

Модули магнитно-силового и магнитооптического анализа для наноразмерной диагностики структур

И.А. Новиков^{1,2}, Н.М. Толкач², Д.А. Козодаев², Н.С. Пщелко¹, В.А. Мошников¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²ООО «Активная Фотоника»

Аннотация: В работе рассмотрены пути совершенствования приборной базы для исследования магнитных материалов, применяемых в радиофотонике – области, объединяющей СВЧ-электронику и фотонику. Предложены два вспомогательных модуля для сканирующего зондового микроскопа (СЗМ): источник внешнего магнитного поля и магнитооптический модуль на эффекте Керра. Эти устройства позволяют визуализировать доменную структуру магнитооптических материалов (ферритов-гранатов, пленок с перпендикулярной анизотропией) при воздействии внешнего поля с контролируемой ориентацией (до 2500 Гс). Разработанные модули могут быть интегрированы в стандартные системы СЗМ, обеспечивая нанометровое разрешение и возможность наблюдения быстротекущих процессов перемагничивания, критически важных для создания интегральных радиофотонных устройств – изоляторов, циркуляторов, модуляторов света и магнитостатических волноводов.

Ключевые слова: магнитооптические материалы, эффект Керра, источник внешнего магнитного поля, сканирующая зондовая микроскопия, феррит-гранатовые пленки, доменная структура.

1. Введение

Современная радиофотоника – быстро развивающаяся междисциплинарная область, в которой происходит управление оптическими сигналами с помощью радиочастотных полей. Ключевыми элементами таких систем являются магнитооптические материалы: эпитаксиальные пленки железо-иттриевого граната (YIG) и его легированных модификаций (Ce:YIG, Bi:YIG) [1], а также многослойные структуры с перпендикулярной магнитной анизотропией. На их основе создаются невзаимные устройства (изоляторы, циркуляторы), магнитооптические модуляторы света, фазовращатели и перестраиваемые фильтры на магнитостатических волнах [2-4].

Качество работы этих устройств напрямую определяется доменной структурой и ее поведением во внешнем магнитном поле [5]. Для диагностики доменов на наноуровне необходима прецизионная приборная база. Классическая магнитно-силовая микроскопия (МСМ) имеет ограничения: сравнительно малая скорость сканирования (минуты) и невозможность наблюдать быстрые процессы перемагничивания в реальном времени. Кроме того, традиционные источники внешнего поля часто не позволяют менять ориентацию поля относительно плоскости образца.

В данной работе представлены два вспомогательных модуля для сканирующего зондового микроскопа, разработанные с учетом требований, предъявляемых к условиям проведения эксперимента с современными материалами: источник внешнего магнитного поля с возможностью генерации горизонтальной и вертикальной составляющих вектора индукции (до 2500 Гс) и магнитооптический модуль на основе эффекта Керра, интегрируемый в систему видеонаблюдения СЗМ, которая ранее использовалась лишь как вспомогательный инструмент.

Эти модули в совокупности позволяют:

- исследовать перестройку доменной структуры при приложении поля с заданной ориентацией;
- наблюдать быструю динамику доменов в реальном времени (порядка долей секунды);
- анализировать образцы с размерами доменов до сотен микрометров, что характерно для пленок YIG.

2. Разработка источника внешнего магнитного поля для управления магнитооптическими свойствами

При анализе магнитооптических материалов, предназначенных для радиофотонных устройств, исключительно важно оценивать поведение доменной структуры под действием внешнего магнитного поля. Это необходимо для определения таких параметров, как поле насыщения, коэрцитивная сила, а также стабильность доменных границ при рабочих режимах магнитоэлектронных волноводов и модуляторов.

Для этих целей был разработан источник внешнего магнитного поля [6-8], встраиваемый в базу атомно-силового микроскопа. Конструкция модуля предполагает использование постоянных неодимовых магнитов (NdFeB), обеспечивающих величину магнитного поля до 2500 Гс в зазоре между магнитопроводами. Отсутствие электромагнитов и, следовательно, необходимости в охлаждении минимизирует паразитные вибрации и термический дрейф, что критически важно для прецизионных измерений.

Ключевое усовершенствование по сравнению с предшествующими прототипами [9-11] – возможность изменять ориентацию магнитного поля относительно плоскости образца: горизонтальная (в плоскости) и вертикальная (перпендикулярно поверхности). Достигается это за счет асимметричной геометрии магнитопроводов, формирующих зоны с разным направлением линий индукции (рис. 1).

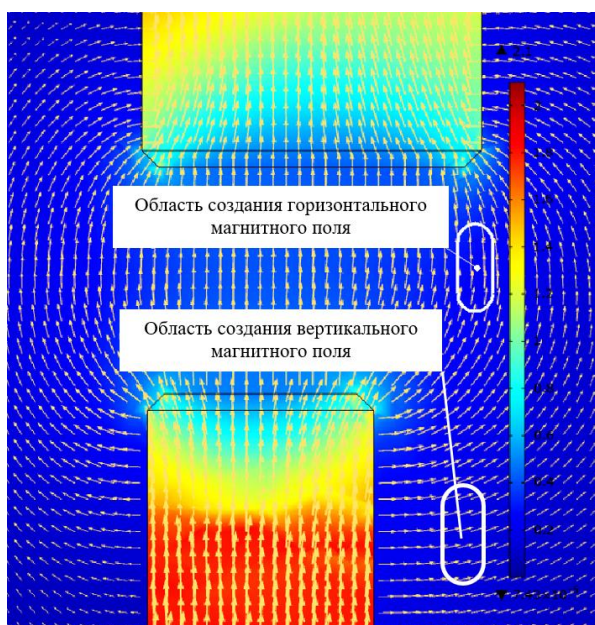


Рисунок 1. Области создания горизонтального и вертикального магнитных полей.

Для радиофотонных приложений это особенно важно, так как:

- Горизонтальное поле используется для управления магнитными свойствами ферритов в изоляторах и циркуляторах;
- Вертикальное поле требуется для исследования материалов с перпендикулярной

магнитной анизотропией, которые перспективны для вертикальных магнитооптических модуляторов.

Предложенный модуль позволяет проводить измерения стандартных для атомно-силовой микроскопии образцов размерами 5×5 мм² с толщиной не более 1,3 мм, что полностью охватывает типичные подложки с эпитаксиальными пленками YIG. На рисунке 2 далее представлена серия изображений, полученных с помощью магнитного-силовой микроскопии. Изображения демонстрируют последовательную перестройку доменных границ при увеличении наведенного внешнего вертикального магнитного поля.

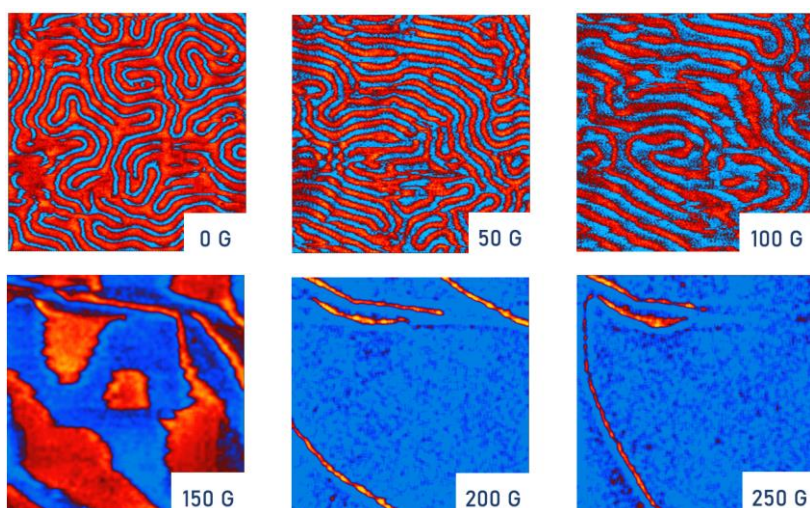


Рисунок 2. Изменение структуры магнитных доменов под влиянием внешнего магнитного поля.

3. Разработка магнитооптического модуля для наблюдения динамики доменов

Внедрение магнитооптического модуля в стандартную систему СЗМ решает две фундаментальные проблемы, свойственные чисто зондовым методам (МСМ) [12].

Первая из них – низкое временное разрешение. Скорость получения данных с помощью зондового микроскопа составляет минуты. СЗМ принципиально не способен регистрировать быстропротекающие процессы, например, движение доменных стенок под действием импульсного магнитного поля с временами порядка микросекунд. Микроскопия на эффекте Керра, напротив, позволяет наблюдать такие процессы в реальном времени с частотой кадров до десятков герц. Это важно для верификации физических моделей магнитоэлектрических волноводов и модуляторов.

Вторая – ограниченное поле зрения. Диапазон сканирования атомно-силового микроскопа ограничен ходом пьезосканера (обычно ≤ 100 мкм в плоскости XY). В то же время размеры магнитных доменов в пленках YIG могут достигать нескольких сотен микрометров и более. Для оптической регистрации масштаб 100–1000 мкм является стандартным, что позволяет получить полную картину распределения доменов по всей поверхности образца.

Реализация модуля выполнена в виде совмещения со штатной системой видеонаблюдения большинства СЗМ. В оптический тракт вводятся поляризатор после источника излучения (светодиод или лазер) и анализатор на поворотной платформе перед видеокамерой.

Варьируя угол между поляризатором и анализатором, можно оптимизировать контраст для материалов с различной ориентацией магнитного момента. В частности, модуль позволяет эффективно исследовать материалы с перпендикулярной магнитной анизотропией (например, многослойные структуры Co/Pt, GdFeCo), а также

стандартные ферритовые пленки. На рис. 3 представлено изображение магнитных доменов, полученное с помощью описанного модуля, интегрированного в СЗМ.

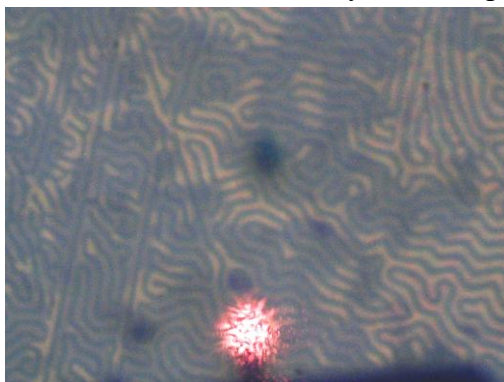


Рисунок 3. Наблюдение магнитных доменов.

Такие изображения позволяют количественно оценить: средний размер домена, шероховатость доменных границ, наличие замыкающих доменов и др.

4. Заключение

В рамках данной работы продемонстрирована возможность переконфигурирования приборных модулей сканирующей зондовой микроскопии для решения задач радиофотоники.

Разработаны два модуля:

Источник внешнего магнитного поля с изменяемой ориентацией поля, позволяющий управлять доменной структурой магнитных материалов в условиях, приближенных к реальной работе радиофотонных устройств.

Магнитооптический модуль, принцип работы которого основан на эффекте Керра, интегрируемый в штатную систему видеонаблюдения СЗМ и обеспечивающий наблюдение доменов в реальном времени на площади до сотен микрометров.

Предложенная комбинация методов может служить основой для гибридного диагностического комплекса, предназначенного для контроля качества эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов, исследования динамики доменных границ и оптимизации структур для магнитоэлектронных волноводов, модуляторов света и невзаимных радиофотонных устройств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-72-32002 (<https://rscf.ru/project/26-72-32002/>).

Список литературы

1. Arsad A.Z. et al. Recent Advances in Yttrium Iron Garnet Films: Methodologies, Characterization, Properties, Applications, and Bibliometric Analysis for Future Research Directions // *Applied Science* – 2023. – Т. 13. – №. 2. – С. 1218.
2. Stadler B.J.H. et al. Integrated magneto-optical materials and isolators: A review // *IEEE Photonics Journal* – 2014. – Т. 6. – №. 1. – С. 6678206.
3. Askarzadeh N. et al. Magneto-optical garnets in photonic integration // *Results in Physics*. – 2025. – Т. 78. – №. 108473.
4. Devitt C. et al. An edge-coupled magnetostatic bandpass filter // *Nature Communications*. – 2024. – Т. 15. – №. 7764.
5. Mendil J. et al. Magnetic properties and domain structure of ultrathin yttrium iron garnet/Pt bilayers // *Physical Review Materials*. – 2019. – Т. 3. – №. 034403.
6. Kozodaev D.A. et al. External magnetic field source for nanoscale research // *The 22nd International Conference on Magnetism: Book of Abstracts (ICM 2024)*. – Bologna, 2024.

7. Патент № 2833421 С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/12. Источник внешнего магнитного поля для магнитно-силовой микроскопии: заявл. 25.04.2024; опубл. 21.01.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, С. В. Костромин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "АКТИВНАЯ ФОТОНИКА".
8. Kozodaev D.A. et al. ADDITIONAL MODULE FOR CREATING AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD FOR MAGNETIC FORCE MICROSCOPY // IX Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism». – 2025. – Т. 1. – С. 124-125.
9. Proksch R. et al. High field magnetic force microscopy // Journal of Applied Physics. – 1995. – Т. 78. – С. 3303-3307.
10. Gomez R.D. et al. Magnetic imaging in the presence of external fields: Technique and applications // J. Appl. Phys. – 1996. – Т. 79. – С. 6441–6446.
11. Shinigava H. et al. Development of variable-temperature scanning probe microscope for high magnetic fields // Physica B. – 2001. – Т. 298. – С. 580-584.
12. Патент № 2849975 С1 Российская Федерация МПК G01Q 60/02, В82У 35/00. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с магнитооптическим микроскопом, для исследования магнитных материалов с перпендикулярной магнитной анизотропией: заявл. 05.08.2024; опубл. 01.11.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, А. В. Кимель, Д. И. Хусяинов, А. Ступакевич; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "АКТИВНАЯ ФОТОНИКА".