

05;12

Раман-визуализация доменов и тонкой структуры доменной границы в YFeO_3

© А.П. Кузьменко, П.В. Абакумов

Юго-Западный государственный университет, Курск
E-mail: apk3527@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2011 г.

Предложен метод визуализации доменной структуры и тонкой структуры доменной границы в магнитоупорядоченных средах. Возможности метода продемонстрированы на примере визуализации структуры доменов и доменной границы в пластинчатом образце слабого ферромагнетика YFeO_3 по гиперспектральным распределениям изменений интенсивности комбинационного рассеяния света по линии 221 cm^{-1} .

Развитие технического и программного обеспечения позволило качественно повысить уровень микроспектральных рамановских исследований при изучении квазичастичных возбуждений в различных материалах, что особенно важно применительно к материалам с магнитным упорядочением, в которых электрическая составляющая вызывает магнон-магнонные, магнон-фононные и магнон-экситонные взаимодействия, сопровождается как рассеянием, так и поглощением падающего излучения [1–4].

Для исследований статической и динамической доменных структур (ДС) помимо магнитооптических методов применяются методы мессбауэровской спектроскопии, мандельштам-бриллюэновского рассеяния [1]. Ранее по комбинационному (рамановскому) рассеянию света (КРС) были изучены фононные колебания в YFeO_3 в интервале от -50 до 50 cm^{-1} [2], процессы одно- и двухмагнонного КРС в редкоземельных и иттриевом ортоферритах при разных температурах, в том числе в области спиновой переориентации вблизи $k = 0$ [3]. Слабоферромагнитное (СФМ) упорядочение в YFeO_3 вызывается сверхподрешеточным обменным взаимодействием только за счет магнитных ионов Fe^{3+} [1]. В YFeO_3 при когерентном и обычном антистоксовом

КРС до 5000 cm^{-1} обнаружены генерация третьей гармоники (при возбуждении Ar-лазером), однофонное ($> 200\text{ cm}^{-1}$) и двухфонное ($> 1285\text{ cm}^{-1}$), а также двухмагннное рассеяние в окрестности 900 cm^{-1} [4].

В данной работе впервые получено рамановское изображение ДС и доменной границы (ДГ) для магнетика со слабоферромагнитным упорядочением — YFeO_3 , с двухдоменной структурой в статическом состоянии. Ранее [5] подобная техника измерений позволила визуализировать ДС в сегнетоэлектрике типа LiNbO_3 .

Объектом исследования служил пластинчатый монокристаллический образец YFeO_3 толщиной $100\text{ }\mu\text{m}$, вырезанный перпендикулярно к оптической оси. Слабоферромагнитный момент в образце с такой геометрией наклонен на $\sim 38^\circ$ относительно плоскости образца, а прохождение света вдоль оптической оси характеризуется максимальной магнитооптической добротностью, достаточной для визуализации как ДС, так и ДГ на модернизированном для их исследований конфокальном микроскопе, входящем в комплекс для рамановских микроспектральных исследований, типа OmegaScope AIST-NT.

Измерения раман-спектров YFeO_3 производились в соседних доменах и непосредственно внутри ДГ в области с размерами $0.5\text{ }\mu\text{m}$. Образец помещался на 5-координатном гониометрическом столике с точностью поворота $5'$. Спектр КРС в двух соседних доменах представлен на рис. 1. Так же как и в [4], в них обнаружены линии (с соответствующей шириной — $\Delta\omega$) 156 (19), 186 (11), 221 (12), 281 (12), 243 (12), 430 (23), 499 (15), 667–852 (200), 1192 (24), 1301 (64) cm^{-1} в поле световых волн возбуждения 473 (23), 532 (50), 785 (80 mW) nm, часть из которых ранее наблюдалась в [4]. Изменение интенсивности на линии 221 cm^{-1} оказалось наибольшим и составило вплоть до 34% в соседних доменах, как это иллюстрирует вставка к рис. 1. Другие наблюдаемые линии имели существенно меньшее изменение интенсивности при измерениях КРС в областях с различной намагниченностью. Обращает на себя внимание значительное различие в ширине пиков по уровню 0.5. Все пики с малыми волновыми числами имели ширину $\Delta\omega$ около 20 cm^{-1} , тогда как линии начиная с 667 cm^{-1} в несколько раз шире. Это может указывать на различную природу их возбуждения: оптические фонные ($\Delta\omega \sim 20\text{ cm}^{-1}$) или магннные ($\Delta\omega > 60\text{ cm}^{-1}$) колебания. Увеличение числа возбуждаемых линий КРС, по сравнению с [4], видимо, обусловлено более другой

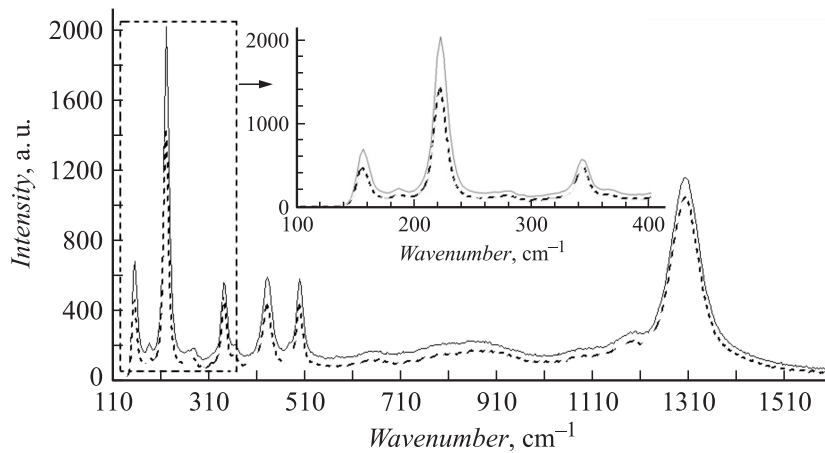


Рис. 1. Раман-спектры YFeO_3 в соседних доменах. Сплошная и штриховая линии соответствуют противоположно намагниченным доменам.

ориентацией тонкого пластинчатого образца YFeO_3 (в нашем случае перпендикулярно оптической оси, а в [4] перпендикулярно оси легкого намагничивания — $[011]$).

Установлено также, что изменение интенсивности для линии 221 cm^{-1} (рис. 2) при повороте образца YFeO_3 относительно его оптической оси носит осциллирующий характер. Ориентационная зависимость изменений интенсивности этой линии КРС в соседних доменах явно знакопеременна. Максимальное различие интенсивности спектрального пика 221 cm^{-1} в соседних доменах наблюдается при $\alpha = 20, 70, 120$ и 170° , т.е. через каждые 50° и достигает $\sim 34\%$. Согласно [4], этот пик соответствует оптическим фононным возбуждениям. Отметим, что существование ДГ сопровождается возникновением спонтанных напряжений магнитострикционной природы [1], которые должны вызвать изменения в спектре КРС. Именно это обосновывает возможность применения метода *gmap-mapping* (картирования) как в ДС, так в окрестности и внутри самой ДГ, что и было использовано для построения распределений намагниченности в исследуемом образце.

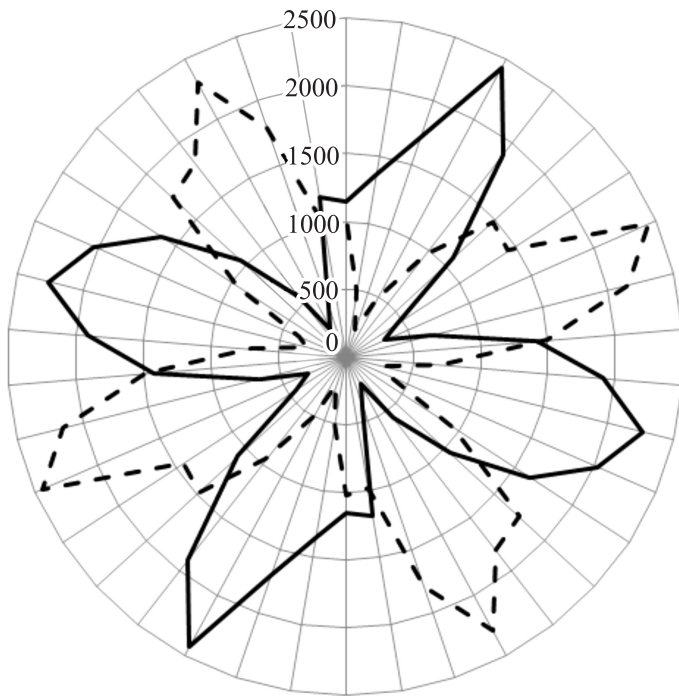


Рис. 2. Угловая зависимость интенсивности линии 221 cm^{-1} . Сплошная и штриховая линии соответствуют противоположно намагниченным доменам.

Прецизионное позиционирование образца для картирования осуществлялось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) с точностью 0.05 nm . Область на образце с ДС и ДГ выбиралась с помощью конфокального микроскопа с объективом $10\times$ с числовой апертурой 0.28 . Для получения гиперспектральных данных использовался объектив $100\times$ с числовой апертурой 0.7 . Достижимое при этом пространственное разрешение мейпинга (диаметр пучка лазерного излучения) составляло 500 nm . Естественное пространственное ограничение при совместной съемке КРС- и АСМ-сканировании кантилевером в исследуемой области составляло $100 \times 100 \mu\text{m}$, что крайне недостаточно для изучения структуры ДС и ДГ. Поэтому картирова-

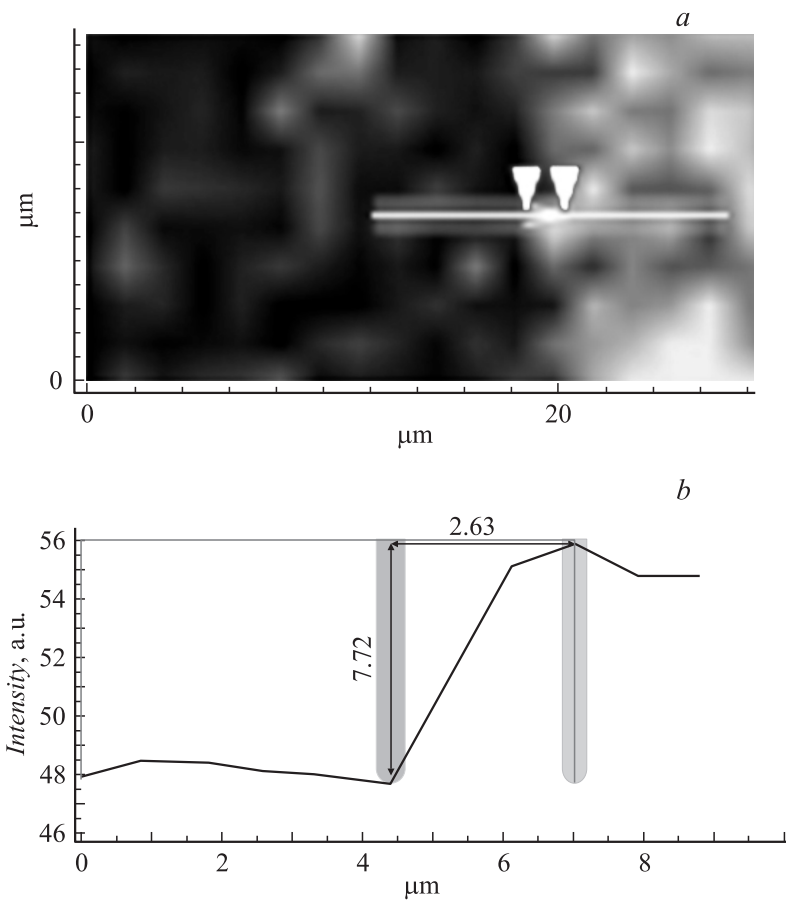


Рис. 3. Методика mapping: *a* — визуализация края ДС в YFeO₃, *b* — передний (или задний) фронт ДГ.

ние по спектрам КРС осуществлялось пьезоприводами позиционера системы ввода-вывода излучения с максимальным полем картирования $20 \times 20 \mu\text{m}$. По полученной, таким образом, карте гиперспектрального распределения намагниченности может быть определен передний (или задний фронт) ДГ (рис. 3, *a, b*).

Непреводимые представления и соответствующие им колебания элементарной ячейки ортоферрита иттрия

D_{2h}		C_{2h}	
A_g		A_g	R_z
B_{1g}	R_z	A_g	R_z
B_{2g}	R_y	B_g	R_x, R_y
B_{3g}	R_x	B_g	R_x, R_y
A_u		A_u	T_z
B_{1u}	T_z	A_u	T_z
B_{2u}	T_y	B_u	T_x, T_y
B_{3u}	T_x	B_u	T_x, T_y

Первые два столбца для пространственной симметрии D_{2h} , вторые — для позиционной симметрии иона железа C_{2h} .

Построчное сканирование пьезопозиционерами ввода-вывода сфокусированного лазерного излучения по образцу с шагом $0.6 \mu\text{m}$ позволило впервые по гиперспектральным данным (по 400 спектрам КРС) построить пространственное изменение намагниченности внутри ДГ в пластинчатом образце YFeO_3 . На рис. 4 представлена карта распределения намагниченности внутри ДГ с максимальной шириной.

Перемещением сканирующего столика АСМ по высоте с помощью пьезопозиционеров могла осуществляться фокусировка иницирующего лазерного излучения по толщине исследуемого образца. Полученные таким образом интегральные зависимости поглощения как оптического падающего излучения, так и КРС соответствовали закону Ламберта–Бугера с коэффициентами поглощения, отвечающими как обычному оптическому поглощению при прямом проходе до точки фокусировки, так и сигналам КРС. Можно ожидать, что совмещение гиперспектральных распределений намагниченности на разных глубинах по толщине с их плоскостными распределениями создает принципиальные возможности для построения их 3D-изображений по всему объему исследуемых магнитных образцов с ДГ и ДС.

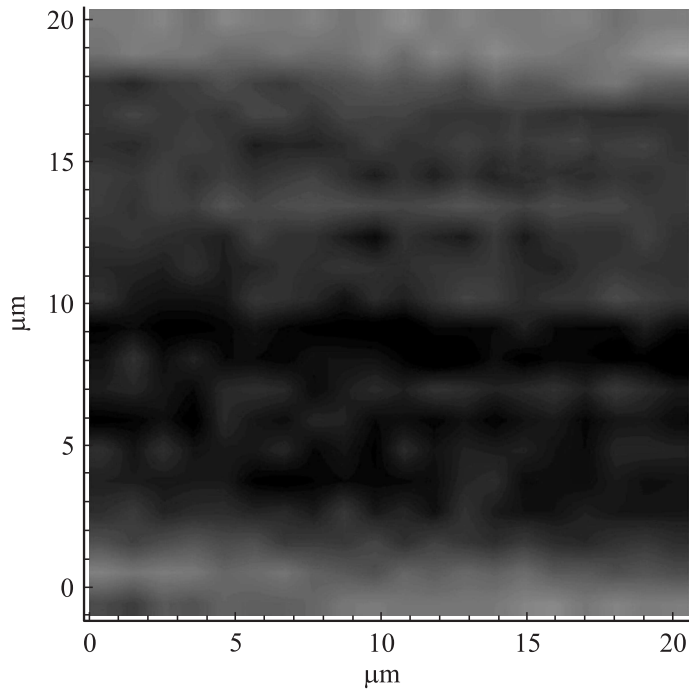


Рис. 4. Карта изменений намагниченности внутри ДГ.

Элементарная ячейка YFeO_3 соответствует ромбической сингонии и описывается пространственной группой $R\bar{3}m$ в международных обозначениях или D_{2h}^{16} в обозначениях Шенфлиса [1]. Позиционная симметрия иона Fe^{3+} — C_{2h} . Корреляция пространственной и позиционной симметрии приведена в таблице. Из данной таблицы видно, что полное колебательное представление для магнитного иона представлено в следующем виде: $\Gamma = A_g + A_u$, однако колебание A_u не дает вклада в спектр КРС. Таким образом, колебаниям магнитного иона Fe^{3+} соответствует только одно неприводимое представление A_g . Данное неприводимое представление соответствует трансляционным колебаниям магнитных подрешеток [1] относительно оси [001]. Зависимость интенсивности пика A_g в раман-спектре YFeO_3 от угла α между

вектором поляризации света (E) и проекцией магнитного момента на плоскость образца ($m \sin \beta$) (рис. 2) носит гармонический характер:

$$I = \pm I_0 \cos b\alpha, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность при $\alpha = 0$, b — нормировочный множитель, учитывающий период осцилляции интенсивности. Знаки в (1) учитывают направление намагниченности в ДС, что соответствует опытно наблюдаемой противофазной угловой зависимости интенсивности КРС в соседних доменах (рис. 2). Данная зависимость подтверждает возможность визуализации (рис. 3, *a*) ДС, переднего (или заднего) фронта ДГ (рис. 3, *b*), а также исследование особенностей внутренней структуры ДГ (рис. 4) с помощью раман-спектроскопии. Изменение интенсивности КРС (рис. 3, *b*), представленное для криволинейной ДГ, более наглядно демонстрирует возможности изучения параметров ДГ. Анализ проводится программно. Передний (или задний) фронт ДГ (рис. 3, *a*) отмечен треугольными маркерами (рис. 3, *b*); по его наклону с учетом симметричности и толщины всей ДГ может быть определен ее реальный размер. Ширина переднего (или заднего) фронта ДГ, огибающей дефект, составила $2.63 \mu\text{m}$ (рис. 3, *b*), для ДГ прямолинейной она в несколько раз меньше.

Для анализа тонкой структуры ДГ по гиперспектральному распределению КРС нами был выбран участок с сильным искривлением ДГ. На рис. 4 приведена карта намагниченности, полученная в области $20 \times 20 \mu\text{m}$, представляющая собой изображение внутренней структуры ДГ. Сферические образования на краю статической ДГ могут выступать в качестве зародышевых центров формирования дополнительных каналов диссипации энергии движущейся ДГ. Подобные неоднородности опытно наблюдаются при движении ДГ со сверхзвуковыми скоростями [1]. Наблюдаемая на рис. 4 темная область в центре ДГ может представлять область с нулевой намагниченностью, которая характерна для ДГ неелевского типа, что согласуется с теоретическими выводами [6].

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (ГК П391, П547, П947).

Список литературы

- [1] *Bar'yakhtar V.G., Chetkin M.V., Ivanov B.A., Gadetskii S.N.* Dynamics of Topological Magnetic Solitons, Experiment and Theory. Berlin: Springer-Verlag, Springer Tracts in Modern Physics, 1994. 129. 179 p.
- [2] *Koshizuka N., Hayashi R.* // J. of the Phys. Soc. of Japan. 1988. V. 57. N 12. P. 4418–4428.
- [3] *White R.M., Nemanich R.J., Herring C.* // Phys. Rev. 1982. V. 25. N 3. P. 1822–1836.
- [4] *Takahashi J-i., Matsubara E., Arima T., Hanamura E.* // Phys. Rev. 2003. B68. P. 155102-1–155102-5.
- [5] *Зеленовский П.С., Шур В.Я., Кузнецов Д.К., Мингалиев Е.А., Fontana M., Bouzon P.* // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 1. С. 106–109.
- [6] *Фарзтдинов М.М., Шамсутдинов М.А., Халфина А.А.* // ФТТ. 1979. Т. 21. В. 5. С. 1522–1527.