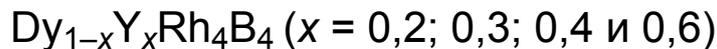


Эффект Воллебена в магнитных сверхпроводниках



В.М. Дмитриев^{1,2}, А.В. Терехов^{1,2,3}, А. Залеский³, Е.Н. Хацько¹, П.С. Калинин¹,
А.И. Рыкова¹, А.М. Гуревич¹, С.А. Глаголев¹, Е.П. Хлыбов^{2,4}, И.Е. Костылева^{2,4},
С.А. Лаченков⁵

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: terekhov1977@yandex.ru

²Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур
ул. Гайовицкая, 95, г. Вроцлав, 53–421, Польша

³W. Trzebiatowski Institute for Low Temperatures & Structure Research
PAS, P.O. Box 1410, 50–950, Wroclaw, Poland

⁴Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН
Калужское шоссе, 14, г. Троицк, 142190, Россия

⁵Институт металлургии и металловедения им. А.А. Байкова РАН
Ленинский пр., 49, г. Москва, 119991, Россия

Статья поступила в редакцию 23 июня 2011 г.

Впервые в магнитных сверхпроводниках $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$ ($x = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$) обнаружен эффект Воллебена («парамагнитный» эффект Мейсснера) при измерении температурной зависимости магнитного момента в полях 1–20 Э. Эффект уменьшается с понижением напряженности поля, и в полях ниже 1 Э появляется диамагнитный отклик. Предполагается, что существенную роль в появлении парамагнитного сигнала ниже температуры сверхпроводящего перехода играет ферромагнетизм атомов диспрозия.

Вперше в магнітних надпровідниках $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$ ($x = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$) виявлено ефект Воллебена («парамагнітний» ефект Мейсснера) при вимірюванні температурної залежності магнітного моменту в полях 1–20 Е. Ефект зменшується зі зниженням напруженості поля, і в полях нижче 1 Е з'являється діамагнітний відгук. Передбачається, що суттєву роль в появі парамагнітного сигналу нижче температури надпровідного переходу відіграє ферромагнетизм атомів диспрозію.

PACS: 74.70.Ad Металлы, сплавы и бинарные соединения (включая Al5, MgB2 и т.д.).

Ключевые слова: сверхпроводимость, ферромагнетизм, эффект Мейсснера, эффект Воллебена.

Введение

Одно из фундаментальных свойств сверхпроводящего состояния — способность сверхпроводников выталкивать постоянное магнитное поле H из своего объема наружу (эффект Мейсснера). Наиболее наглядно это явление проявляется при исследовании магнитных свойств. Так, при охлаждении сверхпроводника в постоянном магнитном поле (режим измерений FC) ниже T_c знак магнитного момента изменяется с положительного на отрицательный. Предполагалось, что такое по-

ведение результирующего магнитного момента при переходе в сверхпроводящее состояние характерно для всех сверхпроводников. Это установившееся представление было нарушено результатами работ [1–4], в которых при измерениях в режиме FC наблюдался положительный, т.е. парамагнитный отклик сверхпроводящего высокотемпературного (ВТСП) образца, что позволило считать обнаруженное явление специфическим для ВТСП систем. Со временем выяснилось, что в определенных ситуациях парамагнитный отклик (по-

ложительный вместо отрицательного знак магнитного момента) при переходе через критическую температуру при понижении температуры в магнитном поле возникает и в других типах немагнитных сверхпроводников, например в Nb [5] или MgB_2 [6]. Такой эффект часто называют эффектом Воллебена (ВЭ) или парамагнитным эффектом Мейсснера. В дальнейшем, чтобы не путаться в устоявшейся терминологии, явление, связанное с существованием парамагнитного отклика ниже T_c , будем называть эффектом Воллебена.

Различные варианты объяснения причин возникновения ВЭ можно найти, например, в работах [1,7–14]. Однако единой точки зрения на причины появления этого явления пока не выработано, так как эффект возникает в образцах с различной кристаллической структурой, геометрией и наблюдается как в поликристаллах, так и в монокристаллах. Тем не менее существуют два основных механизма, которые объясняют наличие ниже T_c парамагнитного сигнала.

1. Существование между или внутри сверхпроводящих гранул джозефсоновских связей с отрицательной энергией (π -контакты). В джозефсоновских петлях, составленных из таких контактов, ниже T_c генерируются незатухающие токи, которые приводят к появлению спонтанных орбитальных моментов, совпадающих по направлению с внешним магнитным полем и отвечающих за появление парамагнитного сигнала ниже T_c [9,15–17].

2. Захват магнитного потока, который может быть вызван наличием внутренних дефектов, сеток джозефсоновских контактов в гранулированных образцах (джозефсоновские гипервихри) и граничных эффектов в образцах с заданной геометрией (пленки, тонкие пластинки, диски и т.д.) [12,16].

В разных материалах прослеживается различное поведение ВЭ в магнитных полях. В одних образцах эффект наблюдается в очень слабом поле и с ростом поля пропадает [4,6,8], в других — при более высоких полях и с ростом поля усиливается [18]. В связи с этим поиск новых систем с ВЭ представляется не только целесообразным, но и необходимым.

В настоящей работе представлены результаты обнаружения и предварительного исследования ВЭ в системе $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$. Полученные результаты представляются тем более интересными еще и потому, что соединения $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$ являются ферримагнитными сверхпроводниками [19,20]. Насколько известно, ВЭ в ферро- и ферримагнитных сверхпроводниках ранее не наблюдался. Кроме того, в предыдущих работах нами высказывалось предположение о присутствии в $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$ нетрадиционного механизма сверхпроводящего спаривания, а одна из моделей, объясняющих ВЭ, связана с наличием в образце сверхпроводимости с d - или p -типом спаривания [8]. Таким образом, выяснение природы ВЭ в редкоземельных бориде ро-

дия может также пролить свет на механизм сверхпроводящего спаривания в этих соединениях.

Образцы и техника измерений

Поликристаллические образцы изготовлены методом аргоно-дуговой плавки в условиях высокого давления порядка 8 ГПа и имели тетрагональную объемно-центрированную кристаллическую структуру перовскитного типа $LuRu_4B_4$ [21]. Рентгеновский, электронно-дифракционный и оптический анализы показали, что исследуемые образцы являются однофазными конгломератами тесно связанных между собой (без промежуточных включений) кристаллитов с четкими гранями, которые имеют кристаллическую структуру типа $LuRu_4B_4$. Размеры кристаллитов варьировались в пределах 3–10 мкм.

Магнитный момент образцов измерялся в режимах FC (охлаждение в магнитном поле) и ZFC (охлаждение в нулевом поле и отогрев в магнитном поле) с помощью вибрационного магнитометра, измерительная головка которого размещалась внутри сверхпроводящего соленоида.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости магнитного момента образцов $Du_{0,4}Y_{0,6}Rh_4B_4$, $Du_{0,6}Y_{0,4}Rh_4B_4$, $Du_{0,7}Y_{0,3}Rh_4B_4$ и $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$. Измерения проводились в режимах FC и ZFC в полях вплоть до 20 Э.

Хорошо видно, что при измерениях в режиме ZFC ниже T_c наблюдается скачкообразное уменьшение магнитного момента всех образцов с выходом на постоянное значение и он отрицателен по величине, т.е. имеет место диамагнитное экранирование образца. Вместе с тем, в режиме FC ниже T_c магнитный момент в исследуемом интервале полей имеет положительное значение, а характер зависимости $M(T)$ меняется с ростом магнитного поля. Это хорошо можно отследить на рис. 1,б, где представлены зависимости $M(T)$ для соединения $Du_{0,6}Y_{0,4}Rh_4B_4$. В полях напряженностью 5–20 Э при достижении температуры сверхпроводящего перехода магнитный момент вначале скачком возрастает, а при более низких температурах насыщается и имеет постоянное значение вплоть до самых низких температур, доступных в эксперименте.

Скачкообразное возрастание магнитного момента всегда наблюдалось ниже температуры перехода в сверхпроводящее состояние, что, по-видимому, свидетельствует о неразрывной связи такого поведения магнитного момента с наличием сверхпроводимости.

В более низких полях (ниже 5 Э, рис. 1,б) наблюдается скачкообразное уменьшение магнитного момента с выходом на постоянное значение, но вместе с тем он остается положительным по величине. Хотя, как видно

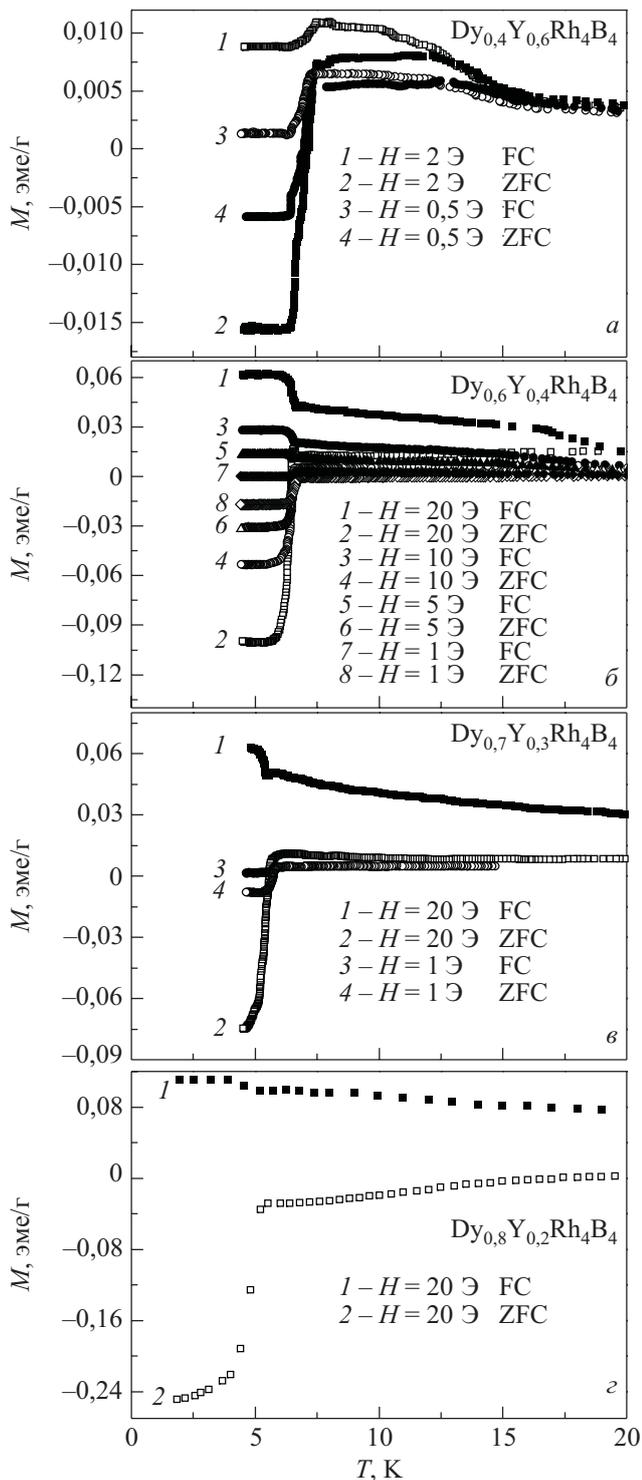


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченностей $M(T)$ $Dy_{0,4}Y_{0,6}Rh_4B_4$ (а), $Dy_{0,6}Y_{0,4}Rh_4B_4$ (б), $Dy_{0,7}Y_{0,3}Rh_4B_4$ (в) и $Dy_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$ (г) в режимах FC и ZFC в полях до 20 Э.

на рис. 1,б, его положительное значение постоянно уменьшается и в полях ниже 1 Э на $M(T)$, скорее всего, появится диамагнитный сигнал. Также видно, что с ростом поля парамагнитный сигнал возрастает по величине.

Анализ зависимостей, полученных в режиме ZFC, показывает рост диамагнитного отклика с увеличением величины поля, и это свидетельствует о том, что в исследуемых образцах внешнее поле не превышает величину H_{c1} . Обратим внимание на достаточно большую разницу в поведении магнитного момента и его величины при FC и ZFC измерениях выше температуры сверхпроводящего перехода. Чем больше внешнее магнитное поле, тем сильнее проявляется это различие. В предыдущих работах мы показали, что ниже некоторой характеристической температуры (T_c), которая зависит от концентрации Du в образцах, имеет место ферри-магнитное упорядочение [19,20]. Различия величин магнитного момента при измерениях в режимах FC и ZFC могут быть обусловлены особенностями магнетизма в этих системах, например, возникновением и эволюцией ниже температуры Кюри структуры магнитных доменов.

К сожалению, на основании имеющихся экспериментальных данных в настоящий момент нельзя точно сказать, какой из рассматриваемых в литературе механизмов наиболее подходит для объяснения эффекта Воллебена в исследуемых редкоземельных боридах. Для понимания природы этого эффекта необходимы дополнительные исследования, например, оценка скорости релаксации магнитного момента при постоянной температуре, выбранной ниже точки сверхпроводящего упорядочения (как известно, в керамических образцах, в которых часто наличие парамагнитного сигнала связывают с присутствием π -контактов, скорость релаксации мала — величина магнитного момента может не изменяться в течение получаса [15]).

Не стоит забывать о том, что в редкоземельных боридах родия $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$ ниже T_c сосуществуют сверхпроводимость и ферримагнетизм, т.е. в образце имеются области с отличной от нуля намагниченностью. Таким образом, не исключено, что магнитоупорядоченное состояние с отличной от нуля спонтанной намагниченностью будет играть существенную роль в появлении парамагнитного сигнала ниже T_c . Чтобы до конца прояснить этот вопрос, в ближайшее время планируется провести исследования температурной зависимости магнитного момента в режимах ZFC и FC в немагнитном сверхпроводящем соединении YRh_4B_4 , изоструктурном к исследуемым в данной работе материалам.

Заключение

Впервые в магнитных сверхпроводниках $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$ ($x = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$) обнаружен эффект Воллебена (наличие парамагнитного отклика в сверхпроводящем состоянии при измерениях в режиме FC). Показано, что с понижением величины поля парамагнитный сигнал уменьшается и в полях ниже 1 Э появляется диамаг-

нитный отклик. Высказано предположение о том, что в появлении парамагнитного сигнала ниже температуры сверхпроводящего упорядочения существенную роль может играть присутствующее в образцах ферримагнитное упорядочение магнитных моментов диспрозия.

Авторы выражают благодарность С.Л. Прищепе и Г.Е. Гречневу за полезные обсуждения и замечания.

1. P. Svedlindh, K. Niskanen, P. Norling, P. Nordblad, L. Lundgren, B. Lönnberg, and T. Lundström, *Physica C: Supercond.* **162–164**, 1365 (1989).
2. W.H. Lee, Y.T. Huang, S.W. Lu, K. Chen, and P.T. Wu, *Solid State Commun.* **74**, 97 (1990).
3. M.D. Lan, J.Z. Liu, and R.N. Shelton, *Phys. Rev.* **B43**, 12989 (1991).
4. W. Braunisch, N. Knauf, V. Kataev, S. Neuhausen, A. Grütz, A. Kock, B. Roden, D. Khomskii, and D. Wohlleben, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1908 (1992).
5. D.J. Thomson, M.S.M. Minhaj, L.E. Wenger, and J.T. Chen, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 529 (1995).
6. H. Sözeri, L. Dorosinskii, U. Topal, and İ. Ercan, *Physica C* **408–410**, 109 (2004).
7. F.V. Kusmartsev, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2268 (1992).
8. W. Braunisch, N. Knauf, G. Bauer, A. Kock, A. Becker, B. Freitag, A. Grütz, V. Kataev, S. Neuhausen, B. Roden, D. Khomskii, D. Wohlleben, J. Bock, and E. Preisler, *Phys. Rev.* **B48**, 4030 (1993).
9. M. Sigrist and T.M. Rice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **61**, 4283 (1992).
10. M. Sigrist and T.M. Rice, *Rev. Mod. Phys.* **67**, 503 (1995).
11. D.X. Chen and A. Hernando, *Europhys. Lett.* **26**, 365 (1994).
12. A.E. Koshelev and A.I. Larkin, *Phys. Rev.* **B52**, 13559 (1995).
13. A.E. Khalil, *Phys. Rev.* **B55**, 6625 (1997).
14. V.V. Moshchalkov, X.G. Qiu, and V. Bruyndoncx, *Phys. Rev.* **B55**, 11793 (1997).
15. D. Khomskii, *J. Low Temp. Phys.* **95**, 205 (1994).
16. M.S. Li, *Phys. Rep.* **376**, 133 (2003).
17. V.A. Khlus and A.V. Dyomin, *Physica C* **212**, 352 (1993).
18. F.T. Dias, P. Pureur, P. Rodrigues, Jr., and X. Obradors, *Physica C* **354**, 219 (2001).
19. V.M. Dmitriev, A.J. Zaleski, E.P. Khlybov, L.F. Rybaltchenko, E.V. Khristenko, L.A. Ishchenko, and A.V. Terekhov, *Acta Physica Polonica A* **114**, 83 (2008).
20. В.М. Дмитриев, А. Залеский, Е.П. Хлыбов, Л.Ф. Рыбальченко, Е.В. Христенко, Л.А. Ищенко, А.В. Терехов, И.Е. Костылева, С.А. Лаченков, *ФНТ* **34**, 1152 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 909 (2008)].
21. M.B. Maple and O. Fischer, *Superconductivity in Ternary Compounds II, Superconductivity and Magnetism*, Springer–Verlag–Berlin–Heidelberg–NewYork (1982).

The Wohlleben effect in magnetic superconductors $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$ ($x = 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.6)

V.M. Dmitriev, A.V. Terekhov, A. Zaleski, E.N. Khatsko, P.S. Kalinin, A.I. Rykova, A.M. Gurevich, S.A. Glagolev, E.P. Khlybov, I.E. Kostyleva, and S.A. Lachenkov

The Wohlleben effect (“paramagnetic” Meissner effect) was revealed for the first time while measuring the temperature dependence of magnetic moments of $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$ ($x = 0.2, 0.3, 0.4, 0.6$) in magnetic fields 0–20 Oe. The effect decreases with magnetic field strength and at fields below 1 Oe there appears a diamagnetic signal. The ferrimagnetism of Dy atoms was supposed to play an essential role in the appearance of the paramagnetic signal at the temperatures that were less than the superconducting transition temperature.

PACS: 74.70.Ad Metals; alloys and binary compounds (including A15, MgB2, etc.).

Keywords: superconductors, ferrimagnetism, Meissner effect, Wohlleben effect.