Прямое наблюдение вихревых и мейснеровских доменов в монокристалле ферромагнитного сверхпроводника $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$

Л. Я. Винников[+1)], *И. С. Вещунов*[*×], *М. С. Сидельников*[+], *В. С. Столяров*[+×], *С. В. Егоров*[+], *О. В. Скрябина*[+×], *В. Джао*[○2)], *Г. Цао*[○2)], *Т. Тамегай*[*2)]

[+]*Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

[*]*Department of Applied Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, 113-8656 Tokyo, Japan*

[×]*Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия*

[○]*Department of Physics, Zhejiang University, 310027 Hangzhou, China*

Поступила в редакцию 7 февраля 2019 г.
После переработки 7 февраля 2019 г.
Принята к публикации 21 февраля 2019 г.

В монокристалле ферромагнитного сверхпроводника $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ с температурой сверхпроводящего перехода ($T_{SC} = 22$ К) методом декорирования визуализирована вихревая структура в доменах спонтанного магнитного потока (вихревые домены) вблизи температуры ферромагнитного перехода ($T_C = 18$ К). В узком интервале температур (1 К) вблизи T_C также наблюдались мейснеровские домены, ранее наблюдавшиеся методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). При понижении температуры наблюдалась доменная структура с чередующимся направением магнитного потока. Экспериментальные наблюдения находятся в разумном согласии с теоретической оценкой периодов доменных структур и температурным диапазоном их наблюдения.

DOI: 10.1134/S0370274X19080071

Вопрос о возможности сосуществования сверхпроводящего и магнитного упорядочения в одном и том же материале имеет давнюю историю [1]. Достигнутый прогресс в теоретическом [2] и экспериментальном [3] аспекте для искусственных слоистых структур (ферромагнетик–сверхпроводник) стимулировал поиск таких материалов. Очень перспективной в этом отношении оказалась группа новых высокотемпературных железосодержащих сверхпроводников [4]. В недавней работе авторов [5] методами магнитно-силовой микроскопии (МСМ) и декорирования на монокристаллах $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ были обнаружены доменные структуры, однозначно свидетельствующие о сосуществовании сверхпроводимости и ферромагнетизма в массивных монокристаллических образцах. В работе [5] домены размерами порядка нескольких микрон, наблюдаемые ниже температуры ферромагнитного перехода $T_C = 18$ K (температура сверхпроводящего перехода $T_{SC} = 22$ К), ассоциируются с их вихревой природой. Предполагается, что соседние домены содержат вихри противоположной полярности, что объясняет наблюдаемый знакопеременный контраст. Однако визуализировать собственно вихревую структуру доменов в исследованном интервале температур ниже T_C не удалось. Более детальное исследование структуры магнитного потока методом МСМ [6] обнаружило в узком диапазоне температур (< 1 К) ниже T_C домены нанометрового масштаба, интерпретируемые как мейснеровские домены. Достоинством метода МСМ, используемого в работе [6], является высокая (< 0.01 К) точность регулировки и стабилизации температуры эксперимента. При этом исследование проводилось на ограниченной площади порядка нескольких десятков квадратных микрон. В то время как метод декорирования позволяет исследовать структуру магнитного потока практически на всей поверхности монокристалла. Разрешение данного метода позволяет визуализировать объекты размером ~ 100 нм [7, 8]. Однако при декорировании необходимо испарение магнитного материала, что приводит к быстрому нагреву образца (до 2.5 К/с), в связи с чем имеются значительные проблемы с измерением температуры образца в момент оседания магнитных частиц на его поверхность. Используя устройство с системой регулиров-

1)e-mail: vinnik@issp.ac.ru
2)W. Jiao, G. Cao, T. Tamegai.

ки и стабилизации температуры, можно уменьшить неопределенность в измерении температуры образца во время эксперимента до 1 К. Конструкция устройства и детали эксперимента описаны в работе [9].

В настоящей работе структура магнитного потока в монокристалле $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$, детальные характеристики которого подробно представлены в работе [6], исследовались методом декорирования в интервале температур от 4.2 до 18 К. Поверхность базисной плоскости монокристалла размером $\sim 1.5 \times 2$ мм очищалась путем отщепления поверхностных слоев скотчем, затем декорировалась и наблюдалась в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) (рис. 1).

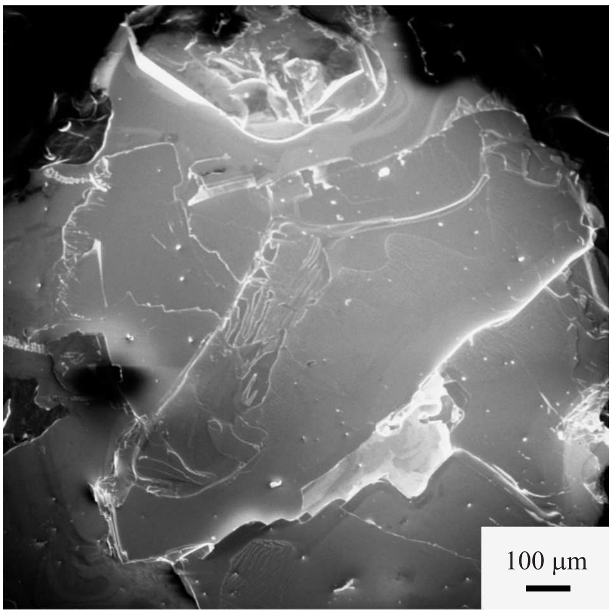

Рис. 1. Фотография поверхности (001) базисной плоскости монокристалла $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ в сканирующем электронном микроскопе

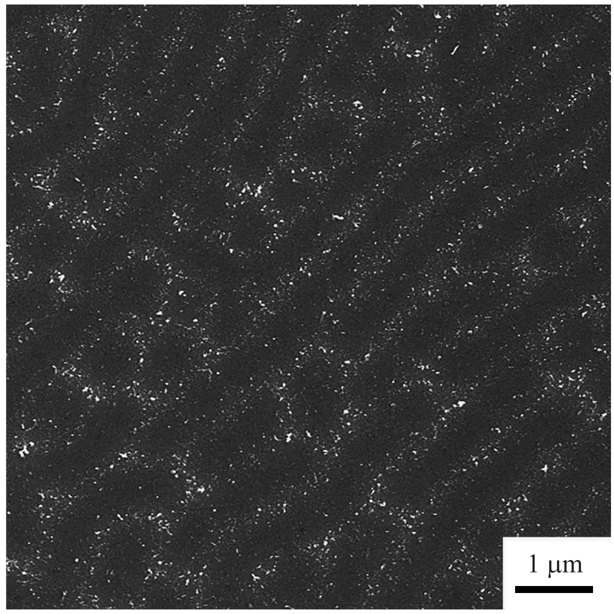

Рис. 2. Доменная структура монокристалла $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ при температуре декорирования 16 К в магнитном поле 50 Э

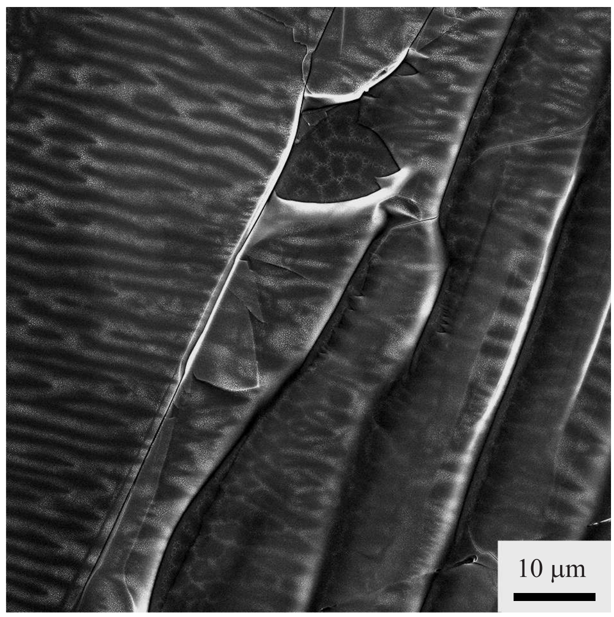

Рис. 3. Фрагмент доменной структуры участка монокристалла $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ при температуре декорирования 18 К в магнитном поле 42 Э

Декорирование проводилось в малом магнитном поле (порядка нескольких десятков эрстед), параллельном оси c [001] после изменения температуры стабилизации на несколько градусов, начиная с температуры 4.2 К. На рисунке 2 представлен фрагмент типичной лабиринтной доменной структуры при температуре декорирования 16 К. Подобные структуры наблюдались и при всех более низких температурах декорирования и аналогичны ранее наблюдавшимся в работе [5]. Наблюдение в СЭМ на больших участках поверхности обнаруживает разнообразие доменных структур (рис. 3). Видно, что ступеньки малой высоты в левой части рисунка не оказывают влияния на магнитный контраст (доменную структуру), в то время как ступеньки большей высоты в местах изменения толщины кристалла приводят к заметным изменениям доменной структуры. Такие картины наблюдаются на большей исследованной части поверхности монокристалла $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ при температуре декорирования 18 К.

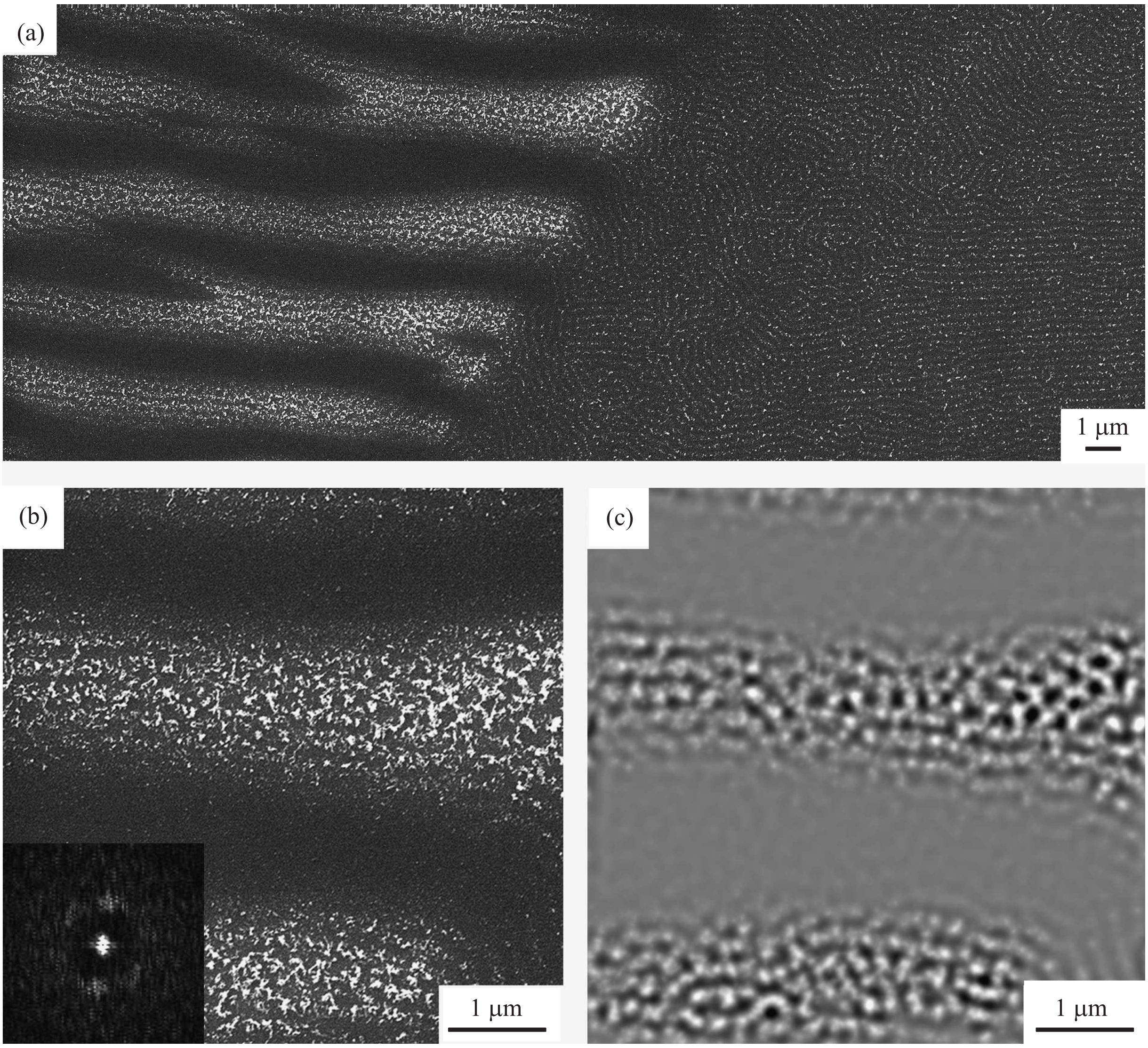

Рис. 4. (a) – Вихревые и мейснеровские домены в $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$. (b) – Увеличенный фрагмент вихревой доменной структуры. (c) – Тот же фрагмент после фильтрации изображения

Однако на небольшом участке монокристалла удалось наблюдать более дисперсную доменную структуру. На рисунке 4a представлен фрагмент структуры магнитного потока в монокристалле $EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ на поверхности (001) в магнитном поле 42 Э при температуре декорирования 18 К вблизи T_C. Справа на рис. 4a видна лабиринтная структура с характерным периодом ~ 200 нм, ранее наблюдаемая методом МСМ [6] и индентифицируемая как мейснеровские домены. Слева видна более контрастная структура, где наблюдаются два характерных периода. Структура с большим периодом интерпретируется как вихревые домены, которые состоят из вихрей Абрикосова с направлением вектора магнитного потока, соответствующего направлению вектора спонтанной намагниченности в каждом домене. На рисунке 4b представлен фрагмент доменной структуры, где после фильтрации изображения отчетливо разрешается вихревая структура. В вихревой структуре отсутствует дальний порядок, как и в большинстве исследованных железосодержащих сверхпроводниках [10, 11], однако на малых участках доменов разрешаются фрагменты треугольной решетки. Фурье-анализ картин декорирования по периоду межвихревого расстояния позволяет оценить индукцию спонтанного потока как ~ 200 Гс при температуре 18 К. Изложенная выше интерпретация контраста на микрофотографиях относится только к вихревым доменам на рис. 2 и 3, в то время как контраст, создаваемый магнитными частицами в области мейснеровских доменов (рис. 4), имеет другую природу [12], а именно, магнитные частицы локализуются на границах мейснеровских доменов. Магнитные частицы скапливаются в области максимального значения магнитного поля, создаваемого экранирующими токами, которые максимальны и направлены в противоположные стороны вдоль границы мейснеровского домена [6]. В отличие от наблюдения мейснеровских доменов методом MCM [6], метод декорироваия позволяет получить верхнюю оценку толщины границы мейснеровкого домена ~ 70 нм по измеряемой ширине изображения границы на поверхности образца.

Результаты наблюдения можно резюмировать следующим образом: при малых увеличениях ($\sim \times 1000$) на большей части монокристалла светлые и темные области представляют собой вихревые домены, где отдельные вихри не разрешаются при температуре участка образца ниже температуры ферромагнитного перехода $T_{\mathrm{C}} = 18$ K. Тем не менее на отдельном (перегретом в процессе декорирования) участке удается разрешить как вихревую структуру доменов, так и наблюдать мейснеровские домены, которые существуют только в узком (< 1 K) интервале температур ниже $T_{\mathrm{C}} = 18$ K [6]. Возможные причины такого поведения могут быть обусловлены температурной зависимостью индукции спонтанного магнитного потока [13]. Предполагается, что когда локальная температура только на несколько десятых ниже T_{c}, спонтанная индукция достаточно мала, чтобы экранироваться мейснеровскими токами, и в то же время достаточна (по нашей оценке, несколько сотен Гс), чтобы разрешать вихри в вихревой доменной структуре. Следует подчеркнуть, что наблюдаемая вихревая структура в доменах обусловлена спонтанным магнитным потоком, а не внешним полем, которое в несколько раз меньше индукции спонтанного потока при температуре декорирования. Заметим также, что могут разрешаться вихри только одной полярности (в светлых доменах), в то время как частицы отталкиваются от антивихрей (в темных доменах). Такое толкование не противоречит теоретическим оценкам индукции вблизи T_{C} и температурного интервала существования мейснеровских доменов 0.6 K (см. supplementary в работе [6]). Относительно природы сосуществования сверхпроводящего и ферромагнитного упорядочения в $\mathrm{EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2}$ возможно объяснение с помощью механизма, предложенного В. Л. Гинзбургом [1], так как индукция спонтанного магнитного потока намного меньше верхнего критического поля для этого вещества ($H_{\mathrm{C2}}(0) \sim 30$ Тл [4]), а обменный (парамагнитный) механизм разрушения сверхпроводимости выключен [14].

Таким образом, методами декорирования в монокристаллах $\mathrm{EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2}$ наблюдалась в узком интервале температур вблизи $T_{\mathrm{C}} = 18$ K мейснеровская доменная структура с периодом ~ 200 нм в согласии с MCM-измерениями и теоретической оценкой [6]. В ферромагнитном сверхпроводнике $\mathrm{EuFe_2(As_{1-x}P_x)_2}$ впервые наблюдалась структура спонтанного магнитного потока в объемных монокристаллах с разрешением вихревой структуры вблизи T_{C} с индукцией несколько сотен Гс. Необходимы дальнейшие исследования для проверки высказанных предположений на других соединениях с сосуществованием сверхпроводимости и магнетизма, например, [15, 16].

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН "Физика низких температур".

Авторы выражают благодарность А. И. Буздину, В. В. Рязанову и Л. С. Успенской за полезные обсуждения, а также Е. Ю. Постновой и Л. Г. Исаевой за помощь в работе.

1. V. L. Ginzburg, ЖЭТФ **31**, 202 (1956) [Sov. Phys. JETP **4**, 153 (1957)].
2. M. Faure and A. I. Buzdin, Phys. Rev. Lett. **94**, 187202 (2005).
3. В. В. Рязанов, В. А. Обознов, В. В. Больгинов, А. С. Прокофьев, А. К. Феофанов, УФН **174**, 795 (2004).
4. Z. Ren, Q. Tao, S. Jiang, C. M. Feng, C. Wang, J. H. Dai, G. H. Cao, and Z. A. Xu, Phys. Rev. Lett. **102**, 137002 (2009).
5. I. S. Veshchunov, L. Ya. Vinnikov, V. S. Stolyarov, N. Zhou, Z. X. Shi, X. F. Xu, S. Yu. Grebenchuk, D. S. Baranov, I. A. Golovchanskiy, S. Pyon, Y. Sun, W. Jiao, G. Cao, T. Tamegai, and A. A. Golubov, Письма в ЖЭТФ **105**, 87 (2017) [JETP Lett. **105**, 98 (2017)].
6. V. S. Stolyarov, I. S. Veshchunov, S. Yu. Grebenchuk et al. (Collaboration), Sci. Adv. **4**, eaat1061 (2018).
7. L. Ya. Vinnikov, T. L. Barkov, P. C. Canfield, S. L. Bud'ko, J. E. Ostenson, F. D. Laabs, and V. G. Kogan, Phys. Rev. B **64**, 220508(R) (2001).
8. I. S. Veshchunov, V. A. Oboznov, A. N. Rossolenko, A. S. Prokofiev, L. Ya. Vinnikov, A. Yu. Rusanov, and D. V. Matveev, Письма в ЖЭТФ **88**, 791 (2008) [JETP Lett. **88**, 758 (2008)].
9. Л. Я. Винников, И. С. Вещунов, М. С. Сидельников, В. С. Столяров, Приборы и техника эксперимента **4** (2019) (в печати).

10. M. R. Eskildsen, L. Ya. Vinnikov, I. S. Veshchunov, T. M. Artemova, T. D. Blasius, J. M. Densmore, C. D. Dewhurst, N. Ni, A. Kreyssig, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, and A. I. Goldman, Physica C **469**, 529 (2009).
11. L. Ya. Vinnikov, T. M. Artemova, I. S. Veshchunov, N. D. Zhigadlo, J. Karpinski, P. Popovich, D. L. Sun, C. T. Lin, and A. V. Boris, Письма в ЖЭТФ **90**, 325 (2009) [JETP Lett. **90**, 299 (2009)].
12. T. Sakurai, and Y. Shimada, Jpn. J. Appl. Phys **34**, 1905 (1992).
13. S. Nandi, W. T. Jin, Y. Xiao, Y. Su, S. Price, D. K. Shukla, J. Strempfer, H. S. Jeevan, P. Gegenwart, and Th. Bruckel, Phys. Rev. B **89**, 014512 (2014).
14. L. Bulaevskii, A. Buzdin, and M. Kulic, Phys. Rev. B **34**, 4928 (1986).
15. U. Pachmayr, F. Nitsche, H. Luetkens, S. Kamusella, F. Bruckner, R. Sarkar, H. H. Klauss, and D. Johrendt, Angew. Chem. **54**, 293 (2015).
16. X. F. Lu, N. Z. Wang, G. H. Zhang, X. G. Luo, Z. M. Ma, B. Lei, F. Q. Huang, and X. H. Chen, Phys. Rev. B **89**, 020507(R) (2014).