

УДК 537.622

Оригинальная статья

**Анализ параметров доменной структуры монокристаллов
 $RFe_{11}Ti$ ($R = Y, Gd, Ho, Er$) по данным магнитно-силовой микроскопии**

А.М. Гусева, А.И. Синкевич, С.Д. Сметанникова, Е.М. Семенова, Ю.Г. Пастушенков

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверская область, Тверь, ул. Желябова, 33

semenova_e_m@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.085

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования магнитной доменной структуры на базисной плоскости монокристаллов $RFe_{11}Ti$ ($R=Y, Gd, Ho, Er$) методом магнитно-силовой микроскопии. При комнатной температуре соединения характеризуются магнитокристаллической анизотропией типа «ось легкого намагничивания». На основе данных магнитно-силовой микроскопии определены параметры дополнительных доменов на базисной плоскости образцов. С помощью метода Боденбергера–Хуберта по данным магнитно-силовой микроскопии определены величины поверхностной плотности энергии доменных границ γ для всех составов: $YFe_{11}Ti$ – 4,05 мДж/м², $GdFe_{11}Ti$ – 5,93 мДж/м², $HoFe_{11}Ti$ – 4,97 мДж/м², $ErFe_{11}Ti$ – 2,98 мДж/м². Методом подсчета кубов рассчитаны значения фрактальной размерности D_L полей рассеяния доменной структуры на разной высоте от поверхности (0,1 – 9 мкм). D_L на поверхности шлифов имеет значения 2,62 для соединений с $R = Y, Gd, Ho$ и 2,72 – для $R=Er$. Для всех образцов D_L максимальна вблизи поверхности.

Ключевые слова: редкоземельные интерметаллиды, доменная структура, магнитно-силовая микроскопия, фрактальная размерность.

1. Введение

Редкоземельный интерметаллид типа RFe_{12} (где R – атом редкоземельного элемента) нестабилен, и для стабилизации его структуры применяется замещение части атомов Fe другим элементом: $RFe_{12-x}M_x$ (где M – атом замещения) [1-4]. При этом для того, чтобы сохранить высокую намагниченность соединения, замещение должно быть минимальным. Экспериментально было установлено, что замещение Fe на Ti приводит к термодинамической стабильности структуры уже при $x=1$ [3].

Соединения $RFe_{11}Ti$ обладают высокой намагниченностью, магнитокристаллической анизотропией и температурой магнитного упорядочения, и поэтому рассматриваются специалистами как перспективные функциональные магнитные материалы. Эти интерметаллиды характеризуются тетрагональной кристаллической решеткой со структурой типа $ThMn_{12}$ (пространственная группа I_4/mmm), широкой областью гомогенности и демонстрируют огромное разнообразие магнитных свойств, включающих наличие спин-переориентационных фазовых переходов, магнитокалорический эффект, магнотострикционный и инварный эффекты [1-10]. Значения температуры Кюри лежат в пределах от 488 до 607 К в зависимости от редкоземельного элемента, причем самые высокие значения соответствуют соединениям с Gd [6, 11]. На составах с

© А.М. Гусева, А.И. Синкевич, С.Д. Сметанникова, Е.М. Семенова, Ю.Г. Пастушенков, 2024

Sm было достигнуто высококоэрцитивное состояние что, открывает перспективу применения этих соединений в качестве основы для постоянных магнитов [12]. Основной задачей настоящего исследования является анализ магнитной доменной структуры монокристаллов соединений $RFe_{11}Ti$ ($R = Y, Gd, Ho, Er$) с целью определения поверхностной плотности энергии доменных границ.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Исходные сплавы выплавлялись из высокочистых металлов методом высокочастотной индукционной плавки в среде особо чистого аргона. Масса выплавляемых слитков составляла 50-100 г. Из центра слитков выкалывались зерна, которые имели форму четырехгранной призмы. Зерна аттестовывались и для исследования отбирались образцы, которые наилучшим образом соответствовали условиям монокристалличности.

На следующем этапе отобранные образцы монокристаллов фиксировались с помощью самотвердеющей пластмассы «Протакрил-М» таким образом, чтобы поверхность шлифа была перпендикулярна оси легкого намагничивания, т.е. шлиф приготавливался на базисной плоскости образцов. Шлифовка и полировка образцов выполнялись на алмазных пастах.

Исследования поверхности шлифов проводились методом оптической и магнитно-силовой микроскопии. На металлографическом микроскопе Axiovert 200MAT (Zeiss) выполнялись предварительные исследования магнитной доменной структуры методом полярного эффекта Керра. Однако основной массив исследования доменной структуры в данной работе был выполнен на микроскопе SolverNext (NT-MDT) с применением двухпроходной методики для регистрации полей рассеяния магнитной доменной структуры (ДС). Расстояние между зондом и образцом при втором проходе варьировалось от 0,1 до 9,83 мкм. При сканировании применялся магнитный кантилевер MFM_LM (TipsNano), предназначенный для образцов с низкой коэрцитивностью.

В соответствии диаграммой температурных интервалов существования магнитных фаз соединений $RFe_{11}Ti$ [9], рассматриваемые составы с $R = Y, Gd, Ho, Er$ при комнатной температуре характеризуются магнитокристаллической анизотропией (МКА) типа «ось легкого намагничивания». Таким образом, на базисной плоскости должны формироваться дополнительные домены, имеющие форму «звездочек». Все приведенные соединения характеризуются фактором качества $Q > 1$, поэтому к ним может быть применен метод микромагнитного анализа Боденбергера-Хуберта, который позволяет по экспериментально измеренным параметрам доменов на поверхности монокристалла оценить

поверхностную плотность энергии доменных границ γ [13]. Для расчета γ используют выражение Боденбергера-Хуберта:

$$\gamma = \frac{DM_s^2}{4\pi\beta}, \quad (1)$$

где D – средняя ширина доменов, M_s – намагниченность насыщения, β – эмпирический коэффициент, равный 0,31 [13].

Изображения полей рассеяния доменной структуры на базисной плоскости монокристаллов $YFe_{11}Ti$ и $GdFe_{11}Ti$ представлены на рис. 1, а составов $HoFe_{11}Ti$ и $ErFe_{11}Ti$ – на рис. 2. Видно, что конфигурация доменов на всех образцах соответствует типичной структуре «звездочек» характерных для магнетиков с МКА типа «ось легкого намагничивания».

Изначально метод Боденбергера-Хуберта был предложен для анализа изображений доменной структуры, полученных средствами оптической микроскопии. Однако, магнитно-силовая микроскопия позволяет получать изображения поверхности с большим разрешением, поэтому данный метод был адаптирован и применен к МСМ изображениям.

Средняя ширина доменов D определялась на основе экспериментальных МСМ изображений полей рассеяния доменной структуры образцов по формуле:

$$D = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n}, \quad (2)$$

где n – линейная плотность экстремумов, то есть число экстремумов на единицу длины линии сканирования.

Для увеличения точности расчетов величина n должна определяться на основе МСМ изображения, полученного на минимальной достижимой высоте подъема зонда над образцом z , а в идеальном случае на поверхности образца ($z=0$). Экспериментально получить снимок полей рассеяния на поверхности образца не представляется возможным в силу приборных особенностей метода регистрации МСМ изображения (минимально достижимая высота подъема порядка 0,05-0,15 мкм в зависимости от поверхности). Поэтому в данной работе были получены серии МСМ изображений с варьирующейся в широком интервале высотой подъема $z = 0,10-9,83$ мкм. На основе полученных серий изображений был произведен расчет линейной плотности экстремумов n для каждого снимка и построены зависимости $n(z)$ (см. рис. 3 (красные точки)). Полученные кривые $n(z)$ были аппроксимированы следующим выражением:

$$n(z) = n_m + \Delta n \cdot e^{-kz}, \quad (3)$$

здесь $\Delta n = n_0 - n_m$, а n_m – величина линейной плотности экстремумов в правой части кривых $n(z)$, где эта величина стремится к постоянному

значению (см. рис. 3); k – коэффициент, описывающий скорость падения величины n и имеющий размерность волнового вектора (мкм^{-1}); n_0 – искомая величина линейной плотности экстремумов на поверхности образца.

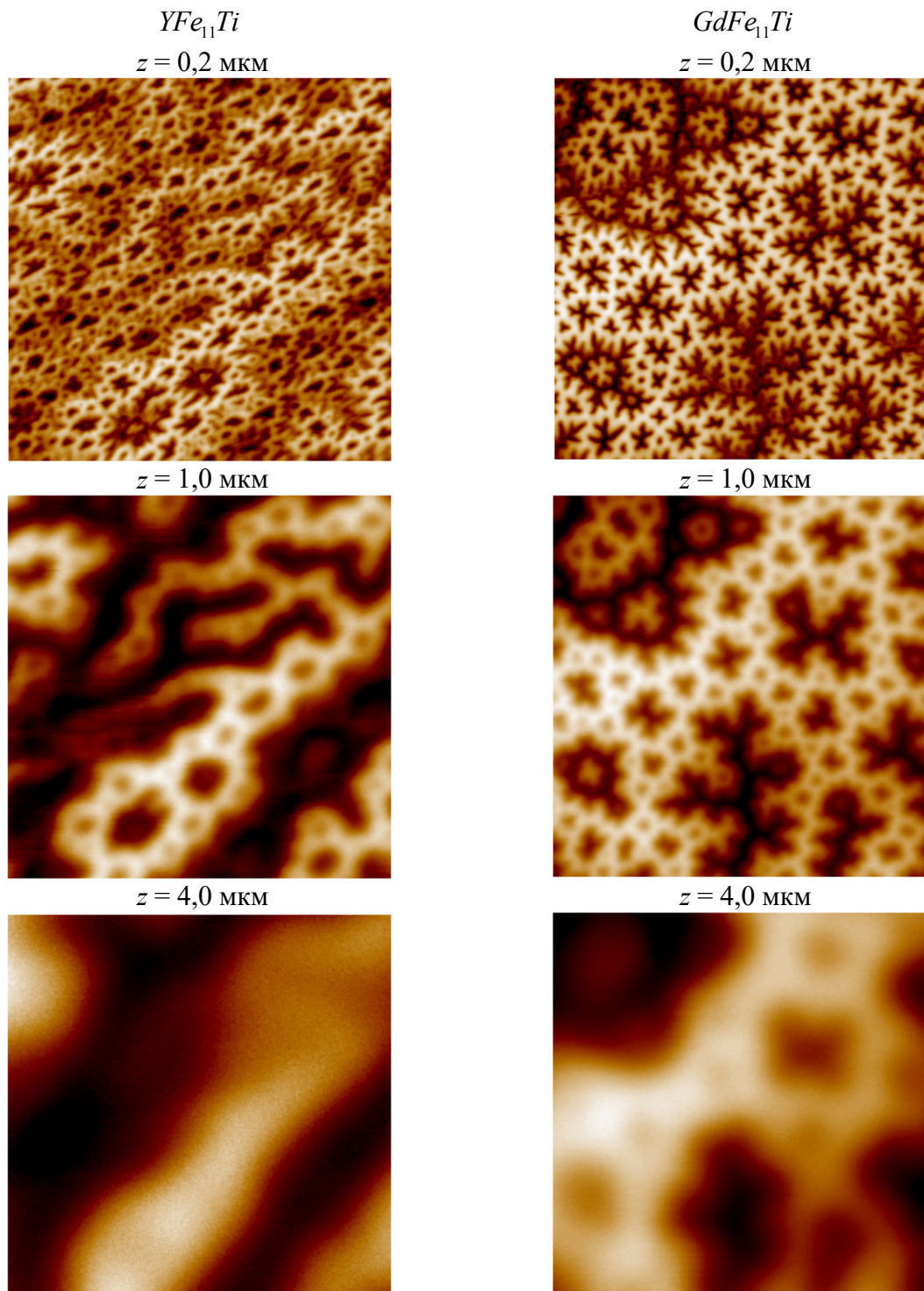


Рис. 1. МСМ изображения, полученные на базисной плоскости монокристаллов $YFe_{11}Ti$ (масштаб изображения $30 \times 30 \text{ мкм}$) и $GdFe_{11}Ti$ (масштаб изображения $50 \times 50 \text{ мкм}$) на разной высоте сканирования z .

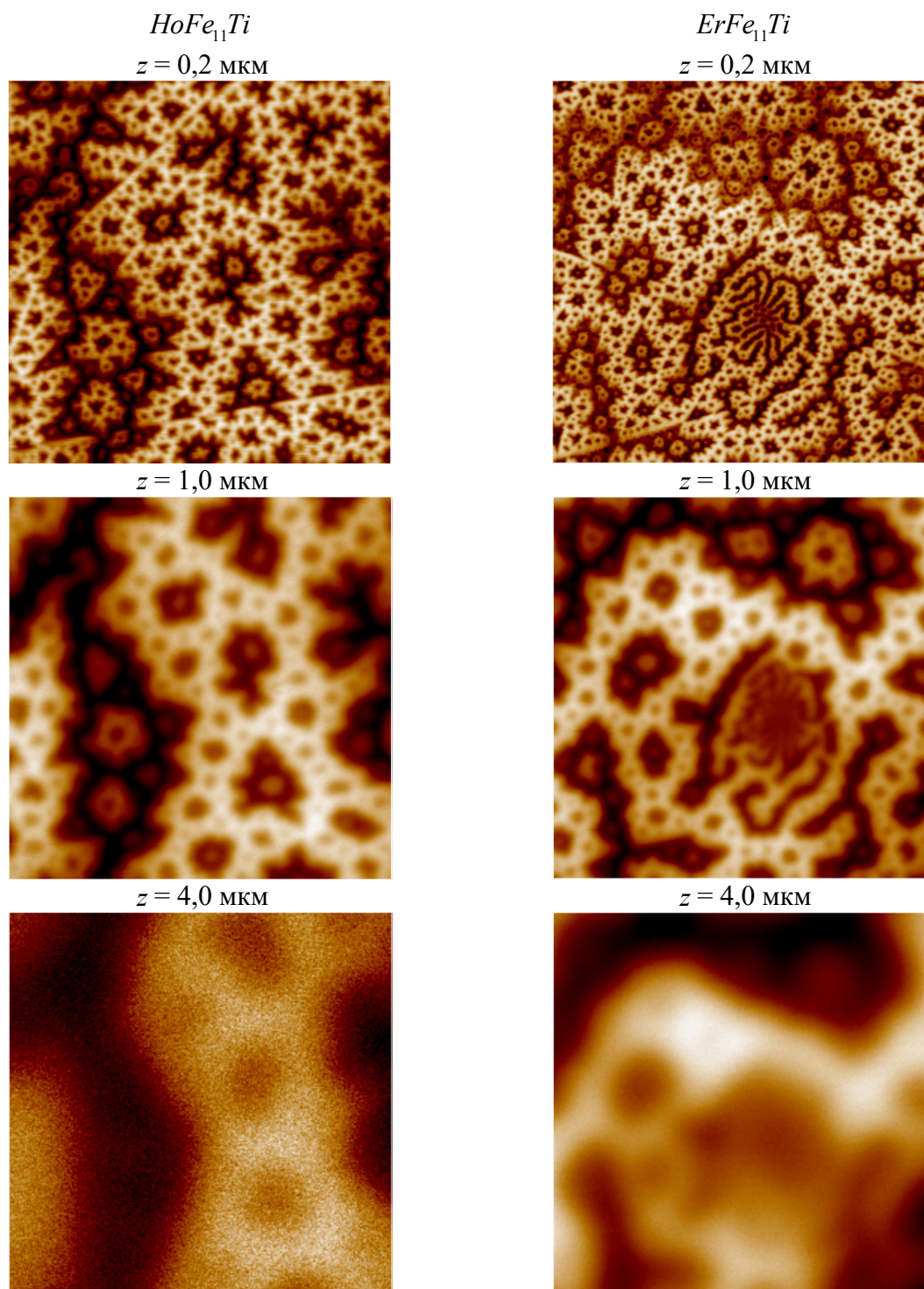


Рис. 2. МСМ изображения, полученные на базисной плоскости монокристаллов $ErFe_{11}Ti$ (масштаб изображения 50×50 мкм) и $HoFe_{11}Ti$ (масштаб изображения 50×50 мкм) на разной высоте сканирования z .

В процессе аппроксимации экспериментальных кривых $n(z)$ выражением (3) величина n_m определялась из самих зависимостей, в то время как величины k и n_0 варьировались так, чтобы наилучшим образом

описать экспериментальные данные. Результат аппроксимации представлен на рис. 3 в виде пунктирных линий, расчетные значения линейной плотности экстремумов на поверхности образца (при $z = 0$) приведены в Таблице 1.

Значения намагниченности насыщения образцов были получены из экспериментальных кривых намагничивания, представленных в работах [5, 6, 13–16]. Конкретные численные значения M_s , примененные в расчетах, приведены в Таблице 1.

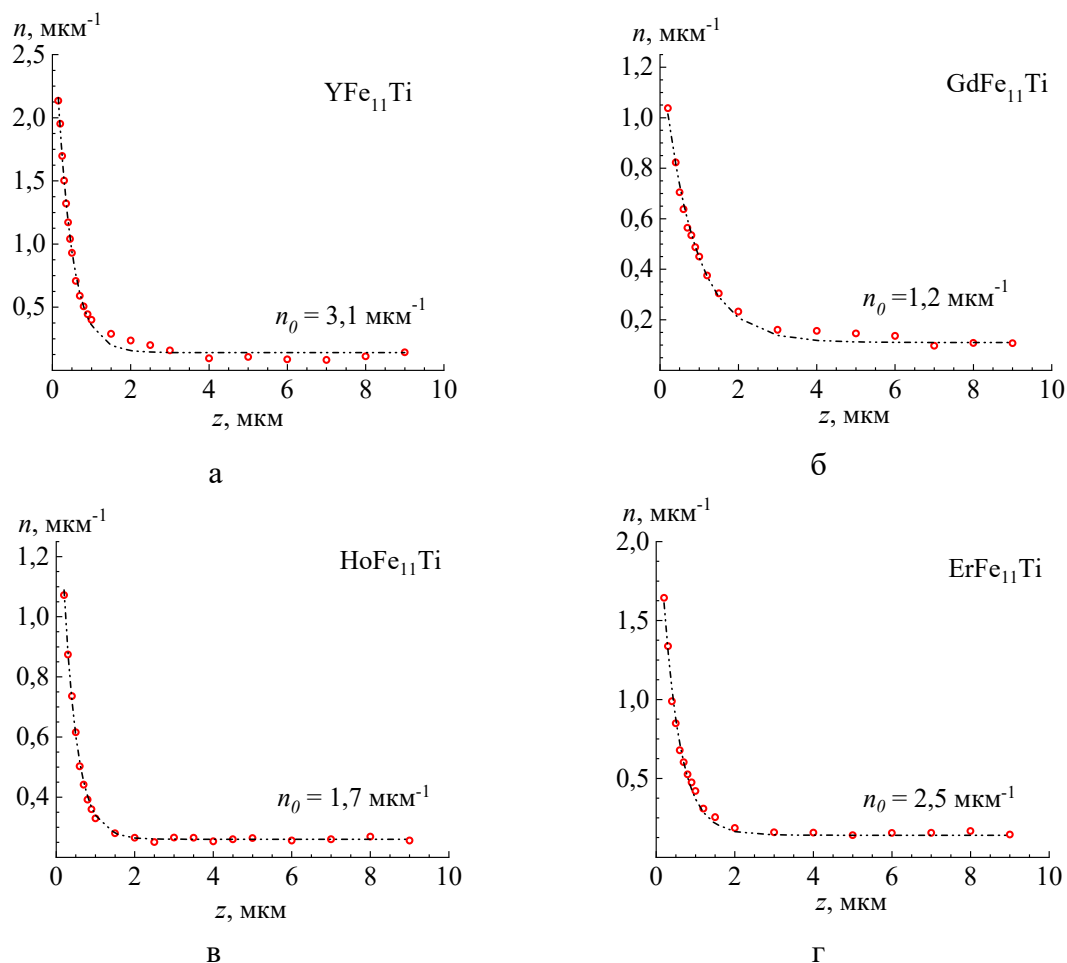


Рис. 3. Зависимость $n(z)$ для монокристаллов: а – YFe_{11}Ti , б – $\text{GdFe}_{11}\text{Ti}$, в – $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$, г – $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$.

На основе рассчитанных значений n_0 с помощью выражений (2) и (1) была определена средняя ширина доменов D_0 и микромагнитный параметр поверхностной плотности энергии доменных границ γ . Характеристики монокристаллов и результаты вычислений представлены в Таблице 1. Наименьшее значение поверхностной плотности энергии доменных границ было получено для монокристалла $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ – $2,98 \text{ мДж/м}^2$. Значения γ для остальных составов варьируется в пределах $4,05 - 5,93 \text{ мДж/м}^2$.

Таблица 1. Характеристики образцов серии $RFe_{11}Ti$.

Редкоземельный элемент	M_s , кА/м	n_0 , мкм ⁻¹	D_0 , мкм	γ , мДж/м ²
<i>Y</i>	888,1	3,1	0,21	4,05
<i>Gd</i>	679,5	1,2	0,53	5,93
<i>Ho</i>	733,5	1,7	0,37	4,97
<i>Er</i>	668,1	2,5	0,25	2,98

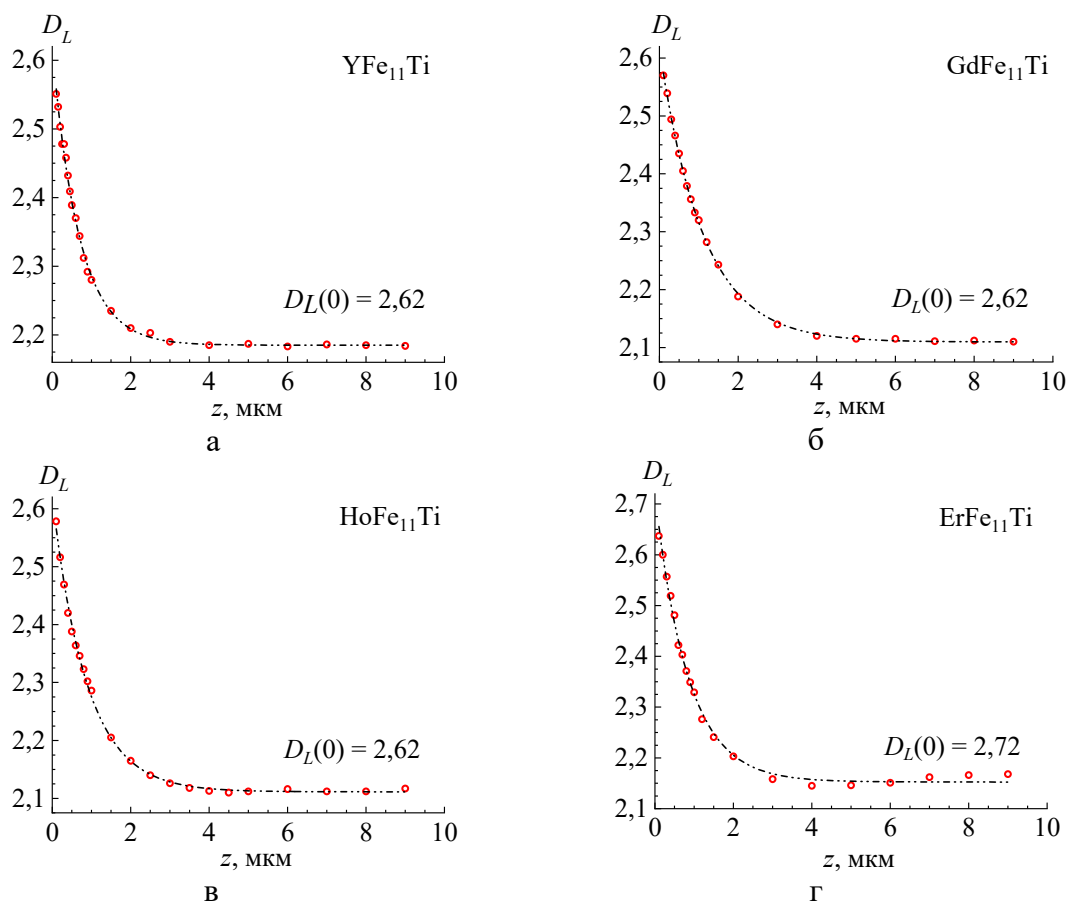


Рис. 4. Зависимость величины фрактальной размерности D_L полей рассеяния доменной структуры монокристаллов от расстояния z между поверхностью образца и зондом: а – $YFe_{11}Ti$, б – $GdFe_{11}Ti$, в – $HoFe_{11}Ti$, г – $ErFe_{11}Ti$.

Также для анализа доменной структуры применялся фрактальный подход. Фрактальная природа доменной структуры магнетиков, фрактальная размерность (D_L) доменов магнитных пленок, массивных кристаллов и постоянных магнитов анализируется в современной научной литературе [17-21]. В данном исследовании также был выполнен фрактальный анализ МСМ изображений доменной структуры исследуемых монокристаллов.

Фрактальная размерность полей рассеяния доменной структуры определялась методом подсчета кубов с помощью специализированной

компьютерной программы анализа данных СЗМ Gwyddion (GNU GPL). При этом определение D_L проводилось по МСМ изображениям, полученным на разных высотах z . Полученные зависимости $D_L(z)$ приведены на рис. 4 для всех образцов. Красные точки соответствуют расчетным значениям D_L , а штрихпунктирной линией показаны графики аппроксимации этих значений, которые для всех образцов имеют экспоненциальный вид. Интересно, что для составов с Y , Gd и Ho значение фрактальной размерности имеет одинаковое значение – 2,62, а для монокристалла $ErFe_{11}Ti$ – 2,72.

4. Заключение

В работе проведены исследования доменной структуры на базисной плоскости монокристаллов $RFe_{11}Ti$ ($R = Y, Gd, Ho, Er$) со структурой $ThMn_{12}$ методом магнитно-силовой микроскопии. Для определения поверхностной плотности энергии доменных границ использовался метод Боденбергера-Хуберта, который применялся к МСМ-изображениям. Для того, чтобы определить среднюю ширину домена, осуществлялась регистрация полей рассеяния ДС на разной высоте сканирования. После чего график зависимости плотности структуры $n(z)$ аппроксимировался для определения плотности структуры на поверхности монокристалла. Используя полученное значение, вычислялась средняя ширина доменов и параметр γ . Определено, что γ имеет следующие значения: $YFe_{11}Ti$ – 4,05 мДж/м², $GdFe_{11}Ti$ – 5,93 мДж/м², $HoFe_{11}Ti$ – 4,97 мДж/м², $ErFe_{11}Ti$ – 2,98 мДж/м². Фрактальная размерность D_L имеет значения 2,62 для соединений с $R = Y, Gd, Ho$ и 2,72 – для $R = Er$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственной программы в области научно-исследовательской деятельности (0817-2023-0006). Экспериментальные данные получены на оборудовании Лаборатории магнитных материалов ЦКП научной аппаратурой и оборудованием ТвГУ.

Библиографический список:

1. **Hadjipanayis, G.C.** $ThMn_{12}$ -type alloys for permanent magnets / G.C. Hadjipanayis, A.M. Gabay, A.M. Schönhöbel et al. // Engineering. – 2020. – V. 6. – I. 2. – P. 141-147. DOI: 10.1016/j.eng.2018.12.011.
2. **Ener, S.** Twins – a weak link in the magnetic hardening of $ThMn_{12}$ -type permanent magnets / S. Ener, K.P. Skokov, D. Palanisamy et al. // Acta Materialia. – 2021. – V. 214. – Art. № 116968. – 10 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116968.
3. **De Mooij, D.B.** Some novel ternary $ThMn_{12}$ -type compounds / D.B. De Mooij, K.H.J. Buschow // Journal of the Less Common Metals. – 1988. – V. 136. – I. 2. – P. 207-215. DOI: 10.1016/0022-5088(88)90424-9.
4. **Gabay, A.M.** Recent developments in RFe_{12} -type compounds for permanent magnets / A.M. Gabay, G.C. Hadjipanayis // Scripta Materialia. – 2018. – V. 154. – P. 284-288. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.10.033.
5. **Bouhhou, M.** Electronic structure, hyperfine parameters and magnetic properties of $RFe_{11}Ti$ intermetallic

- compounds (R= Y, Pr): Ab initio calculations, SQUID magnetometry and Mössbauer studies / M. Bouhbour, R. Moubah, E.K. Hlil, H. Lassri, L. Bessais // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – V. 518. – Art. № 167362. – 10 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167362.
6. **Guslienکو, K.Y.** Magnetic anisotropy and spin-reorientation transitions in RFe₁₁Ti (R= Nd, Tb, Dy, Er) rare-earth intermetallics / K.Y. Guslienکو, X.C. Kou, R. Grössinger // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1995. – V. 150. – I. 3. – P. 383-392. DOI: 10.1016/0304-8853(95)00282-0.
7. **Skokov, K.** Magnetic properties of Gd₃Fe_xTi₃ (x= 34, 33,..., 24), TbFe₁₁Ti and TbFe₁₀Ti single crystals / K. Skokov, A. Grushishev, A. Khokholkov et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2004. – V. 272. – Part 1. – P. 374-375. DOI: 10.1016/j.jmmm.2003.11.147.
8. **Skokov, K.** Structural and magnetic properties of R₃Fe_{29-x}Ti_x alloys and R₃Fe_{33-x}Ti₃ single crystals, R= Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er / K. Skokov, A. Grushishev, A. Khokholkov et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2005. – V. 290-291. – Part 1. – P. 647-650. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.11.322.
9. **Semenova, E.** Stress-induced magnetic domain structure in DyFe₁₁Ti compound / E. Semenova, M. Lyakhova, D. Karpenkov et al. // *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences. – 2018. – V. 185 (Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017)). – Art. № 04027. – 4 p. DOI: 10.1051/epjconf/201818504027.
10. **Andreev, A.V.** Magnetic and magnetoelastic properties of DyFe₁₁Ti single crystals / A.V. Andreev, M.I. Bartashevich, N.V. Kudrevatykh et al. // *Physica B: Condensed Matter*. – 1990. – V. 167. – I. 2. – P. 139-144. DOI: 10.1016/0921-4526(90)90006-G.
11. **Horcheni, J.** Exploring crystal structure, hyperfine parameters, and magnetocaloric effect in iron-rich intermetallic alloy with ThMn₁₂-type structure: a comprehensive investigation using experimental and DFT calculation / J. Horcheni, H. Jaballah, E. Dhahri, L. Bessais // *Magnetochemistry*. – 2023. – V. 9. – I. 11. – Art. № 230. – 16 p. DOI: 10.3390/magnetochemistry9110230.
12. **Chen, C.** Effects of thermal annealing on improved magnetic properties and microstructure for SmFe₁₁Ti alloy / C. Chen, Y.L. Huang, Y.F. Yao et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2021. – V. 530. – Art. № 167950. – 5 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167950.
13. **Bodenberger, R.** Zur bestimmung der blochwandenergie von einachsigen ferromagneten / R. Bodenberger, A. Hubert // *Physica Status Solidi (a)*. – 1977. – V. 44. – I. 1. – P. K7-K11. DOI: 10.1002/pssa.2210440146.
14. **Abadía, C.** Study of the crystal electric field interaction in single crystals / C. Abadía, P.A. Algarabel, B. García-Landa et al. // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 1998. – V. 10. – № 2. – P. 349-361. DOI: 10.1088/0953-8984/10/2/014.
15. **Herper, H.C.** Magnetic properties of NdFe₁₁Ti and YFe₁₁Ti, from experiment and theory / H. Herper, K.P. Skokov, S. Ener et al. // *Acta Materialia*. – 2023. – V. 242. – Art. № 118473. – 12 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118473.
16. **Li, H.S.** Magnetic properties of ternary rare-earth transition-metal compounds / H.S. Li, J.M.D. Coey // In book: *Handbook of Magnetic Materials*. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – V. 28. – Ch. 3. – P. 87-196. DOI: 10.1016/S1567-2719(05)80055-1.
17. **Лисовский, Ф.В.** Термодинамически устойчивые фракталоподобные доменные структуры в магнитных пленках / Ф.В. Лисовский, Л.И. Лукашенко, Е.Г. Мансветова // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2004. – Т. 79. – Вып. 7. – С. 432-435.
18. **Han, B.S.** Fractal study of magnetic domain patterns / B.S. Han, D. Li, D.J. Zheng, Y. Zhou // *Physical Review B*. – 2002. – V. 66. – I. 1. – P. 014433-1-014433-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.
19. **Semenova, E.M.** A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity Sm(CoCuFe)₅ quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1658. – Art. № 012050. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.
20. **Семенова, Е.М.** Фрактальная геометрия нано- и магнитной доменной структуры ферромагнитного сплава Sm-Co-Cu-Fe в высококоэрцитивном состоянии // Е.М. Семенова, Д.В. Иванов, М.Б. Ляхова и др. // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2021. – Т. 85. – № 9. – С. 1245-1248. DOI: 10.31857/S0367676521090258.
21. **Зигерт, А.Д.** Фрактальный анализ лабиринтной доменной структуры феррит-гранатовых пленок в процессе перемагничивания / А.Д. Зигерт, Г.Г. Дунаева, Н.Ю. Сдобняков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 134-145. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.134.

References:

1. Hadjipanayis G.C., Gabay A.M., Schönhöbel A.M. et al. ThMn₁₂-type alloys for permanent magnets,

- Engineering*, 2020, vol. 6, issue 2, pp. 141-147. DOI: 10.1016/j.eng.2018.12.011.
2. Ener S., Skokov K.P., Palanisamy D. et al. Twins – a weak link in the magnetic hardening of ThMn₁₂-type permanent magnets, *Acta Materialia*, 2021, vol. 214, art. no. 116968, 10 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116968.
3. De Mooij D.B., Buschow K.H.J. Some novel ternary ThMn₁₂-type compounds, *Journal of the Less Common Metals*, 1988, vol. 136, issue 2, pp. 207-215. DOI: 10.1016/0022-5088(88)90424-9.
4. Gabay A.M., Hadjipanayis G.C. Recent developments in RFe₁₂-type compounds for permanent magnets, *Scripta Materialia*, 2018, vol. 154, pp. 284-288. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2017.10.033.
5. Bouhhou M., Moubah R., Hlil E.K., Lassri H., Bessais L. Electronic structure, hyperfine parameters and magnetic properties of RFe₁₁Ti intermetallic compounds (R= Y, Pr): ab initio calculations, SQUID magnetometry and Mössbauer studies, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 518, art. no. 167362, 10 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167362.
6. Guslienko K.Y., Kou X.C., Grössinger R. Magnetic anisotropy and spin-reorientation transitions in RFe₁₁Ti (R= Nd, Tb, Dy, Er) rare-earth intermetallics, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, vol. 150, issue 3, pp. 383-392. DOI: 10.1016/0304-8853(95)00282-0.
7. Skokov K., Grushishev A., Khokhlov A. et al. Magnetic properties of Gd₃Fe_xTi₃ (x= 34, 33,..., 24), TbFe₁₁Ti and TbFe₁₀Ti single crystals, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272, part 1, pp. 374-375. DOI: 10.1016/j.jmmm.2003.11.147.
8. Skokov K., Grushishev A., Khokhlov A. et al. Structural and magnetic properties of R₃Fe_{29-x}Ti_x alloys and R₃Fe_{33-x}Ti_x single crystals, R= Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, vol. 290-291, part 1, pp. 647-650. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.11.322.
9. Semenova E., Lyakhova M., Karpenkov D. et al. Stress-induced magnetic domain structure in DyFe₁₁Ti compound, *EPJ Web of Conferences. EDP Sciences*, 2018, vol. 185 (Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017)), art. no. 04027, 4 p. DOI: 10.1051/epjconf/201818504027.
10. Andreev A.V., Bartashevich M.I., Kudrevatykh N.V. et al. Magnetic and magnetoelastic properties of DyFe₁₁Ti single crystals, *Physica B: Condensed Matter*, 1990, vol. 167, issue 2, pp. 139-144. DOI: 10.1016/0921-4526(90)90006-G.
11. Horcheni J., Jaballah H., Dhahri E., Bessais L. Exploring crystal structure, hyperfine parameters, and magnetocaloric effect in iron-rich intermetallic alloy with ThMn₁₂-type structure: a comprehensive investigation using experimental and DFT calculation, *Magnetochemistry*, 2023, vol. 9, issue 11, art. no. 230, 16 p. DOI: 10.3390/magnetochemistry9110230.
12. Chen C., Huang Y.L., Yao Y.F. et al. Effects of thermal annealing on improved magnetic properties and microstructure for SmFe₁₁Ti alloy, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 530, art. no. 167950, 5 p. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.167950.
13. Bodenberger R., Hubert A. Zur bestimmung der blochwandenergie von einachsigen ferromagneten, *Physica Status Solidi (a)*, 1977, vol. 44, issue 1, pp. K7-K11. DOI: 10.1002/pssa.2210440146.
14. Abadía C., Algarabel P.A., García-Landa B. et al. Study of the crystal electric field interaction in single crystals, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, vol. 10, no. 2, pp. 349-361. DOI: 10.1088/0953-8984/10/2/014.
15. Herper H., Skokov K.P., Ener S. et al. Magnetic properties of NdFe₁₁Ti and YFe₁₁Ti, from experiment and theory, *Acta Materialia*, 2023, vol. 242, art. no. 118473, 12 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118473.
16. Li H.S., Coey J.M.D. Magnetic properties of ternary rare-earth transition-metal compounds, *Handbook of Magnetic Materials*, Amsterdam, Elsevier, 2019, vol. 28, chapter 3, pp. 87-196. DOI: 10.1016/bs.hmm.2019.10.001.
17. Lisovskii F.V., Lukashenko L.I., Mansvetova E.G. Thermodynamically stable fractal-like domain structures in magnetic films, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 2004, vol. 79, issue 7, pp. 352-354. DOI: 10.1134/1.1765181.
18. Han B.S., Li D., Zheng D.J., Zhou Y. Fractal study of magnetic domain patterns, *Physical Review B*, 2002, vol. 66, issue 1, pp. 014433-1-014433-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014433.
19. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Kuznetsova Yu.V. et al. A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity Sm(Co,Cu,Fe)₅ quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1658, art. no. 012050, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.
20. Semenova E.M., Ivanov D.V., Lyakhova M.B. et al. Fractal geometry of the nano- and magnetic domain structures of Sm-Co-Cu-Fe ferromagnetic alloy in a high coercive state, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2021, vol. 85, issue 9, pp. 955-958. DOI: 10.3103/S1062873821090252.
21. Zigert A.D., Dunaeva G.G., Sdobnyakov N.Yu. Fraktal'nyj analiz labirintnoj domennoj struktury ferrit-granatovykh plenok v protsesse peremagnichivaniya [Fractal analysis of the maze-like domain structure of

ferrite-garnet films in the process of magnetization], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2021, issue 13, pp. 134-145. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.134. (In Russian).

Original paper

Analysis of domain structure parameters of $RFe_{11}Ti$ ($R = Y, Gd, Ho, Er$) single crystals based on magnetic force microscopy data

A.M. Guseva, A.I. Sinkevich, S.D. Smetannikova, E.M. Semenova, Yu.G. Pastushenkov

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.085

Abstract: The results of an experimental study of the magnetic domain structure on the basal plane of $RFe_{11}Ti$ single crystals ($R=Y, Gd, Ho, Er$) by magnetic force microscopy are presented. At room temperature, the compounds are characterized by magnetocrystalline anisotropy of the «easy axis» type. Based on the magnetic force microscopy data, the sizes of domains on the basal plane of the samples were determined. Using the Bodenberger-Hubert method, the surface energy density of domain walls γ was determined for all compounds based on the magnetic force microscopy data: $YFe_{11}Ti$ – 4,05 mJ/m², $GdFe_{11}Ti$ – 5,93 mJ/m², $HoFe_{11}Ti$ – 4,97 mJ/m², $ErFe_{11}Ti$ – 2,98 mJ/m². The cube counting method was used to calculate the fractal dimension D_L of the stray fields of the domain structure at different heights from the surface (0,1 – 9 μ m). D_L on the surface of the $z(0)$ sections has values of 2,62 for compounds with $R = Y, Gd, Ho$ and 2,72 for $R=Er$. For all samples, D_L has a maximum near the surface.

Keywords: rare earth intermetallic compounds, domain structure, magnetic force microscopy, fractal dimension.

Гусева Анна Марковна – студент 4 курса, физико-технический факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Синкевич Артем Игоревич – старший преподаватель кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сметанникова Софья Дмитриевна – студент 2 курса, физико-технический факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Пастушенков Юрий Григорьевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Anna M. Guseva – 4th year student, Faculty of Physics and Technology, Tver State University

Artem I. Sinkevich – senior lecturer, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Sofia D. Smetannikova – 2nd year student, Faculty of Physics and Technology, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Yuriy G. Pastushenkov – Professor, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 10.09.2024; после рецензирования/revised: 16.10.2024; принята/accepted: 20.10.2024.