ПЕРСПЕКТИВЫ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА

У.Р. Рустамов
Ташкентский экономический и педагогический университет, доцент
Ш.Ф. Усманов
Ташкентский институт социальных и политических наук, преподователь
https://doi.org/10.5281/zenodo.19693778

ANNOTATSIYA

Maqolada materiallarning mikro- va nanodarajadagi magnit xususiyatlarini tahlil qilish uchun magnitoptik Kerr effektiga asoslangan mikroskopik tadqiqot usullarining rivojlanish istiqbollari ko‘rib chiqilgan. Kerr effektining fizik prinsiplari va uning zamonaviy magnit mikroskopiyasida qo‘llanish xususiyatlari tasvirlangan.

KALIT SO‘ZLAR

magnit mikroskopiyasi, domen tuzilmasi, yupqa plyonkalar, nanostrukturalar

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются перспективы развития микроскопических методов исследования, основанных на магнитооптическом эффекте Керра, для анализа магнитных свойств материалов на микро- и наноуровне. Описаны физические принципы эффекта Керра и особенности его применения в современной магнитной микроскопии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

магнитная микроскопия, доменная структура, тонкие пленки, наноструктуры.

ABSTRACT

The article discusses the prospects for the development of microscopic research methods based on the magneto-optical Kerr effect for analyzing the magnetic properties of materials at the micro- and nanoscale. The physical principles of the Kerr effect and the features of its application in modern magnetic microscopy are described.

KEY WORDS

magnetic microscopy, domain structure, thin films, nanostructures

ВВЕДЕНИЕ.

Интенсивное развитие нанотехнологий, спинтроники и функциональных магнитных материалов требует высокоточных методов исследования магнитной структуры вещества на микро- и наноуровне. Особый интерес представляют неразрушающие оптические методы, обеспечивающие визуализацию магнитных доменов и динамики их перестройки в реальном времени. Одним из наиболее информативных и технологически доступных подходов является микроскопия на основе магнитооптический эффект Керра. Данный эффект проявляется в изменении состояния поляризации отражённого света при его взаимодействии с намагниченной поверхностью. В зависимости от геометрии эксперимента возможно получение информации о различных компонентах вектора намагниченности. Это открывает широкие возможности для исследования доменной структуры, процессов перемагничивания, магнитных вихрей, скирмионов и других неоднородных магнитных состояний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В условиях активного развития тонкоплёночных технологий и наноструктурированных систем особую актуальность приобретает совершенствование методов магнитооптической микроскопии, направленных на повышение контрастности, разрешающей способности и временного разрешения. Таким образом, исследование перспектив микроскопических методов, основанных на эффекте Керра, является важным направлением современной физики магнитных явлений и материаловедения. Когда поляризованный свет взаимодействует с магнитной средой, поляризация света может измениться. Когда свет взаимодействует с электроном материала, способ реакции электрона добавляет дополнительные компоненты к ЭМ волне, которые изменяют её поляризацию. Это взаимодействие и есть магнитооптический эффект. Соответствующие уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla E = -\frac{1}{c}\frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \mathrm{H} = -\frac{1}{c}\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\alpha\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\sigma E \end{cases} \quad (1)$$

ЭМ волна, распространяющаяся вдоль оси z, будет задана уравнением (2), где E_0 и H_0 — максимальные амплитуды полей, ω — угловая частота ЭМ волны, t — прошедшее время, а c — скорость света. N — показатель преломления, такой что выполняется уравнение (3). В уравнении (3) k — единичный вектор в направлении z.

$$\begin{cases} E = E_0 e^{-i\omega(t-\frac{Nz}{c})} \\ H = H_0 e^{-i\omega(t-\frac{Nz}{c})} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} N(E \times k) = -H \\ N(H \times k) = -\mathfrak{A}E \end{cases} \quad (3)$$

В уравнении (4), α и σ — тензоры поляризуемости и проводимости соответственно.

$$\begin{cases} \mathfrak{A} = 1 + 4\pi\alpha + \frac{4\pi}{i\omega}\sigma = \begin{bmatrix} A_0 & -A_1 & 0 \\ A_1 & A_0 & 0 \\ 0 & 0 & A_0 \end{bmatrix} \\ A_0 = 1 + 4\pi\alpha_0 + \frac{4\pi}{i\omega}\sigma_0 \\ A_1 = 1 + 4\pi\alpha_1 + \frac{4\pi}{i\omega}\sigma_1 \end{cases} \quad (4)$$

Подставляя значение **H** из уравнения (3), можно получит уравнение (5).

$$\mathfrak{A}E = N^2[E - k(E \cdot k)] \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет компоненты вида уравнения (6).

$$\begin{cases} (A_0 - N^2)E_x - A_1E_y = 0 \\ A_1E_x + (A_0 - N^2)E_y = 0 \\ A_0E_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Взяв определитель компонентов, получены решения для N^2, которые показаны в уравнении (7).

$$\begin{cases} N_+^2 = A_0 - iA_1 \\ N_-^2 = A_0 + iA_1 \end{cases} \quad (7)$$

Два решения показывают, что для N_+^2, $E_y^+ = +iE_x^+$, а для N_-^2, $E_y^- = -iE_x^-$. Другими словами, волна может распространяться либо влево, либо вправо вдоль оси z. После контакта с намагниченной средой волна будет отражена и преломлена, а также станет эллиптически поляризованной[1]. Угол поляризации отражённого света задаётся уравнением 8, а угол поляризации преломлённого света — уравнением (9).

$$\phi_k = -g\frac{N_+ - N_-}{N_+N_- - 1} \quad (8)$$

$$\phi_F = \omega z R\frac{N_+ - N_-}{2c} \quad (9)$$

Затем, подставляя, получается уравнение (10).

$$\begin{cases} N_+ - N_- = (-4\pi)\frac{\left(\frac{\sigma_1}{\omega}\right) + i\alpha_1}{n - ik} \\ \frac{N_+ - N_-}{N_+N_- - 1} = (-4\pi)\frac{\left(\frac{\sigma_1}{\omega}\right) + i\alpha_1}{(n-ik)[(n-ik)^2 - 1]} \end{cases} \quad (10)$$

Магнитооптический эффект называется поразному в зависимости от того, отражается ли свет от образца или проходит сквозь него. Если свет отражается, эффект называется магнитооптическим эффектом Керра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроскопия Керра основана на использовании модифицированных оптических поляризационных микроскопов или подобных установок с обычными объективами, что обеспечивает гибкую широкопольную визуализацию от сантиметрового до микрометрового масштаба (рис.2(1)–(6)). (1)- Изображение доменов с большим полем зрения из смешанной моноплёнки Ni81Fe19 (40 нм) с низкой анизотропией. (2)- Вариации Ландау-доменных структур в квадратных элементах из Ni81Fe19 (50 нм). (3)- Магнитное состояние «луковица» в кольцевой структуре из Co90Fe10 (0.8 нм)/Ni81Fe19 (28 нм) шириной 300 нм. (4)- Квазистатическое изображение доменов образования скирмионных пузырей в тонкой плёнке Co40Fe40B20 (1.4 нм)/MgO. (5)- Одноимпульсная динамическая эволюция доменов в микрометровом слое граната (одноимпульсная визуализация с длительностью импульса 20 нс, МО-контраст на основе эффекта Фарадея). (6)- Количественная динамическая визуализация доменов спиновых волн в плёнке Co40Fe40B20 (120 нм) (частота возбуждения 3 ГГц, временное разрешение 7 пс) [2,3]. Следовательно, обычно применяются длины волн в видимом спектре, что ограничивает достижимое пространственное разрешение областью порядка 100 нм.

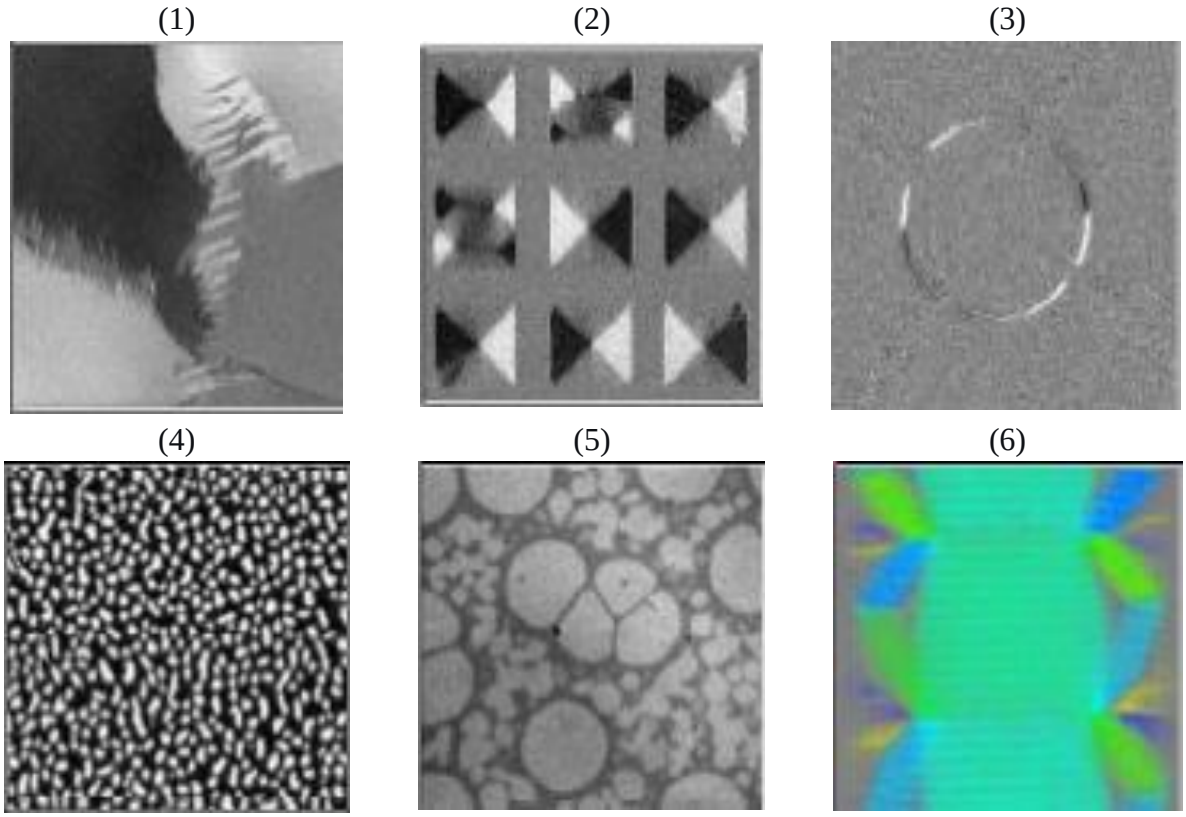


Рис.2. Примеры изображений, полученных с помощью микроскопии Керра, на разных масштабах длины и времени.

Аналогичные аргументы справедливы для микроскопии на основе эффекта Фарадея и эффекта Фойгта, последний также применим для визуализации доменов в коллинеарных антиферромагнетиках, что не следует путать с обычной визуализацией двулучепреломления в магнитострикционных антиферромагнетиках [4]. Пространственно-временная визуализация Керра, превосходящая современный уровень, потребует корректировок в общей механике, детектировании изображения и источнике освещения.

Временное разрешение в микроскопии Керра может быть существенно повышено за счёт включения улучшенных импульсных лазерных систем, включая технологии сжатия импульсов, с субфемтосекундным разрешением в лабораторных экспериментах. Нестробоскопические режимы динамической визуализации для захвата стохастических и хаотических процессов должны будут опираться на включение мощных высокоинтенсивных лазеров с высокочувствительными камерами. Одноимпульсная визуализация неповторяющихся событий намагничивания в области ниже магнитного резонанса, до сих пор являющаяся «белым пятном» в визуализации динамики намагничивания, может быть решена с помощью гибких диодных лазеров.

ВЫВОДЫ

Внедрение новых режимов визуализации может привести к дальнейшим улучшениям, которые трудно предвидеть. Тем не менее, объединение этого с другими методами или полный отказ от стандартных схем микроскопии Керра, включающих методы ближнепольной оптической визуализации, основанные на детектирующих слоях с магнитооптически активными дефектными спинами или на совершенно новых способах использования обычных МО-эффектов, может стать будущим МО-микроскопии.

Благодаря продолжающемуся развитию, микроскопия Керра останется одной из важнейших техник для визуализации магнитных доменов. Основанная на оптике, она предлагает прямой доступ к исследованию сверхбыстрых магнитных процессов. Наиболее сложной задачей, достигающей фундаментального предела, является ограничение пространственного разрешения-препятствие, преодоление которого будет трудным. Несмотря на это, благодаря последним улучшениям со стороны освещения и детектирования, прикладная микроскопия Керра развилась за последнее десятилетие и продолжит вносить ценнейший вклад в исследования магнетизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ochilov O.O., Turkmenov X.I., Rustamov U.R., Malikov K.X., Ismatov A.A. Generalized fresnel formulas for reflection and transmission of light for the case of a ferromagnetic plate // Telematique, Vol. 22, № 1(2023), p. 1705-1707.
2. У.Р. Рустамов. Измерение магнитной циркулярно-поляризованной люминесценции в кристаллах гольмий-содержащих гранатов. // Вестник НУУз, Ташкент, 2024, №3/1, с. 500-504.
3. Hubert A, Schäfer R. 1998 Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures // Berlin:Springer, 1998, №6, p. 68-73.
4. Soldatov I.V., Schäfer R. 2017 Selective sensitivity in Kerr microscopy // Rev. Sci. Instrum. 2017, № 88, p. 68-73.