

07;12

## Новые механизмы оптической записи-считывания информации в магнитных средах

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119899 Москва, Россия  
e-mail: asl@osc.phys.msu.ru

(Поступило в Редакцию 18 июня 2001 г. В окончательной редакции 4 декабря 2001 г.)

Описываются эксперименты, демонстрирующие оптическое детектирование магнитных структур размером меньше или порядка  $0.1\ \mu\text{m}$ , а также их зарождение и продвижение путем лазерного воздействия. Обнаруженные физические эффекты позволяют реализовать основные операции запоминающего устройства (запись информации, ее сдвиг в регистре хранения, считывание), в результате исключительно оптического воздействия и могут быть положены в основу разработки новых подходов к построению устройств сверхплотной твердотельной магнитной памяти с оптическим доступом и управлением.

### Введение

Как в широко представленных ныне на рынке устройствах цифровой памяти с оптической записью-считыванием информации (компакт- и видеодиски, магнитооптические диски), так и в разрабатываемых перспективных схемах (оптическая трехмерная память на фоторефрактивных и фотохромных материалах) размер записываемого бита информации определяется в основном эффективной площадью области взаимодействия оптического излучения с рабочей средой, а значит диаметром сфокусированного лазерного пучка [1–3]. При этом в силу дифракционных ограничений на степень фокусировки сложно рассчитывать на получение размера бита, существенно меньшего длины волны излучения записывающего лазера, даже при использовании специальных оптических элементов и различных буферных структур, искусственно ограничивающих размер записываемого бита [1,3]. Такие подходы достаточно сложны и дорогостоящи. Необходимо отметить, что уменьшение размера бита данных приводит к значительному усложнению схемы считывания информации. Это связано с тем, что в традиционных способах оптического считывания, основанных на эффектах индуцированной люминесценции, изменения фазы, плоскости поляризации и/или интенсивности проходящего или отраженного света в зависимости от наличия информационного „0“ или „1“ уменьшение размера бита данных вызывают значительное уменьшение полезного сигнала на фоне шумов и общего оптического фона. Для разрешения этой проблемы используют специальные методы записи информационных дорожек на разном уровне (land-groove recording), фильтрацию и обработку электрического сигнала считывания (Partial Response Signaling and Maximum Likelihood Detection — PRML), магнитно-индуцированное сверхразрешение (Magnetically Induced Super Resolution — MSR) и т.д. [1–7]. Предполагается, что в случае оптической памяти с магнитной рабочей средой (магнитооптические диски) применение перечисленных выше методов записи-считывания информации

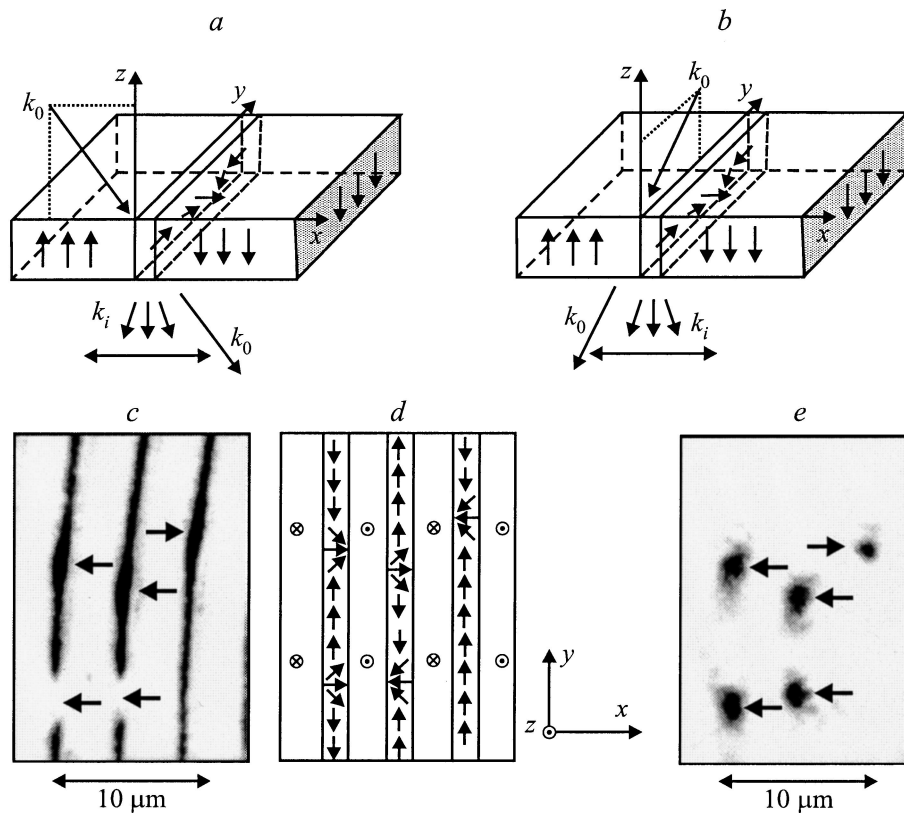
позволит уменьшить размер бита информации (которым является магнитный домен) до  $0.1\text{--}0.2\ \mu\text{m}$  [3–6].

Упомянутые ограничения и затруднения в создании современных устройств памяти объясняют непрекращающийся поиск новых физических механизмов и материалов, допускающих изменение параметров вещества на субмикронном пространственном масштабе в результате оптического воздействия и последующее детектирование данного изменения также с применением оптических методов.

В настоящей работе описываются эксперименты, демонстрирующие прямое оптическое детектирование магнитных структур размером меньше или порядка  $0.1\ \mu\text{m}$ , а также их зарождение и управление путем локального лазерного воздействия. Данные физические эффекты могут быть положены в основу разработки новых подходов к построению сверхплотной твердотельной магнитной памяти с оптической записью-считыванием информации.

### Методы проведения экспериментов

Оптическое детектирование магнитных образований с размером, лежащим ниже предела оптического разрешения традиционных методов магнитооптической микроскопии на базе эффектов Фарадея или Керра, может быть реализовано с применением микроскопии темного поля. В этом методе, предназначенном для визуализации фазовой структуры исследуемого объекта и выделения объектов, слабо отличающихся от своего окружения по оптическим свойствам, освещение организовано так, что прямой луч подсветки не попадает в объектив, а изображение формируется только светом, испытавшим рассеяние на фазовых неоднородностях образца. В силу существования магнитооптических эффектов распределение намагниченности в образце и есть та фазовая структура, которая может быть визуализирована в темном поле [8]. Особенностью микроскопии темного поля (широко используемой в различных исследованиях, но недостаточно развитой в применении к магнетизму) является то, что в силу дифракционного характера



**Рис. 1.** *a, b* — оптическая схема односторонней темнопольной подсветки и распределение намагниченности в доменах, доменной границе и линии Блоха: плоскость падения света перпендикулярна (*a*) и параллельна (*b*) плоскости доменной границы;  $k_0$  — волновой вектор падающего излучения,  $k_i$  — волновой вектор рассеянного излучения; *c* и *e* — характерные изображения доменных границ и линий Блоха, получаемые при падении света перпендикулярно (*c*) и параллельно (*e*) плоскости ДГ, контраст инвертирован; *d* — схематичное распределение намагниченности в исследуемом участке образца.

формирования изображения этому методу присуща потенциальная возможность детектирования структур с размером, находящимся за пределом оптического разрешения традиционной микроскопии (ультрамикроскопия). С применением геометрии темного поля в оптической микроскопии могут быть разработаны методы регистрации магнитных мезоскопических структур размером меньше или порядка  $0.1\ \mu\text{m}$ . Стоит особо отметить и тот важный факт, что микроскопия темного поля не требует сканирования рассматриваемой области и хорошо сопрягаема с известными методами изучения быстрой динамики магнитных структур (например, с высокоскоростной фотографией) [9], в то время как методы сканирующей микроскопии имеют принципиальные ограничения в области динамических исследований.

Возможность детектирования субмикронных магнитных структур с применением подходов микроскопии темного поля впервые была продемонстрирована А. Тивиллем и Ж. Милтой, осуществившими прямое оптическое наблюдение вертикальных блоховских линий (ВБЛ) в пленках ферритов-гранатов с перпендикулярной анизотропией [10]. ВБЛ представляют собой устойчивые структурные элементы доменной границы (ДГ) и имеют размер меньше или порядка  $0.1\ \mu\text{m}$  [11]. В разработанном в [10] методе поляризованной анизотропии темной

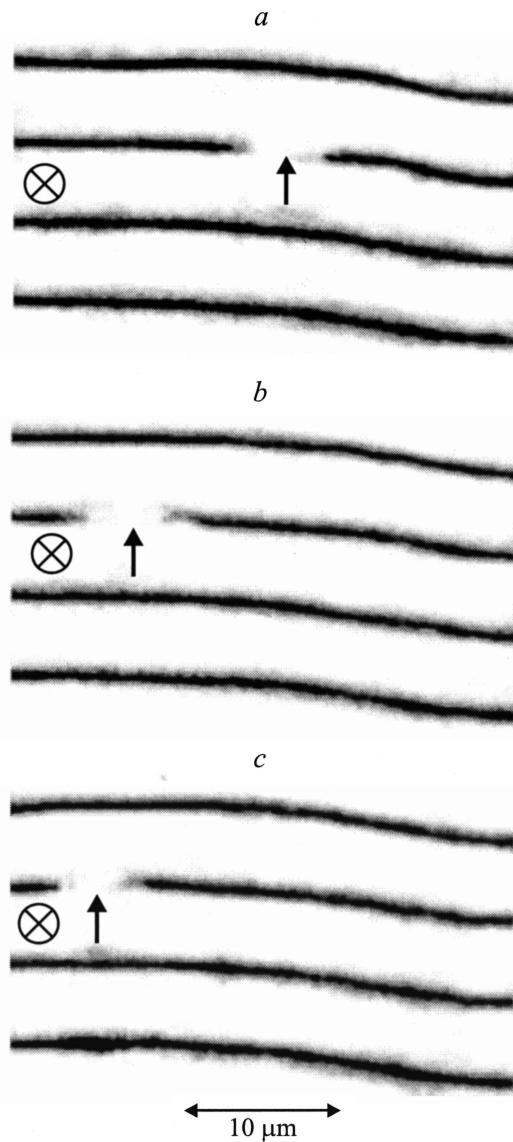
подсветки (PADO — polarized anisotropic dark field observation) луч подсветки в микроскопе падает на образец под некоторым углом и минует объектив, а изображение формируется только светом, дифрагировавшим на магнитных микронеоднородностях (рис. 1 *a*). В геометрии PADO плоскость падения света перпендикулярна плоскости ДГ. При этом граница выглядит как светлая полоса на темном фоне, локальные изменения яркости изображения ДГ трактуются как места локализации ВБЛ (рис. 1, *c*, контраст изображения инвертирован, линии Блоха отмечены стрелочками). При фиксированном угле падения света тип контраста ВБЛ (светлая или темная) зависит от магнитной топологии ВБЛ и направления намагниченности в соседних доменах (на рис. 1, *d* представлена топология, соответствующая стенкам с ВБЛ на рис. 1, *c*) [12].

Совместное применение метода PADO и метода высокоскоростной фотографии (обеспечивающего наблюдение мгновенных динамических конфигураций доменной структуры [13]) позволило нам обнаружить и всесторонне исследовать эффект контролируемого зарождения вертикальных линий Блоха и их перемещения путем локального лазерного воздействия [14,15]. Работы были выполнены на примере одноосной магнитной пленки феррита-граната состава  $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ , имеющей

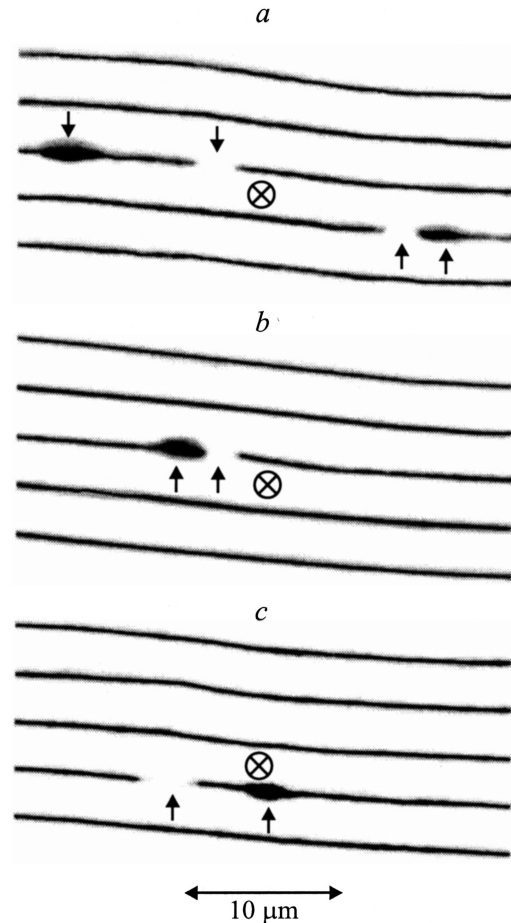
следующие параметры: кристаллографическая ориентация  $\langle 111 \rangle$ , намагниченность насыщения  $4\pi M_S = 173$  Gs, поле коллапса  $H_{col} = 126$  Oe, период равновесной полосовой структуры  $8.5 \mu\text{m}$ , толщина пленки  $7.5 \mu\text{m}$ , фактор качества  $Q = 3.8$ .

### Зарождение и продвижение субмикронных магнитных структур путем локального лазерного воздействия

По результатам экспериментов [14,15], воздействие однократного импульса лазера (имеющего длительность  $10$  ns, длину волны  $\lambda = 540$  nm, максимальную



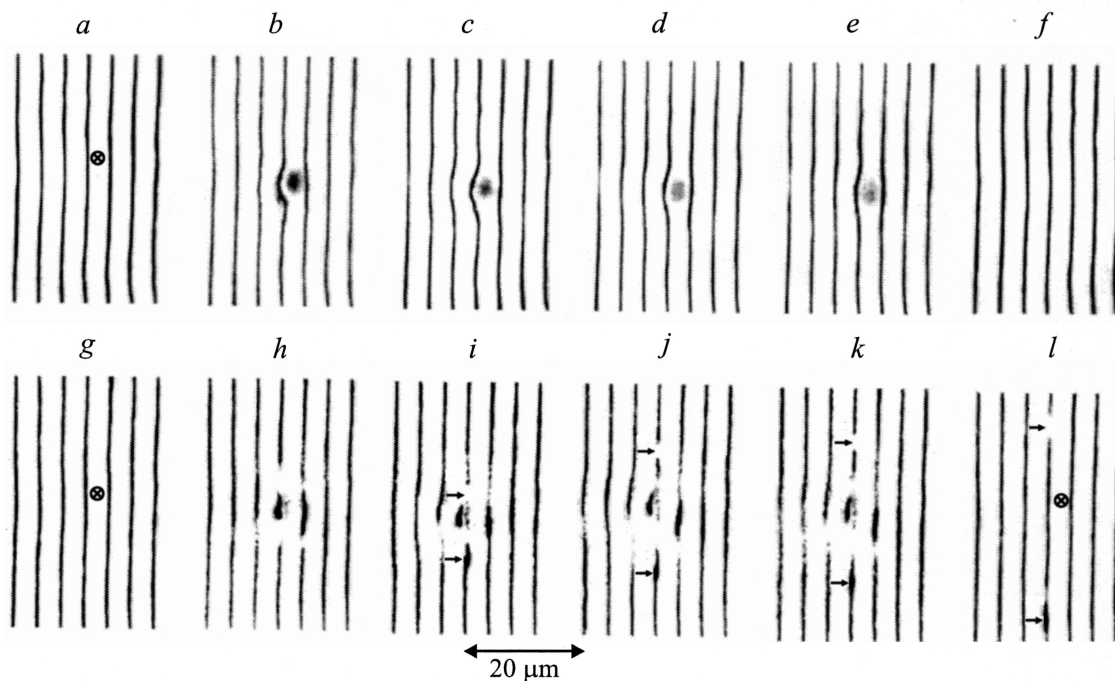
**Рис. 2.** Перемещение ВБЛ в результате воздействия лазерного излучения. *a* — исходное положение; *b, c* — смещение ВБЛ при последовательном приложении двух однократных импульсов лазера. Изображения получены при помощи метода темного поля, контраст инвертирован.



**Рис. 3.** Типичные изображения линий Блоха, зарождающихся в доменных границах после воздействия импульса лазера. ВБЛ отмечены стрелками. Фотографии получены в одностороннем темном поле, контраст инвертирован.

энергию  $W_{\max} \sim 10^{-6}$  J и сфокусированного на магнитной пленке в область диаметром порядка  $3-4 \mu\text{m}$ ) 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.

Рис. 2 иллюстрирует эффект перемещения линии Блоха в результате воздействия сфокусированных импульсов лазера. Исходная доменная структура, содержащая специально введенную в ДГ линию Блоха, представлена на рис. 2, *a*. ВБЛ отмечена стрелкой, знаком  $\otimes$  показано место фокусировки луча. Под влиянием однократного светового импульса с энергией  $W \sim 0.1 W_{\max}$  ВБЛ перемещается (рис. 2, *b*). В результате повторного приложения импульса (той же энергии и сфокусированного в то же место) ВБЛ продолжает свое движение (рис. 2, *c*). На рис. 2, *b* и *c* заметно, что с приближением линии Блоха к месту фокусировки луча пройденное ею расстояние уменьшилось. Детальное изучение данного эффекта, а также выявление условий, обеспечивающих



**Рис. 4.** Мгновенные динамические конфигурации доменной структуры в различные моменты времени после приложения „записывающего“ импульса лазера. *e, g* — изображения получены до импульса; *b, h* — с задержкой 100; *c, i* — 300; *d, j* — 700; *e, k* — 1000 ns относительно момента излучения импульса; *f, l* — после завершения динамических процессов. *a-f* получены в геометрии прямой светлополюсной подсветки при скрещенных поляризаторах; *g-l* — при помощи метода темного поля (контраст изображений инвертирован).

равномерное и воспроизводимое перемещение ВБЛ, требуют дальнейших исследований.

При увеличении энергии светового воздействия до  $W \cong 0.2 W_{\max}$  однократный импульс приводит к зарождению пары вертикальных линий Блоха на исходно свободных от ВБЛ границах. На рис. 3, *a-c* представлены типичные изображения локализованных ВБЛ, получаемые после воздействия импульса. Место фокусировки луча отмечено знаком  $\otimes$ . Как видно, на стенках образуются области измененного контраста, соответствующие парам ВБЛ.

Условия эксперимента, при которых реализуется контролируемое и воспроизводимое зарождение линий Блоха, а также различные проявления эффекта генерации ВБЛ подробно обсуждаются в работе [15].

На рис. 4 приведены характерные серии фотографий, демонстрирующие процессы движения доменной границы и зарождения в ней пары ВБЛ после воздействия импульса лазера. На верхней серии представлены „мгновенные“ конфигурации доменной структуры, полученные методом высокоскоростной фотографии в геометрии прямой подсветки (с использованием эффекта Фарадея) со скрещенными поляризаторами. Место фокусировки лазера отмечено крестиком. Как видно, в месте фокусировки лазерного импульса после его приложения возникает темная область, а ближайшая к месту фокусировки доменная стенка смещается, формируя изгиб. Наиболее быстро изгиб нарастает в первые десятки наносекунд после воздействия светового импульса. Затем

в течение 1500–2000 ns он релаксирует к исходному состоянию, что сопровождается исчезновением темной области (эта область соответствует участку образца с пониженным фарадеевским вращением, что вызвано локальным уменьшением величины намагниченности насыщения пленки из-за лазерного перегрева). Нижняя серия фотографий демонстрирует тот же участок образца и тот же процесс при наблюдении по методу темного поля. При этом изгиб ДГ выглядит как локальное изменение яркости изображения стенки. На фотографиях видно, что примерно через 300 ns после приложения светового импульса около области изгиба становятся заметны линии Блоха (отмеченные на рисунке стрелками). Они перемещаются вдоль ДГ и достигают своего конечного положения через упомянутые выше 1500–2000 ns.

На основе полученных экспериментальных данных в [14,15] 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. 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, то это может приводить к продвижению линий Блоха.

Описанный эффект воспроизводимого зарождения линий Блоха позволяет сформулировать следующую концепцию записи магнитного бита информации субмикронного размера при помощи оптического воздействия. Для оптического зарождения магнитного образования размером  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  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 термомагнитной записи на магнитооптических дисках). Изложенные выше результаты экспериментов демонстрируют возможность оптической записи „магнитного“ бита информации не в виде домена, а в виде элемента структуры доменной границы. При этом нет необходимости в соответствии пространственных масштабов записываемой структуры и области локализации лазерного луча. В данном случае „размер“ бита определяется его физической природой как мезоскопического объекта внутри доменной границы, а не характерным масштабом записывающего „инструмента“.

## Оптическое считывание субмикронных магнитных структур

Для детектирования ВБЛ в экспериментах по их зарождению и продвижению оказывается очень удобным метод PADO, так как он позволяет визуализировать и исследовать движение не только ВБЛ, но и самой доменной границы. Однако, если рассматривать ВБЛ как бит информации и интересоваться его считыванием, полезным сигналом является только сигнал от ВБЛ. При этом такая особенность PADO, как представление ВБЛ в виде темной или светлой области на фоне доменной границы (в зависимости от распределения намагниченности в линии), только усложняет схему считывания, требуя трехуровневой (светлая ВБЛ, темная ВБЛ, доменная стенка) дискретизации регистрируемого оптического сигнала. Кроме того, исследование механизма формирования темнопольного изображения ДГ и ВБЛ [12] показало, что в геометрии рис. 1, *a* изменение контраста границы в месте локализации ВБЛ обусловлено не особенностями распределения вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  в границе или линии, а наклоном участка ДГ с ВБЛ. При этом наклон может быть обусловлен различными физическими механизмами [12]. Косвенный характер формирования PADO-изображения в геометрии рис. 1, *a* существенно усложняет микромагнитную интерпретацию экспериментально наблюдаемых дифракционных изображений, не позволяет полностью определять топологию ВБЛ, допускает визуализацию ВБЛ лишь в ограниченном классе образцов [12].

Указанные затруднения метода PADO объясняют интерес к поиску прямых магнитооптических методов, чувствительных непосредственно к распределению намагниченности в линии Блоха и обеспечивающих их надежное и удобное с технической точки зрения детектирование в различных образцах.

Как показали наши исследования, оптическое детектирование ВБЛ может быть реализовано и в других геометриях темнопольной микроскопии [16,17]. Например, в схеме, показанной на рис. 1, *b*, так же как и в „обычном“ PADO, благодаря наклонному падению луча в объектив попадает только рассеянный свет. Однако плоскость падения света установлена параллельно доменным стенкам. При этом ни домены, ни участки стенки без ВБЛ не участвуют в формировании изображения, которое оказывается максимально свободным от засветки изображением доменных границ.

Темнопольные изображения фиксированного участка образца, полученные при падении света в плоскости перпендикулярной и параллельной плоскости доменной стенки (соответственно, традиционное PADO и модифицированная геометрия), представлены на рис. 1, *c* и *e* (ВБЛ отмечены стрелочками). Как видно, при падении света в плоскости доменных границ последние не дают магнитооптической дифракции и не визуализируются, однако, при соответствующем подборе угла падения света становятся видны линии Блоха, имеющие вид светлых пятен (рис. 1, *e*). Важны следующие особенности изображения на рис. 1, *e*, отличающие его от обычного PADO: независимо от магнитной топологии линии Блоха визуализируются как светлые пятна; их размер вдоль и поперек доменной границы примерно одинаков.

Однозначное выяснение физической природы визуализации ВБЛ требует дополнительных экспериментов, однако можно отметить, что изображение линий Блоха хорошо соотносится с некоторыми предсказаниями модели магнитооптической дифракции, развитой в [10]. Данная модель рассматривает дифракцию непосредственно на распределении намагниченности  $\mathbf{M}$  в ВБЛ и трактует доменную стенку как одномерный фазовый край (для поляризованного света), а вертикальные линии Блоха — как точечные центры дифракции. Результаты нашего эксперимента качественно соответствуют предсказаниям описанной модели по 1) отсутствию дифракции на доменных границах, 2) эквивалентности контраста линий Блоха различной топологии, 3) соотношению размеров изображения ВБЛ вдоль и поперек доменной границы.

Изложенные соображения позволяют высказать гипотезу о том, что в представленной геометрии PADO физическим механизмом визуализации ВБЛ является не искажение вертикального профиля ДГ, а прямая магнитооптическая дифракция на распределении намагниченности в линии Блоха.

## Заключение

Описанные выше эксперименты иллюстрируют физические механизмы, обеспечивающие оптическое детектирование магнитных структур размером меньше или

порядка  $0.1 \mu\text{m}$ , а также их зарождение и продвижение путем лазерного воздействия. Обнаруженные физические эффекты демонстрируют возможность реализации основных функций запоминающего устройства (запись информации, ее сдвиг в регистре хранения, считывание) в результате чисто оптического воздействия и могут быть положены в основу разработки новых подходов к построению устройств сверхплотной твердотельной магнитной ВБЛ памяти с оптическим доступом и управлением.

Благодаря таким свойствам, как энергонезависимость и высокая плотность записи информации (до  $1 \text{ Gbit/cm}^2$  и  $128 \text{ Gbit/cm}^3$  [18,19]), устройства памяти на ВБЛ активно исследовались с середины восьмидесятых годов, но не были реализованы из-за сложностей в создании управляемых магнитным полем узлов записи, считывания и продвижения ВБЛ. Обнаруженные эффекты оптического зарождения и детектирования ВБЛ, возможно, позволят устранить указанные проблемы и реализовать устройства сверхплотной магнитной памяти с оптическим доступом с параметрами, превосходящими параметры существующих магнитооптических доменов.

Работа выполнена в рамках программы „Университеты России — фундаментальные исследования“, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований „Ведущие научные школы России“ (грант № 96-15-96620).

## Список литературы

- [1] *Mansuripur M., Sincerbox G.* // Proc. IEEE. 1997. Vol. 85. N 11. P. 1780–1796.
- [2] *Kawata S.* // Proc. IEEE. 1999. Vol. 87. N 12. P. 2009–2020.
- [3] *The Future of Data Storage Technologies* / Ed. S.C. Esener, M.H. Kryder. Baltimore: National Technology Research Institute, 1999. 139 p. (<http://itri.loyola.edu/reports.htm>).
- [4] *Kaneko M., Aratani K., Ohta M.* // Jap. J. Appl. Phys. Vol. 31. P. 568–575.
- [5] *Birukawa M., Miyatake N., Suzuki T.* // IEEE Trans. Magn. 1998. Vol. 34. N 2. P. 438–433.
- [6] *Fuji H., Okumura T., Maeda S.* et al. // IEEE Trans. Magn. 1999. Vol. 35. N 3. P. 2047–2052.
- [7] *Mathew G., Farhang-Boroujeny B., Ng C.Y.* // IEEE Trans. Magn. 2000. Vol. 36. N 4. P. 2098–2108.
- [8] *Kuhlow B., Lambeck M.* // Physica BC80.1975. P. 374–380.
- [9] *Logginov A.S., Nikolaev A.V., Dobrovitski V.V.* // IEEE Trans. Magn. 1993. Vol. 29. N 11. P. 2590–2592.
- [10] *Thiaville A., Boileau F., Miltat J.* et al. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. N 8. P. 3153–3158.
- [11] *Малоземов А., Слонзуски Дж.* Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.: Мир, 1982. 382 с. (Malozemoff A.P., Slonszewski J.C. Magnetic Domain Walls in Bubble Materials. New York: Academic Press, 1979. 382 p.).
- [12] *Thiaville A., Ben Youssef J., Nakatani Y.* et al. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. N 8. P. 6090–6095.
- [13] *Иванов Л.П., Логгинов А.С., Непокойчицкий Г.А.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. Вып. 3. С. 1006–1021.

- [14] *Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. Вып. 6. С. 398–402.
- [15] *Логгинов А.С., Николаев А.В., Николаева Е.П.* и др. // ЖЭТФ. 2000. Т. 117. Вып. 3. С. 571–581.
- [16] *Логгинов А.С., Николаев А.В., Онищук В.Н.* // Сб. науч. тр. Всероссийской научной конференции „Физика конденсированного состояния.“ Стерлитамак, 1997. Т. 2. С. 50–52.
- [17] *Белотелов В.И., Логгинов А.С., Николаев А.В.* // РиЭ. 2001. Т. 46. № 7. С. 870–876.
- [18] *Konishi S.* // IEEE Trans. Magn. 1983. Vol. 19. N 5. P. 1838–1840.
- [19] *Ashton G.* Solid State Memory Study Mid-Term Report. St. Paul: National Media Laboratory, 1993. 152 p.