

На правах рукописи

НИКОЛАЕВ Алексей Владимирович

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР
МЕТОДАМИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ**

01.04.03 — радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

МОСКВА - 2003

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Логгинов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Боков Владимир Александрович

доктор физико-математических наук, доцент
Четкин Михаил Васильевич

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН

Защита диссертации состоится «17» апреля 2003 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д501.001.67 на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, ЦФА им.Р.В.Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «13» марта 2003 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук

Королев А.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование рассеяния электромагнитного излучения в локально-неоднородных средах является классической радиофизической задачей, решаемой во многих областях науки и техники (радиолокации, медицине, атмосферных исследованиях, при изучении аэрозолей, взвесей и т.д.). Облучение вещества и наблюдение пространственного спектра рассеяния применяется в широком диапазоне длин волн излучения и позволяет изучать неоднородности самого различного пространственного масштаба и физической природы. В данной работе методами рассеяния света и его пространственной фильтрации решаются задачи детектирования и исследования субмикронных магнитных структур.

Проблема детального изучения равновесных и возникающих в ходе перемагничивания (динамических) распределений намагниченности на субмикронных пространственных масштабах является одной из ключевых в современном прикладном и фундаментальном микромагнетизме. Среди соответствующих высокоразрешающих экспериментальных методик значительные надежды возлагаются на магнитную силовую микроскопию [1,2]. Хотя при исследовании магнитных микроструктур данная методика обеспечивает пространственное разрешение порядка десятков нанометров, ее применение сопровождается трудностями в интерпретации получаемых изображений, неконтролируемом воздействии микрозонда на распределение намагниченности в образце и наоборот, малой скоростью процесса сканирования, делающей невозможным наблюдение быстропротекающих процессов в реальном времени.

В то же время значительным нереализованным потенциалом при детектировании и изучении таких магнитных образований, как доменная граница (ДГ) и ее субструктура (вертикальные и горизонтальные блоховские линии — ВБЛ и ГБЛ, блоховские точки), имеющих сложное распределение намагниченности и характерный размер в десятые и сотые доли микрона, обладают основанные на регистрации рассеянного излучения и его пространственной фильтрации методы оптической микроскопии темного поля. Относительная простота экспериментальной реализации, потенциальная возможность детектирования структур, размеры которых находятся за пределом оптического разрешения традиционной микроскопии, и возможность проведения динамических исследований в реальном времени делают методы темного поля привлекательными для изучения субмикронных магнитных структур.

Наибольший успех в применении метода темного поля для регистрации и изучения субструктуры доменных границ был достигнут А.Тиавиллем и Ж.Милтой [3,4,9], которые разработали метод анизотропной темнопольной подсветки (PADO - polarized anisotropic dark-field observation) и впервые визуально зарегистрировали линии Блоха в ферритах-гранатах с перпендикулярной анизотропией.

Несмотря на достаточную изученность явления дифракции света на регулярных доменных структурах и даже реальное применение этого эффекта [5,6], многие вопросы, относящиеся к механизмам формирования темнопольного изображения магнитной структуры, особенностям применения методов рассеяния света и его пространственной фильтрации в магнитных исследованиях, их возможностям и ограничениям, остаются не выясненными.

С другой стороны, поиск новых физических механизмов и материалов, допускающих изменение параметров вещества на субмикронном пространственном масштабе в результате оптического воздействия, представляет значительный интерес в связи с возможностью их применения в новых поколениях устройств оптической и термомагнитной записи информации.

В рамках обозначенных выше проблем **цель работы** — разработка новых подходов к детектированию и исследованию мезоскопических магнитных структур с применением оптических методов, а также изучение влияния локализованного оптического излучения на эти структуры и возможности их зарождения путем оптического воздействия. На примере магнитных пленок ферритов-гранатов (ФГ) с перпендикулярной анизотропией в работе решались следующие **задачи**:

1. Разработка надежных и информативных подходов к детектированию и исследованию микро- и наноразмерных магнитных структур методами рассеяния света и его пространственной фильтрации.
2. Изучение статических и динамических свойств мезоскопических структур в пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией, исследование влияния этих структур на макроскопические процессы перемагничивания.
3. Исследование механизмов модификации внутренней структуры доменных границ и зарождения мезоскопических магнитных структур путем локализованного лазерного воздействия; рассмотрение возможности применения данных механизмов для создания устройств хранения и обработки информации.

Научная новизна работы заключается в:

1. Разработке методики исследования статических и динамических свойств магнитных микро- и наноструктур путем совместного применения методов магнитооптического рассеяния света, его пространственной фильтрации и высокоскоростной фотографии.
2. Исследовании (на примере пленок ФГ с одноосной анизотропией) геометрии односторонней темнопольной микроскопии при произвольном угле падения света относительно плоскости доменных границ. Нахождении условий падения света и пространственной фильтрации рассеянного излучения, при которых предложенная методика имеет максимальную обнаружительную способность, обеспечивающую визуализацию вертикальных линий Блоха за счет магнитооптической дифракции света непосредственно на распределении намагниченности в линии.
3. Исследовании путем совместного применения методов темного поля и высокоскоростной фотографии динамики доменных границ, вертикальных и горизонтальных линий Блоха в пленках ферритов-гранатов. Изучении характера преобразования внутренней структуры ДГ на различных этапах ее движения при воздействии импульсными полями смещения. Установлении особенностей влияния топологии ВБЛ на ее динамические свойства в планарных продвигающих магнитных полях.
4. Обнаружении эффектов зарождения и продвижения вертикальных линий Блоха в доменных границах под действием сфокусированного лазерного излучения.

Практическая ценность. Диссертационная работа относится к исследованию физических основ микро- и нанотехнологий магнитных материалов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических методов детектирования и изучения магнитных нано- и микроструктур; исследовании и разработке новых типов устройств хранения и обработки информации с полностью оптической адресацией. Результаты проведенных исследований, в частности, обнаружение и исследование эффектов зарождения и продвижения ВБЛ в доменной границе пленки ФГ под действием сфокусированного лазерного излучения позволили предложить новый способ записи-считывания магнитного бита информации размером меньше или порядка 0,1 мкм путем локального оптического воздействия.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Экспериментальная и теоретическая разработка методов визуализации ВБЛ и других мезоскопических магнитных структур в пленках ФГ на основе эффектов магнитооптического рассеяния света. Создание уникальной исследовательской установки, объединяющей методы темного поля, пространственной фильтрации рассеянного излучения и высокоскоростной фотографии, позволяющей получать статические и динамические изображения одного и того же участка магнитной структуры в различных геометриях темнопольной микроскопии и микроскопии проходящего света.
2. Экспериментальное определение зависимости динамических свойств ВБЛ от топологии линии и направления ее движения (эффект невзаимности) при продвижении линии Блоха магнитным полем, направленным в плоскости магнитной пленки вдоль доменной границы. Создание и обоснование физической модели эффекта на основе предположения об изменении процесса генерации петель горизонтальных линий Блоха на фронте движущейся ВБЛ (как основного механизма ограничения скорости ВБЛ) в зависимости от топологии ВБЛ и геометрического профиля ДГ в месте локализации линии.
3. Обнаружение новых эффектов зарождения и продвижение вертикальных линий Блоха в доменных границах пленки феррита-граната под действием сфокусированного лазерного излучения. Выявление общих закономерностей эффектов и определение оптимальных параметров оптического воздействия, обеспечивающих контролируемое зарождение линий Блоха.
4. Экспериментальное обоснование модели, связывающей природу эффектов зарождения и перемещения ВБЛ с движением доменных границ, вызванным локальным изменением распределения полей размагничивания в результате температурного уменьшения намагниченности в месте фокусировки лазерного луча.
5. Обоснование нового подхода к разработке способов зарождения и считывания субмикронных магнитных мезоскопических структур с использованием оптических методов.

Апробация результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на: V и VI Международных конференциях МММ - ИНТЕРМАГ (Питсбург, 1991; Альбукерк, 1994); X Всесоюзном объединенном семинаре по проблеме ЦМД-ВБЛ (Москва, 1991); XIII и XIV Всесоюзных, XV Всероссийской, XVI,

XVII и XVIII Международных Школах-Семинарах "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (Астрахань, 1992; Москва, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002); VI Международной конференции по ферритам (Токио, 1992); Конференции ИНТЕРМАГ (Стокгольм, 1993); I Всероссийской и II Международной конференции "Проблемы фундаментальной физики" (Саратов, 1996, 2000); Всероссийской научной конференции "Физика конденсированного состояния" (Стерлитамак, 1997); научной конференции "Ломоносовские чтения" (Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, 1999); X Международной научно-технической конференции "Лазеры в науке, технике, медицине" (Сочи, 1999), II Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2001» (Санкт-Петербург, 2001), XIX научно-технической конференции «Высокоскоростная фотография и фотоника», (Москва, 2001)

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 22 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 137 страниц, включает 65 рисунков, 1 таблицу и 164 библиографические ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и описана структура диссертации, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представляет обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных методам исследования магнитных микроструктур. Особое внимание уделено физическим свойствам доменных границ и их структурных элементов (линий Блоха) в эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией, а также применению методов оптической микроскопии в магнитных исследованиях.

Во второй главе описана созданная в ходе выполнения работы экспериментальная установка, объединяющая методы высокоскоростной фотографии (ВСФ) и анизотропной темнопольной микроскопии (АТМ) и предназначенная для поиска новых оптических методов регистрации и изучения субмикронных магнитных структур. Наблюдение по методу темного поля основано на эффекте магнитооптического рассеяния света: луч подсветки в микроскопе падает на образец

под некоторым углом и минует объектив, а изображение формирует только свет, рассеянный на магнитных микронеоднородностях. Для реализации режима наблюдения по методу темного поля и пространственной фильтрации рассеянного излучения в описываемой установке применялся механический поворот образца и системы регистрации изображения относительно оптической оси подсветки [7]. В качестве источника подсветки в установке используется импульсный азотный лазер ЛГИ-21 (излучение которого преобразуется в видимый диапазон красителем Родамин бЖ). В зависимости от условий эксперимента используется один или несколько каналов подсветки образца. Образец размещен в системе магнитных катушек, создающих постоянные и импульсные магнитные поля перпендикулярно образцу, а также в его плоскости. Базовая блок-схема установки (с одним каналом подсветки) представлена на рис. 1.

Получаемые изображения магнитных структур через оптическую систему проецируются на экран электронно-оптического усилителя яркости и регистрируются системой ввода и обработки изображений на основе цифровой видеокамеры и компьютера. Применение в качестве источника подсветки импульсного азотного лазера и усиление яркости изображения позволяет реализовать наблюдение по методу высокоскоростной фотографии и регистрировать “мгновенные” темнопольные изображения движущихся ДГ, ВБЛ и других магнитных микроструктур с временным разрешением ~ 10 нс в результате действия однократного импульса подсветки.

Характерными особенностями созданного комплекса аппаратуры являются:

- 1) объединение в единой экспериментальной установке методов ВСФ и АТМ;
- 2) применение нескольких каналов подсветки обеспечивает возможность наблюдения заданного участка магнитной структуры как в традиционной микроскопии проходящего света, так и в различных геометриях темнопольной микроскопии с пространственной фильтрацией рассеянного излучения;
- 3) режим наблюдения по методу темного поля достигается благодаря повороту образца и системы регистрации изображения относительно оптической оси подсветки;
- 4) регистрация и обработка изображений, поступающих с выхода цифровой видеокамеры, осуществляется автоматизированной системой компьютерной обработки изображений.

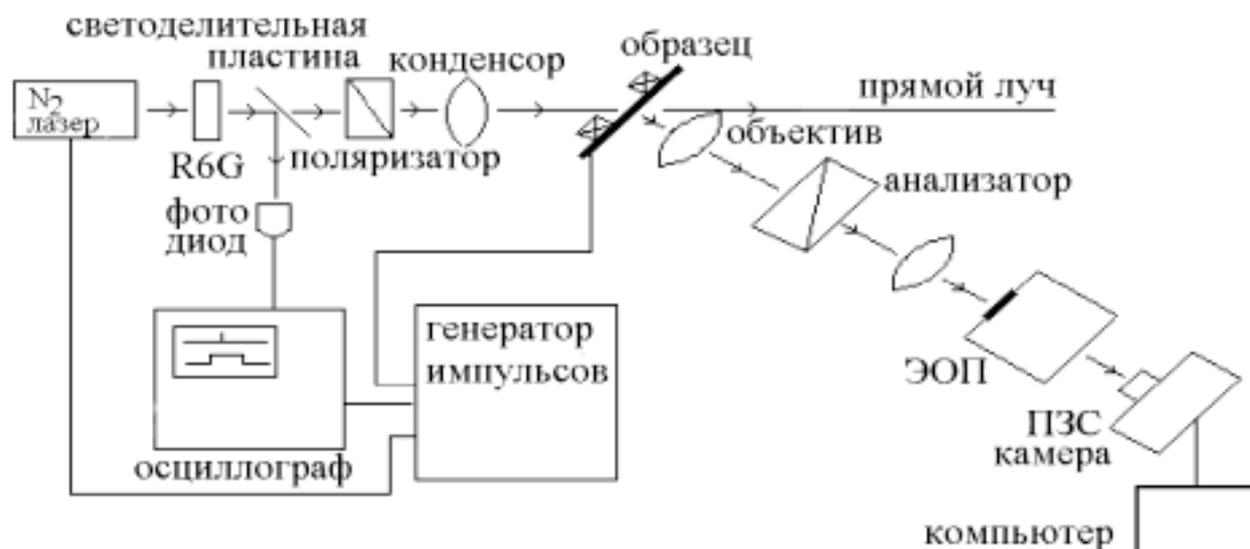


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки высокоскоростной фотографии и анизотропной темнопольной подсветки.

Решения 1, 2 являются оригинальными и отличают данный комплекс аппаратуры от описанных в литературе установок магнитооптической микроскопии темного поля [3,4,7,8,9].

Третья глава посвящена изучению особенностей визуализации вертикальных линий Блоха в пленках ферритов-гранатов с применением магнитооптической темнопольной микроскопии и пространственной фильтрации рассеянного излучения, а также анализу возможностей и ограничений метода темнопольного наблюдения при исследовании магнитных микро- и наноструктур. Приводится таблица составов и параметров исследованных образцов. Все исследованные образцы имели кристаллографическую ориентацию $\langle 111 \rangle$.

№	Состав	p , мкм	h , мкм	θ_F , град/см	$4\pi M_s$, Гс	K_u , эрг/см ³	Q
1	(GdPrBi) ₃ (FeAl) ₅ O ₁₂	7,4	4,6	17000	181	1800	1,4
2	(BiTm) ₃ (FeGa) ₅ O ₁₂	8,5	7,5	17300	173	4500	3,8
3	(BiTm) ₃ (FeGa) ₅ O ₁₂	8,7	10,0	6000	144	5400	6,6
4	(YGdBi) ₃ (FeAl) ₅ O ₁₂	9,0	8,8	11000	260	24000	8,9
5	(GdBiPrTm) ₃ (FeGa) ₅ O ₁₂	20,0	5,7	19300	113	6300	11,8
6	(BiLu) ₃ (FeGa) ₅ O ₁₂	17,5	9,9	15400	125	8200	13,2

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов: p - период доменной структуры; h - толщина образца; θ_F - удельное фарадеевское вращение $4\pi M_s$ - намагниченность насыщения; K_u - константа одноосной анизотропии; Q - фактор качества.

В параграфе 3.1. представлены результаты изучения особенностей визуализации ВБЛ в геометрии темного поля, сходной с предложенной в [3,4]. Луч подсветки в микроскопе падает на образец под некоторым углом и минует объектив, а изображение формируется только светом, дифрагировавшим на магнитных микронеоднородностях. В геометрии PADO плоскость падения света перпендикулярна плоскости ДГ (см. рис. 2а). При этом граница выглядит как светлая полоса на темном фоне, локальные изменения яркости изображения ДГ трактуются как места локализации ВБЛ (см. рис. 2в, контраст изображения инвертирован, линии Блоха отмечены стрелками). При фиксированном угле падения света тип контраста ВБЛ (светлая или темная) зависит от магнитной топологии ВБЛ (σ -заряда) и направления намагниченности в соседних доменах ($\nabla\theta$, где θ – полярный угол, см. вставку к рис.5.). Магнитные конфигурации, соответствующие приведенным на рис. 2в стенкам с ВБЛ, изображены на рис. 2г. Результаты выполненного в работе исследования особенностей визуализации ВБЛ в PADO в зависимости от условий эксперимента и параметров образцов на качественном уровне совпадают с данными, независимо полученными в [9], и свидетельствуют о том, что возможность наблюдения линий в данной геометрии темного поля связана не с рассеянием света непосредственно на распределении намагниченности в линии Блоха, а с микронаклоном ДГ в местах локализации ВБЛ.

Предложена новая схема эксперимента, также допускающая детектирование линий Блоха, но имеющая ряд существенных отличий от [3,9] (см. рис.2б,д). Ключевой особенностью описываемой схемы темнопольного наблюдения линий Блоха является падение света в плоскости ДГ (см. рис. 2б $\varphi = 0^\circ$). При этом происходит фильтрация не только прямого пучка подсветки, но и излучения, рассеянного на доменной границе. Сравнение полученных в геометрии темного поля с $\varphi = 90^\circ$ (PADO) и $\varphi = 0^\circ$ (новая схема) изображений (см. рис. 2а, б, в, д) позволяет отождествить яркие объекты рис. 2д с ВБЛ. В отличие от PADO, в новой геометрии, вне зависимости от магнитной топологии, линии визуализируются в виде пятен примерно одной интенсивности. Изображения имеют более симметричную форму, то есть их размер вдоль и поперек ДГ примерно одинаков. Отсутствие в схеме засветки не только от доменов, но и от свободных от ВБЛ участков границ есть следующий, после PADO, шаг в фильтрации рассеянного излучения, исключении из изображения магнитооптического отклика от неинформативных магнитных структур и выделении сигнала от ВБЛ.

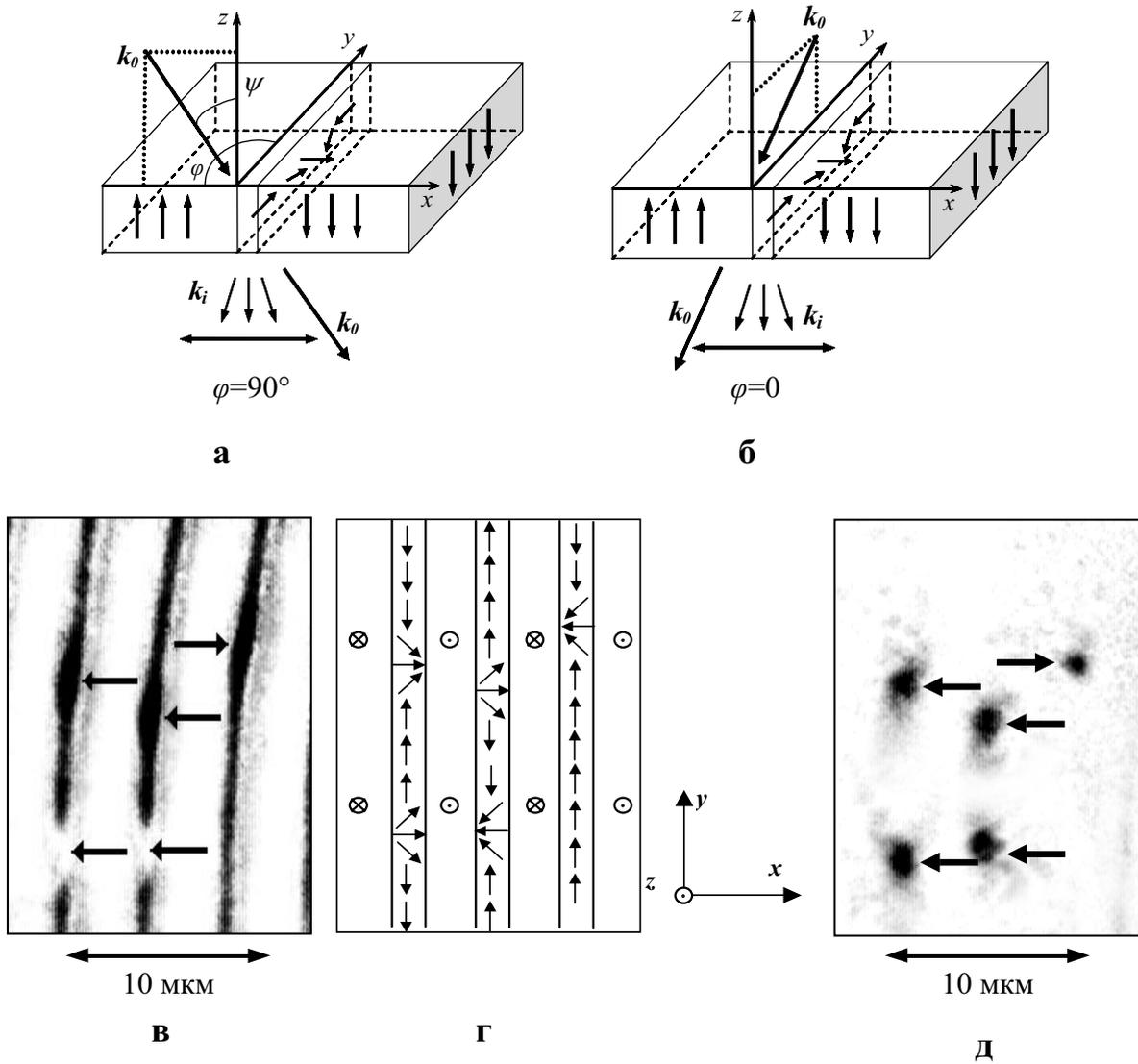


Рис.2. Оптическая схема односторонней темнопольной подсветки и распределение намагниченности в доменах, доменной границе и линии Блоха. φ - угол между плоскостью падения света и плоскостью доменной стенки; ψ - угол падения света. Плоскость падения света перпендикулярна $\varphi=90^\circ$ (а) и параллельна $\varphi=0^\circ$ (б) плоскости доменной границы (соответственно схема PADO и новая схема). \vec{k}_0 – волновой вектор падающего излучения; \vec{k}_i – волновой вектор рассеянного излучения.

Характерные изображения доменных границ и линий Блоха, получаемые в PADO (в) и новой схеме (д). Контраст инвертирован, линии Блоха отмечены стрелками. В центральной части рисунка схематически изображено распределение намагниченности в исследуемом участке образца (г). Эксперимент выполнен с образцом № 2 (см. таблицу 1).

Необходимо отметить, что визуализацию линий Блоха в новой геометрии ($\varphi = 0^\circ$) удалось осуществить во всех исследованных образцах, включая и образец, не допускающий визуализацию ВБЛ в PADO (образец № 6, см. таблицу 1).

Изложенные выше факты позволяют предположить, что физический механизм визуализации ВБЛ в геометрии падения света вдоль плоскости ДГ отличен от механизма PADO и связан с непосредственной магнитооптической дифракцией света на магнитной структуре ВБЛ. Это предположение подтверждается, в частности, результатами численного моделирования, также представленными в диссертационной работе.

В разделе 3.2. рассмотрены возможности магнитооптической микроскопии темного поля при наблюдении магнитных микро- и наноструктур с учетом того, что метод темного поля в отношении пространственного разрешения практически эквивалентен традиционной оптической микроскопии. В то же время, в силу того, что в темнопольном изображении отсутствует фоновая засветка, можно утверждать, что более высокая, по сравнению с обычной микроскопией в проходящем свете, обнаружительная способность данного метода может быть полезна не только при наблюдении линий Блоха. Для сравнения детектирующей способности темнопольной и традиционной микроскопии в прямо проходящем свете были проведены эксперименты, демонстрирующие процесс коллапса цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) в пленке феррита-граната под влиянием импульса поля смещения. Полученные результаты (см. рис. 3) убедительно показывают, что в геометрии темного поля возможно детектирование коллапсирующего ЦМД на стадиях, не регистрируемых в традиционной магнитооптической микроскопии в прямом свете.

В разделе 3.3. показана принципиальная возможность обнаружения линий Блоха в изображениях магнитных структур, полученных методом прямой подсветки, с последующей их компьютерной обработкой. Проявляющиеся при обработке изображений особенности ДГ, содержащих ВБЛ, связаны со слабым отклонением профиля границы от вертикального в месте расположения линии. Представленные результаты демонстрируют перспективность применения методов математической обработки изображений в магнитооптических микромагнитных исследованиях.

В заключительном параграфе Главы 3 рассматриваются принципиальные особенности магнитооптической микроскопии темного поля. Оценены возможности и

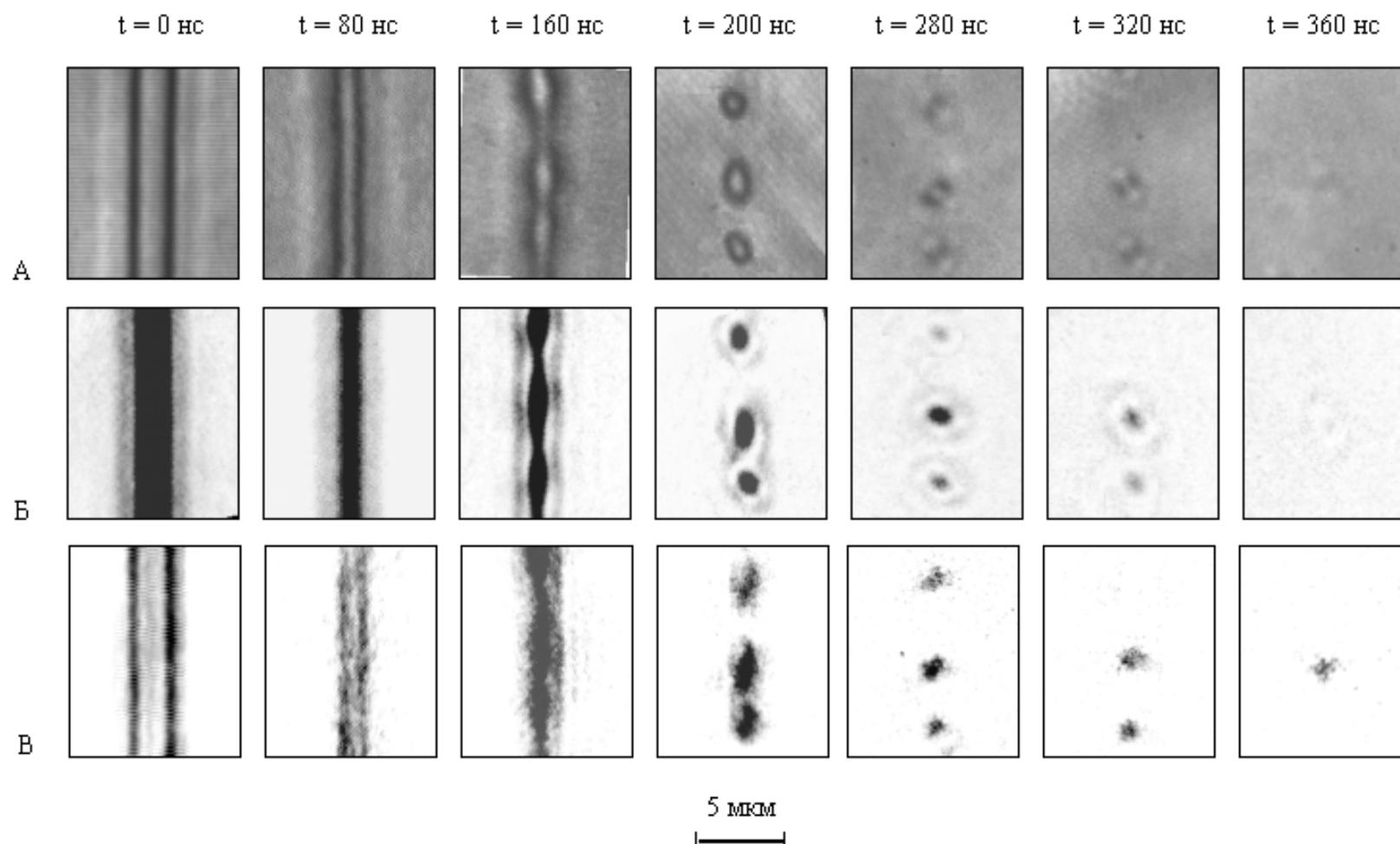


Рис.3. Динамическое преобразование полосовой доменной структуры во внешнем периодическом магнитном поле смещения при использовании трех различных геометрий наблюдения: в проходящем свете при контрасте доменных границ (А) и контрасте доменов (Б); в условиях анизотропной темнопольной микроскопии при $\varphi=90^\circ$ (контраст инвертирован) (В). Эксперимент выполнен с образцом № 2 (см. таблицу 1, магнитное поле коллапса ЦМД $H_{\text{колл}}=125$ Э). Прикладывалось постоянное магнитное поле смещения $H=110$ Э и прямоугольные импульсы магнитного поля длительностью 500 нс и амплитудой $H=25$ Э. Методом ВСФ наблюдение выполнено в указанные моменты времени, лежащие в интервале $t = 0 - 360$ нс.

ограничения развитой методики при наблюдении магнитных микро- и наноструктур. Сделан вывод о том, что применение методов АТМ и пространственной фильтрации рассеянного излучения может дать новую, не доступную традиционной микроскопии и другим методам информацию за счет возможности:

1) детектирования уединенных микромагнитных структур, находящихся за пределом разрешения оптической микроскопии в прямом свете;

2) исследования распределения намагниченности (и характера его эволюции в процессе перемагничивания) в изучаемой структуре по зависимости интенсивности рассеянного излучения и его пространственного спектра от взаимной ориентации волнового вектора падающего излучения и направления намагниченности в магнитной неоднородности;

3) регистрации внутренней структуры ДГ, а также динамических процессов в ДГ по изменению яркости получаемых изображений в зависимости от вертикального профиля ДГ.

Четвертая глава посвящена исследованию динамики доменных границ, вертикальных и горизонтальных линий Блоха в пленках ферритов-гранатов, выполненному с совместным применением методов темного поля и высокоскоростной фотографии. Целью работ является выявление характера преобразования внутренней структуры доменной границы на различных этапах ее движения, а также исследование динамики вертикальных линий Блоха.

Параграф 4.1. описывает результаты исследования динамики доменных границ и зарождения линий Блоха при воздействии импульсными полями смещения $H_{имп}$. Совместное применение методов темного поля (с плоскостью падения света перпендикулярной плоскости доменных границ) и высокоскоростной фотографии позволило установить корреляцию между динамическим поведением стенки в различных по амплитуде продвигающих полях $H_{имп}$ и процессом генерации линий Блоха. Экспериментально установлено, что зарождение ВБЛ на доменных границах имеет место при амплитуде импульсного поля смещения равной или выше критической $H_{крит}$ (при $H_{имп} = H_{крит}$ скорость движения ДГ достигает своего максимального значения). Этот факт подтверждает гипотезу о том, что за торможение доменной стенки в полях $H_{имп} \geq H_{крит}$ отвечает приводящий к образованию ВБЛ механизм генерации и прорыва на поверхность магнитной пленки горизонтальных линий Блоха.

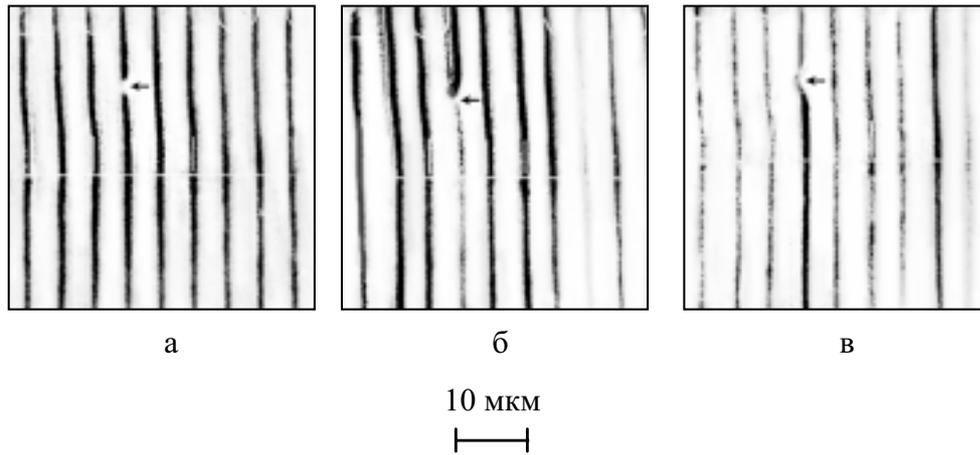


Рис. 4. Изменение яркости темнопольного изображения движущихся доменных границ в присутствии ВБЛ, делящей границу на два сегмента противоположной полярности. Фотографии получены с задержкой: а — 0 нс; б — 20 нс; в — 80 нс относительно начала прямоугольного импульса поля смещения $H_{\text{имп}} = 20$ Э. Длительность импульса ~ 1 мкс, фронт и спад импульса ~ 10 нс. Контраст инвертирован. ВБЛ отмечена стрелкой. Эксперимент проведен с образцом № 2 (см. таблицу 1).

При исследовании движения ДГ в полях меньших критического ($H_{\text{имп}} < H_{\text{крит}}$) обнаружено изменение контраста темнопольного изображения границы. В определенные моменты времени после начала действия импульсного поля $H_{\text{имп}}$ доменные стенки выглядят ярче или темнее, чем статические (см. рис. 4). Аналогичное изменение яркости темнопольного изображения движущейся стенки в полях меньших критического также наблюдали и исследовали авторы [4]. Представленное в [4] объяснение данного явления базируется на предположении о том, что при $H_{\text{имп}} < H_{\text{крит}}$ в доменной границе также имеет место зарождение и продвижение горизонтальных линий Блоха, не сопровождающееся, однако, их прорывом и образованием ВБЛ.

Продвижение ВБЛ вдоль ДГ под действием импульсного магнитного поля, направленного в плоскости образца ($H_{\text{пл}}$), рассмотрено в п. 4.2. Совместное применение методов темного поля и высокоскоростной фотографии давало возможность регистрировать как статические, так и мгновенные динамические изображения движущихся ВБЛ и ДГ и получить зависимости скорости движения ВБЛ $V_{\text{ВБЛ}}$ от амплитуды продвигающего поля $H_{\text{пл}}$. Иллюстрируемый рисунком 5 эксперимент проведен для ВБЛ с одними и теми же значениями σ -заряда и различными $\nabla\theta$ (см. вставку к рис. 5), т.е. все ВБЛ движутся в одном направлении

под влиянием $H_{пл}$ заданной полярности и имеют различный контраст. Обнаружено, что, начиная с полей $H_{пл} \cong 2 \text{ Э}$, характер зависимости $V_{ВБЛ}(H_{пл})$ и динамические особенности изображений ВБЛ различаются в зависимости от топологии ВБЛ (см. рис. 5, 6). В соответствии с рис. 5, в случае “темных” ВБЛ перед блоховской линией возникало возмущение, похожее на точку с контрастом, противоположным контрасту ВБЛ. В случае “светлых” ВБЛ значительных изменений контраста ВБЛ не наблюдалось, но был заметен динамический прогиб стенки в месте локализации ВБЛ (рис. 5). (ВБЛ с различным $\nabla\theta$ условно названы “темными” и “светлыми” по контрасту, имевшему место в эксперименте; на рис. 5 контраст фотографий инвертирован).

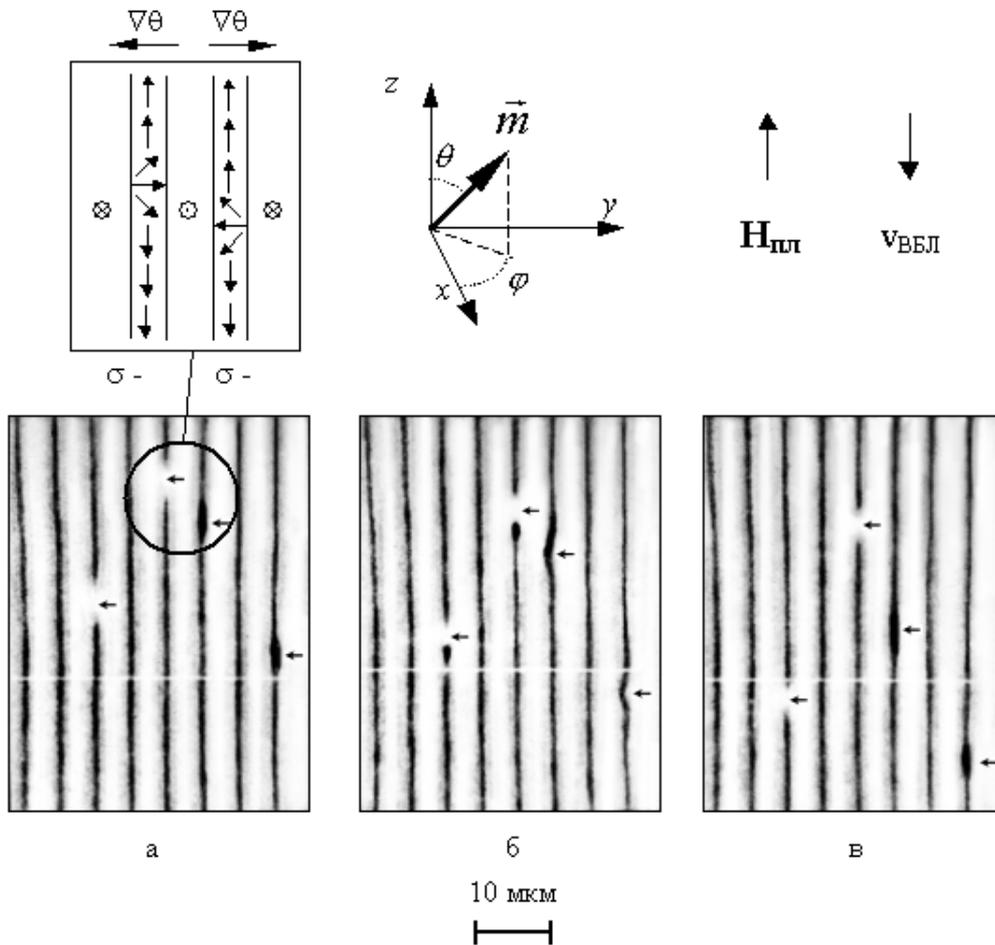


Рис. 5. Темнопольное изображение ВБЛ (контраст инвертирован) с одинаковыми значениями σ -заряда и разными $\nabla\theta$ в соседних доменах (см. вставку) при движении линий Блоха под действием импульсного поля в плоскости $H_{пл} = 3,4 \text{ Э}$. ВБЛ отмечены стрелками. Время наблюдения относительно начала импульса поля: а — 0 нс, б — 120 нс, в — 500 нс. Эксперимент проведен с образцом № 2 (см. таблицу 1). Длительность импульса поля $\cong 230$ нс.

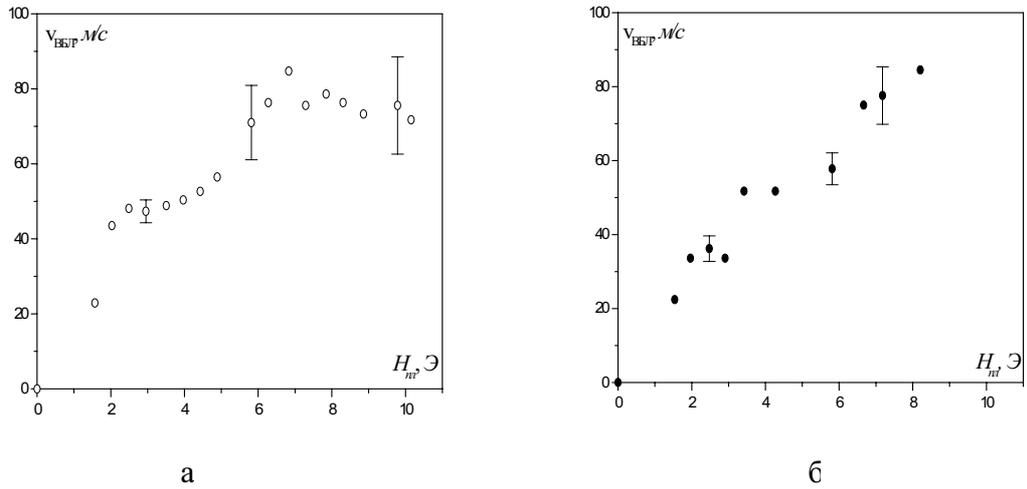


Рис. 6. Зависимость скорости ВБЛ от амплитуды импульсов поля $H_{\text{пл}}$ для линий Блоха с одинаковыми значениями σ -заряда и разными $\nabla\theta$ в соседних доменах: а — “темные” ВБЛ, б — “светлые” ВБЛ.

Аналогичная картина наблюдалась и для фиксированной ВБЛ, при этом в зависимости от направления движения линии возникал тот или иной из описанных типов изображений. Также в работе описаны и другие особенности динамических изображений ВБЛ и участка ДГ с намагниченностью, противоположной полю $H_{\text{пл}}$, наблюдавшиеся в различных диапазонах продвигающих полей.

На рис. 6 представлены графики скоростей ВБЛ с одинаковыми значениями σ -заряда и разными $\nabla\theta$ в соседних доменах (“темные” и “светлые” линии на рис. 5) в зависимости от амплитуды импульсов поля $H_{\text{пл}}$. Видно, что в то время как для “темных” ВБЛ на графике $V_{\text{ВБЛ}}(H_{\text{пл}})$ в диапазоне полей 2-3 Э наблюдается насыщение скорости на уровне $\sim 45 \div 50$ м/с, для “светлых” ВБЛ в рассматриваемом диапазоне полей $H_{\text{пл}}$ скорость ВБЛ ниже. Для полей $H_{\text{пл}} > 4,5$ Э в пределах ошибки измерений графики скорости для “светлых” и “темных” ВБЛ не отличаются.

Обнаруженное влияние топологии ВБЛ на ее динамические свойства (называемое в работе “эффект невзаимности”) объясняется в рамках модели зарождения петель ГБЛ на фронте движущейся ВБЛ как основного источника ограничения скорости последней (с учетом значительного магнитоэлектростатического изгиба ДГ в месте локализации ВБЛ для образцов с $Q \leq 10$). Наличие искажения профиля ДГ меняет характер зарождения петель ГБЛ в зависимости от топологии линии или направления ее движения. Результаты проведенного в рамках данной

модели численного моделирования находятся в качественном согласии с экспериментальными результатами.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментов по изучению влияния локализованного оптического воздействия на внутреннюю структуру доменной стенки в пленках ферритов-гранатов. Обнаружены новые физические эффекты зарождения и продвижения ВБЛ в доменной границе под действием сфокусированного лазерного излучения.

По результатам экспериментов, воздействие однократного светового импульса (имеющего длительность 10 нс, длину волны $\lambda \cong 540$ нм, энергию $W \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$ Дж и сфокусированного на магнитной пленке в область диаметром порядка 3-4 мкм), по мере увеличения его энергии, вызывает: 1) перемещение уже существующих вертикальных линий Блоха 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.

В диссертационной работе подробно обсуждаются условия эксперимента, при которых реализуется контролируемое и воспроизводимое зарождение линий Блоха, а также различные проявления эффекта генерации ВБЛ при изменении параметров оптического излучения (интенсивности, диаметра сфокусированного пучка, его положения относительно доменной границы). На основе объединения методов ВСФ 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 ДГ испытывает обратимое локальное искажение формы (см. рис. 7). При этом (рис. 7) зарождение ВБЛ имеет место на движущемся участке ДГ и происходит при смещении доменных границ со скоростью, превышающей критическую. Это условие, однако, не является достаточным для воспроизводимого зарождения ВБЛ. Необходима также оптимизация диаметра сфокусированного пучка и его положения относительно доменной границы.

На основе полученных экспериментальных данных предложена и обоснована физическая модель явления зарождения и перемещения линий Блоха под действием локального лазерного воздействия. Главная роль в модели отводится тепловому влиянию импульса лазера, проявляющемуся в локальном уменьшении величины намагниченности насыщения пленки в месте фокусировки пучка. (Заметная на рис.

7А, б-д темная область соответствует участку образца с пониженным фарадеевским вращением из-за локального уменьшения величины намагниченности насыщения пленки при лазерном нагреве). Изменение намагниченности локального участка образца при нагреве и последующем остывании существенно изменяет распределение полей размагничивания в этой области и приводит к смещению близлежащих доменных границ. При превышении границей критической скорости движения в ней происходит зарождение горизонтальной блоховской линии, прорывающейся на поверхность магнитной пленки с образованием пары вертикальных блоховских линий. Если скорость ДГ ниже критической, или время движения ДГ не достаточно для формирования ГБЛ и ее продвижения на противоположную поверхность пленки, генерация новых ВБЛ не происходит, но возможно смещение вдоль ДГ уже существующих линий Блоха.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности контролируемого зарождения магнитных структур размером меньше или порядка 0,1 мкм путем локального оптического воздействия. При этом для записи магнитного бита информации субмикронного размера нет необходимости предельно уменьшать диаметр сфокусированного лазерного пучка или создавать искусственный потенциальный рельеф, задающий размер записанного лазером домена (что типично для работ по увеличению плотности записи на оптических дисках). Пространственный масштаб записываемой структуры ($\sim 0,1$ мкм) и области локализации лазерного луча (~ 4 мкм) существенно различны т.к. в данном случае “размер” бита определяет физическая природа мезоскопического объекта (ВБЛ), а не характерный масштаб записывающего “инструмента”.

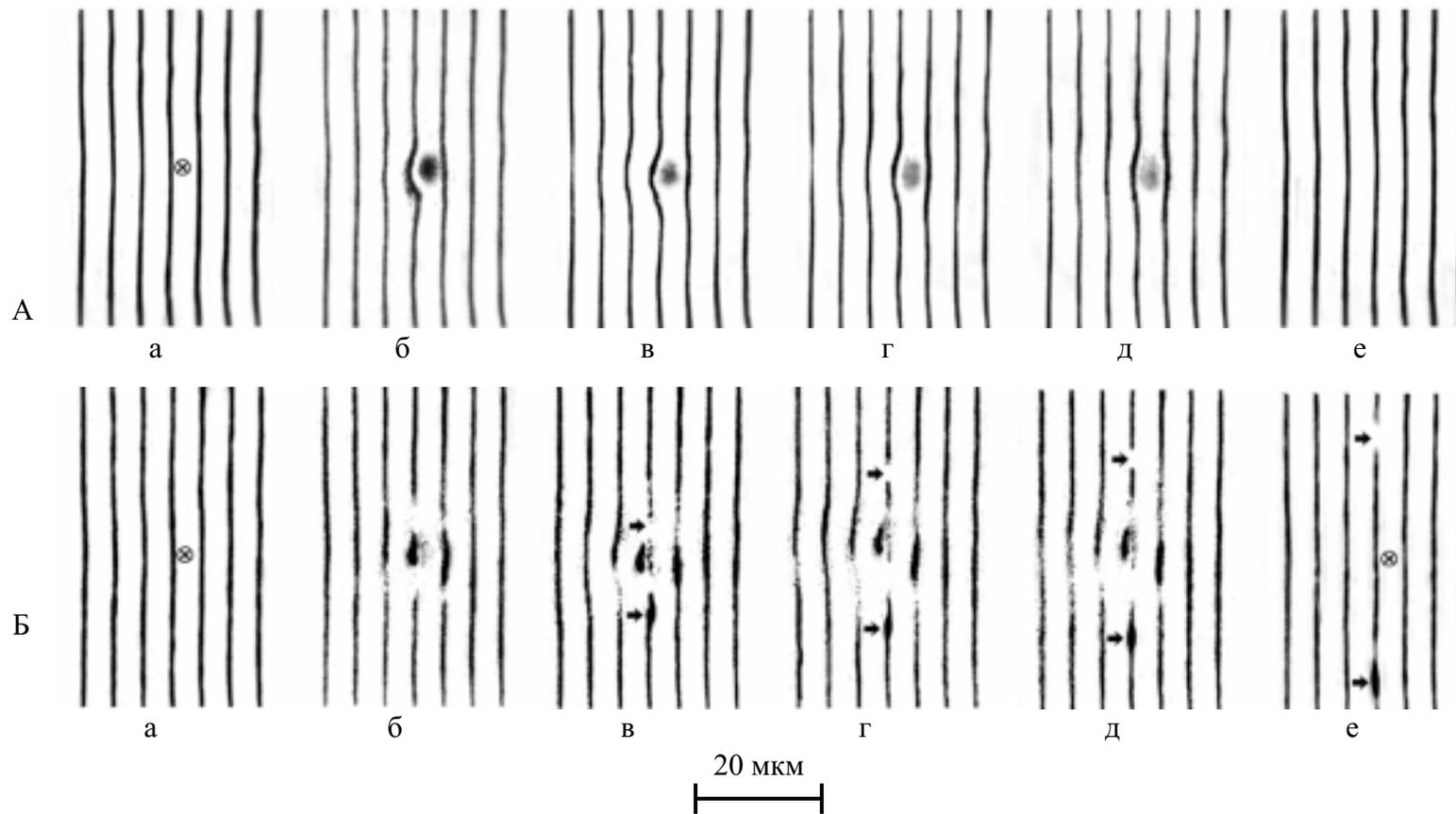


Рис. 7. Мгновенные динамические конфигурации доменной структуры в различные моменты времени после приложения "записывающего" импульса лазера. Знак \otimes показывает место фокусировки лазера. Верхняя серия фотографий (А) получена в геометрии прямой светопольной подсветки при скрещенных поляризаторах; нижняя серия (Б) - при помощи метода темного поля (контраст изображений инвертирован). ВБЛ отмечены стрелками. Время наблюдения относительно момента воздействия записывающего импульса: а - до импульса; б - спустя 100 нс; в - 300 нс; г - 700 нс; д - 1000 нс; е - после завершения динамических процессов. Энергия светового импульса $W \sim 2 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Выводы

1. Разработана методика исследования статических и динамических свойств магнитных микро- и наноструктур на основе эффектов магнитооптического рассеяния света и его пространственной фильтрации. Создана оригинальная экспериментальная установка, в которой совместно используются методы темнопольной подсветки и высокоскоростной фотографии, что дает возможность прямой оптической регистрации магнитных неоднородностей в доменной границе в реальном масштабе времени (временное разрешение ~ 10 нс). Экспериментальный комплекс сопряжен с автоматизированной системой регистрации и обработки слабоконтрастных оптических изображений на базе цифровой видеокамеры и компьютера. Установка может эффективно применяться для визуализации и изучения статических и динамических магнитных мезоскопических структур.
2. На основе модели магнитооптической дифракции оптического излучения рассмотрено формирование изображения магнитных микро- и наноструктур в условиях наблюдения по методу темного поля. Показана возможность детектирования магнитных неоднородностей микро- и наномасштаба методами рассеяния света и его пространственной фильтрации.
3. Изучены динамические свойства линии Блоха при ее движении в планарных продвигающих магнитных полях. Зарегистрировано насыщение скорости продвижения на уровне ~ 40 м/с в диапазоне продвигающих полей $\sim 2 \div 4$ Э и изменение механизма смены полярности ДГ в полях > 4 Э. Обнаружено влияние магнитостатического заряда вертикальной линии Блоха на характер ее движения, что приводит к эффекту невзаимности в динамике линий Блоха.
4. Предложена и обоснована физическая модель эффекта невзаимности. Модель основана на предположении о влиянии магнитостатического искажения профиля ДГ в месте локализации ВБЛ на характер генерации петель горизонтальных линий Блоха на фронте движущейся ВБЛ.
5. Обнаружены новые эффекты зарождения и продвижения вертикальных линий Блоха в доменных границах под действием сфокусированного лазерного излучения. Экспериментально установлены оптимальные параметры оптического воздействия (энергия светового импульса, диаметр сфокусированного лазерного

пучка и его положение относительно доменной границы), обеспечивающие контролируемое зарождение линий Блоха и воспроизводимость результата.

6. Экспериментально и теоретически обоснована модель, связывающая природу эффектов зарождения и перемещения ВБЛ с движением доменных границ, вызванным локальным изменением распределения полей намагничивания в результате температурного уменьшения намагниченности в месте фокусировки лазерного луча.
7. Предложен новый способ записи-считывания магнитного бита информации размером меньше или порядка 0,1 мкм путем локального оптического воздействия.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Logginov A.S., Nikolaev A.V., Dobrovitski V.V. Direct optical observation of vertical Bloch lines propagation by in-plane field pulses. // IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 11, pp.2590-2592, 1993.
2. Logginov A.S., Dobrovitski V.V., Nikolaev A.V. Simulation of vertical Bloch lines non-reciprocal dynamics. // IEEE Trans. Magn., vol.30, no.6, pp.4353-4355, 1994.
3. Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н., Поляков П.А. Зарождение мезоскопических магнитных структур локальным лазерным воздействием. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. Вып. 6, с. 398-402.
4. Логгинов А.С., Николаев А.В., Николаева Е.П., Онищук В.Н. Модификация структуры доменных границ и зарождение субмикронных магнитных образований методами локального оптического воздействия. // ЖЭТФ. 2000. Т. 117. Вып. 3, с. 571-581.
5. Белотелов В.И., Логгинов А.С., Николаев А.В. Анализ механизма визуализации вертикальных линий Блоха в пленках ферритов-гранатов в различных геометриях микроскопии темного поля. // Радиотехника и электроника. 2001. Т.46, N 7, с.870-876.
6. Николаев А.В., Николаева Е.П., Онищук В.Н., Логгинов А.С. Новые механизмы оптической записи-считывания информации в магнитных средах. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 6, с. 50-56.
7. Belotelov V.I., Logginov A.S., Nikolaev A.V. Simulation of dark field optical imaging of magnetic nanoparticles. // Functional Materials, vol.9, no.1, pp.105-110, 2002.

8. Белотелов В.И., Логгинов А.С., Николаев А.В. Детектирование и исследование магнитных микро и наноструктур с применением оптической микроскопии темного поля. // Принята к публикации. ФТТ. 2003.
9. Логгинов А.С., Непокойчицкий Г.А., Николаев А.В. Визуальное наблюдение динамики ВБЛ в пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией. // Тезисы докладов X Всесоюзного объединенного семинара по проблеме ЦМД-ВБЛ, Москва, 1991, с. 14.
10. Логгинов А.С., Николаев А.В. Прямое визуальное наблюдение продвижения вертикальных блоховских линий импульсным полем в плоскости магнитной пленки. // Тезисы докладов XIII Всесоюзной Школы-Семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники», Астрахань, стр. 2-4, 1992.
11. Logginov A.S., Nikolaev A.V. Direct optical real-time observation of VBL propagation by in-plane field pulses. // Digests of the 6th International Conference on Ferrites (ICF 6), paper 30PaIII-6, p. 248, Tokyo, 1992.
12. Logginov A.S., Nikolaev A.V. Direct optical observation of VBL nucleation process. // Digests of the 6th International Conference on Ferrites (ICF 6). Paper 30PaIII-5. Tokyo, 1992, p. 247.
13. Логгинов А.С., Добровицкий В.В., Николаев А.В. Моделирование невзаимной динамики вертикальных линий Блоха в тонких магнитных пленках ферритов-гранатов. // Тезисы докладов XIV Всесоюзной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 1994, с. 31-32.
14. Добровицкий В.В., Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование динамики магнитных микроструктур в тонких магнитных пленках ферритов-гранатов. // Тезисы докладов научной конференции "Проблемы фундаментальной физики". Саратов, 1996, с. 36-37.
15. Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н., Оптическая регистрация внутренней структуры доменной границы в пленках ферритов-гранатов. // Сб. науч. тр. Всероссийской научной конференции «Физика конденсированного состояния». Стерлитамак, 1997. Т. 2, с. 50-52.
16. Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н., Поляков П.А. Модификация структуры доменной границы локальным оптическим воздействием. // Сб. научн. тр. Всероссийской научной конференции «Физика конденсированного состояния».

Стерлитамак, 1997. Т. 2, с. 53-54.

17. Логгинов А.С., Николаев А.В., Поляков П.А., Болтасова Ю.В. Механизм модификации микромагнитных структур локальным лазерным воздействием. // Тезисы докладов XVI Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 1998, с. 488–489.
18. Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н., Поляков П.А. О новых возможностях исследования мезоскопических магнитных структур с использованием микроскопии темного поля. // Тезисы докладов XVI Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 1998, с. 587.
19. Николаев А.В., Николаева Е.П., Онищук В.Н., Логгинов А.С. Новые возможности оптической записи-считывания информации в магнитных средах. // Тезисы докладов XVII Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 2000, с. 18.
20. Николаев А.В., Онищук В.Н., Логгинов А.С. Визуализация вертикальных линий Блоха в пленках ферритов-гранатов методами компьютерной обработки оптических изображений. // Тезисы докладов XVII Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Москва, 2000, с. 477.
21. Логгинов А.С., Николаев А.В., Николаева Е.П., Онищук В.Н. Оптическое детектирование субмикронных магнитных структур и их зарождение путем локального лазерного воздействия. // Сб. научн. трудов II Международной конференции «Фундаментальные проблемы физики». Саратов, 2000, с. 125.
22. Белотелов В.И., Николаев А.В. Детектирование субмикронных магнитных структур методом микроскопии темного поля. // Тезисы II Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2001». Санкт-Петербург, 2001, с. 209.

Список цитируемой литературы

1. Martin Y., Wickramasinghe H. K. Magnetic imaging by «force microscopy» with 1000 Å resolution. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. Vol. 50, p. 1455-1457.
2. Яминский И.В., Тишин А.М. Магнитно-силовая микроскопия поверхности. // *Успехи химии.* 1999. Т. 68(3), с. 187-193.
3. Thiaville A., Boileau F., Miltat J., Arnaud L. Direct Bloch line optical observation. // *J. Appl. Phys.* 1988. Vol. 63, N 8, p. 3153-3158
4. Patek K., Thiaville A., Miltat J. Horizontal Bloch lines and anisotropic-dark-field observation. // *Phys.Rev. B.* 1994. Vol. 49. N 10, p. 6678-6688.
5. Петерсон В.К. Дифракция света на полосовых доменах в тонких магнитных пленках. // *ФТТ.* 1981. Т. 23, с. 910-912.
6. Семенцов Д.И., Губарев А.К. Дифракция света в магнитооптических средах с полосовой доменной структурой. // *Оптика и спектроскопия.* 1982. Т. 53. Вып. 3, с. 501-506.
7. Власко-Власов В.К., Успенская Л.С. Дифракционное изображение тонкой структуры доменных границ в одноосных магнитных пленках. // *Кристаллография.* 1990. Т. 35. Вып. 5, с. 1261-1266.
8. Theile J., Engemann J. Direct optical observation of Bloch lines and their motion in uniaxial garnet films using a polarizing light microscope. // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. N 8, p. 713-715.
9. Thiaville A., Ben Youssef J., Nakatani Y., Miltat J. On the influence of wall microdeformations on Bloch line visibility in bubble garnets. // *J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 69, N 8, p. 6090-6095.