Графики на рис. 4 и 6 позволяют проанализировать особенности зарождения линий Блоха в зависимости от характера движения доменной границы и ее скорости. Как видно, во всех режимах оптического воздействия, приводящих к зарождению блоховских линий, последнее ассоциировано с движением доменных стенок. В [2] выдвинуто предположение, что скорость движения доменной границы после оптического воздействия может превысить критическое значение, приводящее, согласно [3], к зарождению и прорыву петель горизонтальных блоховских линий с образованием пары вертикальных линий Блоха. В проведенных нами динамических экспериментах скорость доменной границы при зарождении вертикальных блоховских линий достигает 10–12 м/с. Эта величина (с учетом того, что движение доменной границы после лазерного воздействия происходит в изменяющихся температурных условиях) вполне соотносится со значением критической скорости границы, измеренным для данного образца при движении доменной границы в однородном импульсном поле смещения при 20°C и равным примерно 30 м/с. Отметим, что воспроизводимое зарождение линий Блоха требует не только движения доменной границы с некоторой критической скоростью, но и подбора оптимального диаметра сфокусированного лазерного пучка и его положения относительно доменной стенки. Это может быть обусловлено тем, что в рамках гипотезы прорыва горизонтальных блоховских линий с зарождением вертикальных [3] формирование горизонтальной блоховской линии и ее перемещение с одной поверхности магнитной пленки на другую занимает конечный промежуток времени. Как показали измерения (см. рис. 7), движение стенки в случае фокусировки пучка вблизи доменной границы занимает большее время по сравнению со случаем симметричного положения пучка. Возможно, это и обеспечивает наилучшую воспроизводимость процессов прорыва горизонтальных блоховских линий и зарождения вертикальных. Вместе с тем не следует исключать возможность как генерации термоупругих напряжений в месте воздействия импульса лазера, так и влияния упругой волны на процесс зарождения и прорыва горизонтальной блоховской линии в зависимости

от расстояния между доменной границей и центром фокусировки лазера [11].

Наблюдение процесса зарождения вертикальных блоховских линий (рис. 5) показало, что пара линий Блоха может смещаться вдоль доменной границы со скоростью около 30 м/с (см. п. 3.2), что соответствует типичному значению в случае движения вертикальных блоховских линий под влиянием поля, приложенного в плоскости образца [12]. Механизм представленного на рис. 5 движения вертикальных блоховских линий может носить характер баллистического последвижения при диссипации энергии, запасенной в горизонтальной блоховской линии.

На рис. 5 видно также изменение темнопольного контраста доменной границы в области ее изгиба. Согласно модели формирования изображения доменной границы в условиях анизотропной темнопольной подсветки [13], изменение контраста стенки может быть вызвано изменением угла между плоскостью доменной границы и плоскостью падения света или искажением профиля стенки по толщине образца. В первом случае яркость изображения границы монотонно уменьшается от некоторого значения I_0 до нуля при изменении угла между плоскостью падения света и плоскостью доменной границы соответственно от 90° до 0°. При искажении вертикального профиля стенки ее изображение может иметь яркость как выше, так и ниже I_0 и существенно изменяться на малых расстояниях вдоль границы. Характер изменения контраста темнопольного изображения доменной границы на рис. 5 свидетельствует о сложном отклонении ее профиля от нормали к плоскости магнитной пленки в окрестности области фокусировки лазера. Другим подтверждением этого предположения, является видимое «размытие» границы в изгибе, заметное на мгновенных динамических фотографиях, полученных методом высокоскоростной фотографии в геометрии эффекта Фарадея со скрещенными поляризаторами.

В рамках проверки гипотезы о тепловой природе смещения доменных стенок после воздействия «записывающего» импульса [2] проведен расчет конфигурации доменной границы в присутствии немагнитной области [10].

При построении модели движения доменных границ ограничимся для простоты рассмотрением изолированного полосового домена, стабилизированного полем смещения. Пусть под действием светового луча, сфокусированного в малую область внутри домена, произошел ее нагрев, вследствие чего образовалась немагнитная цилиндрическая область. Эта область порождает дополнительное маг-

нитостатическое поле, искажающее доменные границы. Для расчета квазиравновесной формы доменов в условиях существования немагнитной области вычислим магнитостатическую энергию и найдем такую конфигурацию доменов, при которой эта энергия будет минимальной.

Функционал магнитостатической энергии имеет сложную структуру, определяемую распределением вектора намагниченности в самосогласованном магнитном поле, которое в свою очередь является функционалом от распределения намагниченности. Квазиравновесное распределение вектора намагниченности минимизирует функционал полной энергии. Решение данной функциональной задачи можно получить только приближенно, используя, например, метод пробных функций Ритца. В качестве первого приближения выберем распределение намагниченности, определяемое варьированием поля смещения в соответствии с влиянием неоднородного поля от немагнитной цилиндрической области в центре домена. В этом случае искажение формы доменных границ полосового домена будет определяться следующим трансцендентным уравнением:

$$\frac{H_0}{4\pi M_s} = \frac{2(r_0/h)^2}{[8(x/h)^2 + (w/h)^2]^{3/2}} + \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \arctg \frac{h}{w} - \frac{w}{h} \ln \left[1 + \left(\frac{h}{w} \right)^2 \right] \right\},$$

где H_0 — поле смещения, стабилизирующее уединенный полосовой домен, M_s — намагниченность насыщения, h — толщина магнитной пленки, w — ширина домена в некоторой точке x оси координат, направленной вдоль полосового домена и имеющей начало в центре немагнитной цилиндрической области, r_0 — радиус немагнитной области. Формула (1) представляет собой неявную зависимость ширины w полосового домена от координаты x .

На рис. 9а представлена форма полосового домена, полученная в соответствии с (1). Рисунок 9б иллюстрирует наблюдаемый экспериментально и приводящий к зарождению линий Блоха процесс расширения полосового домена после воздействия лазерного излучения. Центральную область на рисунках можно отождествить с немагнитной областью, образовавшейся в результате локального лазерного нагрева. Из рисунков видно качественное соответствие теории и эксперимента, что свидетельствует о справедливости теплового механизма движения доменных границ в результате воздействия лазерного излучения.

Рис. 9. Расчетная конфигурация формы доменной границы в присутствии локальной цилиндрической немагнитной области (а) и мгновенное динамическое изображение полосового домена, полученное в эксперименте через 100 нс после приложения импульса лазера (б)

Другим подтверждением ключевой роли терминдуцированного изменения полей размагничивания при движении доменных границ является наблюдаемое в эксперименте изменение характера смещения доменных границ в зависимости от взаимного расположения сфокусированного пятна и доменной стенки (см. рис. 8, а также рис. 3 и 5). Очевидно, конфигурация дополнительного поля размагничивания существенно меняется для разных случаев положения немагнитной области (рис. 8а–в), что и приводит различным типам смещения доменной границы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследован эффект генерации линий Блоха путем локального оптического воздействия, меняющего состояние намагниченности магнитной пленки феррита-граната. Определено влияние параметров оптического излучения (интенсивности, диаметра сфокусированного пучка, его положения относительно доменной границы) на характер зарождения вертикальных блоховских линий. Установлены оптимальные параметры воздействия, обеспечивающие контролируемое зарождение линий Блоха. На основе объединения методов высокоскоростной фотографии и анизотропного темного поля изучены особенности генерации линий Блоха и динамических процессов, протекающих в доменной структуре и доменной границе после воздействия импульса лазера. Обнаружено, что в окрестности области фокусировки лазера доменная граница испытывает обратимое локальное искажение формы, зависящее от ее расположения относительно лазерного пучка. Зарождение вертикальных блоховских линий имеет место на движущемся участке

доменной границы и происходит при ее смещении со скоростью превышающей критическую. Однако это условие не является достаточным для воспроизводимого зарождения вертикальных блоховских линий. Необходима также оптимизация диаметра сфокусированного пучка и его положения относительно доменной границы.

Рассмотрена теоретическая модель эффекта генерации линий Блоха, связывающая движение доменных границ с локальным нагревом магнитной пленки и изменением распределения полей размагничивания при уменьшении намагниченности в месте фокусировки лазера. При этом механизм собственно зарождения вертикальных блоховских линий определяется генерацией и прорывом петель горизонтальных линий Блоха при движении доменных границ со скоростью выше критической. Расчет конфигурации доменной границы в присутствии локальной цилиндрической немагнитной области дает хорошее качественное совпадение результатов теории и эксперимента.

Эффект контролируемого зарождения вертикальных блоховских линий при локальном оптическом воздействии позволяет рассматривать его как основу нового подхода к записи информации в устройствах сверхплотной магнитной памяти с оптическим доступом. Разрабатываемые в настоящее время подходы базируются на уменьшении длины волны излучения записывающего лазера, применении специальной высокоапертурной оптики, а также различных буферных структур и подложек, искусственно ограничивающих размер записываемого бита. В отличие от них, описанный в работе эффект зарождения линий Блоха демонстрирует принципиальную возможность контролируемой и воспроизводимой оптической записи магнитного бита информации субмикронного размера (в виде вертикальных блоховских линий) с применением пучка лазера, сфокусированного в область существенно большего размера. В данном случае размер бита определяется его физической природой как низкоразмерного образования внутри доменной границы, а не характерным масштабом записывающего «инструмента» или буферных структур.

Работа выполнена в рамках программы «Университеты России — фундаментальные исследования», а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-02-17788).

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Dan Dahlberg, Jian-gang Zhu, *Physics Today*, p. 34 (April 1995).
2. А. С. Логгинов, А. В. Николаев, В. Н. Онищук, П. А. Поляков, *Письма в ЖЭТФ* **66**, 398 (1997).
3. А. Малоземов, Дж. Слонзуски, *Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами*, Мир, Москва (1982). (A. P. Malozemoff and J. C. Slonczewski, *Magnetic Domain Walls in Bubble Materials*, Academic Press, New York (1979)).
4. M. Marsuripur, *The Physical Principles of Magneto-Optical Recording*, Cambridge University Press, Cambridge (1995).
5. Takao Suzuki, *Magneto-Optic Recording Materials*, *MRS Bulletin* **21** (9), 42 (1996).
6. G. J. Zimmer, T. M. Morris, and F. V. Humphrey, *IEEE Trans. Magn.* **10**, 651 (1974).
7. Л. П. Иванов, А. С. Логгинов, Г. А. Непокойчицкий, *ЖЭТФ* **84**, 1006 (1983).
8. A. Thiaville, F. Boileau, J. Miltat, and L. Arnaud, *J. Appl. Phys.* **63**, 3153 (1988).
9. K. Patek, A. Thiaville, and J. Miltat, *Phys. Rev. B* **49**, 6678 (1994).
10. А. С. Логгинов, А. В. Николаев, П. А. Поляков, Ю. В. Болтасова, *Тезисы докладов XVI Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники»*, Изд-во МГУ, Москва (1998), с. 488.
11. В. Э. Гусев, А. А. Карабутов, *Лазерная оптоакустика*, Наука, Москва (1991).
12. A. S. Logginov, A. V. Nikolaev, and V. V. Dobrovitski, *IEEE Trans. Magn.* **29**, 2590 (1993).
13. A. Thiaville, J. Ben Youssef, Y. Nakatani, and J. Miltat, *J. Appl. Phys.* **69**, 6090 (1991).