Low Temperature Physics/Физика низких температур, 2013, т. 39, № 7, с. 827–829

*Краткие сообщения*

# Эффект Воллебена в $YRh_4B_4$

А.В. Терехов

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

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

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

Статья поступила в редакцию 1 марта 2013 г.

Впервые в сверхпроводнике $YRh_4B_4$ в магнитном поле $H$ = 10 Э обнаружен эффект Воллебена (появление положительного отклика на температурной зависимости намагниченности в сверхпроводящем состоянии при измерениях в режиме FC). В магнитном поле 20 Э положительный сигнал исчезает и появляется диамагнитный отклик, величина которого с ростом магнитного поля увеличивается.

Вперше в надпровіднику $YRh_4B_4$ в магнітному полі $H$ = 10 Е виявлено ефект Воллебена (поява позитивного відгуку на температурній залежності намагніченості в надпровідному стані при вимірюваннях в режимі FC). В магнітному полі 20 Е позитивний сигнал зникає і з'являється діамагнітний відгук, величина якого із зростанням магнітного поля збільшується.

PACS: 74.70.Ad Металлы, сплавы и бинарные соединения.

Ключевые слова: сверхпроводимость, эффект Воллебена.

Эффект Воллебена (ВЭ) является довольно интересным и все еще недостаточно хорошо изученным явлением в сверхпроводниках. Впервые он был обнаружен в висмутовой ВТСП керамике в виде положительного отклика при измерении намагниченности или магнитной восприимчивости ниже температуры перехода в сверхпроводящее состояние, когда эксперимент проводился в режиме FC (охлаждение в постоянном магнитном поле) [1–3]. Позже ВЭ наблюдался и в других типах немагнитных сверхпроводников, например в Nb [4] или $MgB_2$ [5].

К настоящему времени предложено несколько механизмов [6], с помощью которых их авторы пытаются объяснить физическую природу ВЭ, однако однозначного ответа на этот вопрос пока нет. Как нам представляется, стоит упомянуть два альтернативных механизма, которые наиболее часто используются для объяснения появления парамагнитного сигнала в сверхпроводящей области: наличие в образцах отрицательной джозефсоновской связи между сверхпроводящими гранулами ($\pi$-контакты) [6–9] и менее экзотический, связанный с захватом магнитного потока [6,10,11]. С ростом поля, как правило, ВЭ уменьшается, хотя иногда наблюдается и противоположный эффект [6].

Недавно ВЭ был обнаружен нами в магнитных сверхпроводниках $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$ ($x$ = 0,2; 0,3; 0,4 и 0,6) [12]. Особенностью данных соединений является то, что с появлением сверхпроводимости магнитное упорядочение (ферримагнетизм) не исчезает, а сосуществует с ней вплоть до самых низких температур, доступных в эксперименте (~ 0,5 К) [13,14]. Мы предположили, что внутренний магнетизм данных соединений может играть существенную роль в возникновении ВЭ. В связи с этим интерес представляет вопрос наличия или отсутствия данного явления в изоструктурных немагнитных соединениях. Цель данной работы — исследование поведения температурных зависимостей магнитного момента немагнитного соединения $YRh_4B_4$ в полях до 50 Э в режимах FC и ZFC.

Образец $YRh_4B_4$ синтезирован в камере высокого давления в условиях квазигидростатического сжатия при давлении 8 ГПа. Согласно данным рентгенографи-

© А.В. Терехов, 2013

ческих исследований, материал имел тетрагональную объемно-центрированную кристаллическую структуру перовскитного типа $LuRu_4B_4$ [15]. Намагниченность ($M$) образца измерялась в режимах FC (охлаждение в магнитном поле) и ZFC (охлаждение в нулевом поле и отогрев в магнитном поле) с помощью вставки с вибрационным магнитометром на базе автоматизированного комплекса Quantum Design PPMS-9. Постоянное магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом. Температурные зависимости $M(T)$ получены в интервале температур 2–30 К для магнитных полей 10, 20, 30 и 50 Э. На рис. 1(а) и (б) представлены температурные зависимости намагниченности $YRh_4B_4$. Измерения проводились в режимах FC и ZFC для магнитных полей $H$ = 10, 20, 30 и 50 Э.

На рис. 1(а) видно, что при измерениях в режиме ZFC при $T < T_c$ наблюдается скачкообразное уменьшение магнитного момента с выходом на постоянное отрицательное значение, т.е. имеет место диамагнитное экранирование образца. С увеличением магнитного поля диамагнитный отклик растет, что свидетельствует о том, что в исследуемых образцах внешнее магнитное поле не превышает $H_{c1}$.

На рис. 1(б) видно, что в режиме FC при $T < T_c$ намагниченность $YRh_4B_4$ имеет положительное значение в поле 10 Э и отрицательные в полях 20, 30, 50 Э, т.е. характер зависимости $M(T)$ меняется с ростом магнитного поля. Так, в поле $H$ = 10 Э при достижении температуры сверхпроводящего перехода намагниченность вначале скачком возрастает, при более низких температурах насыщается и выходит на постоянное положительное значение, которое сохраняется вплоть до самых низких температур, доступных в эксперименте (рис. 1(б)). В более высоких полях 20, 30, 50 Э наблюдается скачкообразное уменьшение магнитного момента с выходом на постоянное отрицательное значение, и с ростом поля диамагнитный отклик также растет. Аналогичное поведение наблюдалось ранее и в висмутовых ВТСП керамиках, но при величинах внешнего магнитного поля на несколько порядков ниже [1–3]. В случае $YRh_4B_4$ величина диамагнитного отклика при измерении в режиме FC в полях $H$ = 20, 30 и 50 Э не превышает 15% от величины намагниченности при измерениях ZFC, что говорит о высокой доле парамагнитного отклика, вносимого в суммарный магнитный момент.

Сравним результаты настоящих исследований с более ранними экспериментами на магнитных сверхпроводниках $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$ [14]. На рис. 1(в) представлены зависимости $M(T)$ для магнитного соединения $Dy_{0,6}Y_{0.4}Rh_4B_4$. В слабых магнитных полях ($H$ = 1 Э) наблюдается скачкообразное уменьшение намагниченности, а при относительно больших полях ($H$ = 5, 10, 20 Э) величина положительного отклика растет с увеличением магнитного поля. Таким образом, можно констатировать тот факт, что с ростом магнитного

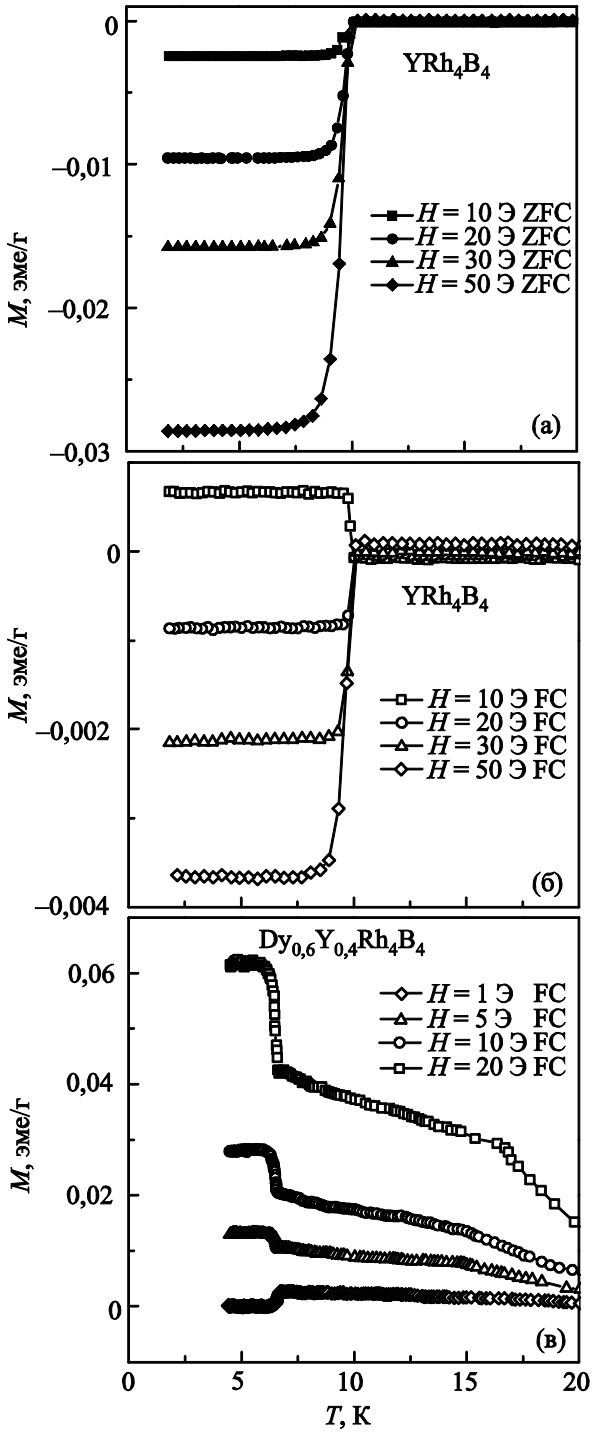


*Рис. 1.* Температурные зависимости намагниченностей $M(T)$ $YRh_4B_4$ в режимах ZFC (а) и FC (б) в магнитных полях до 50 Э и $Dy_{0,6}Y_{0,4}Rh_4B_4$ (в) (данные из работы [14]) в режиме FC в магнитных полях до 20 Э.

поля поведение зависимости $M(T)$ в $YRh_4B_4$ существенно отличается от аналогичного поведения $M(T)$ в $Dy_{0,6}Y_{0,4}Rh_4B_4$.

Из рассмотренного выше следует, что существование эффекта Воллебена в боридах $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$, содержащих магнитные ионы Dy, не может быть объяснено только присутствием магнитоупорядоченного состояния

в области температур $T < T_c$, так как ВЭ наблюдается и в немагнитном $YRh_4B_4$. В то же время магнетизм атомов Dy приводит к существенным изменениям поведения $M(T)$ от величины магнитного поля в режиме FC при $T < T_c$ (увеличение положительного отклика с ростом поля, а не уменьшение, как в случае $YRh_4B_4$).

К сожалению, результаты настоящих исследований все еще не позволяют дать однозначный ответ на вопрос о механизме возникновения эффекта Воллебена в сверхпроводниках $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$.

Таким образом, впервые в немагнитном соединении $YRh_4B_4$ в магнитном поле $H = 10$ Э обнаружен эффект Воллебена (появление положительного отклика в сверхпроводящем состоянии при измерениях в режиме FC), что свидетельствует о том, что ВЭ наблюдается не только в сверхпроводниках $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$, содержащих магнитные ионы. В магнитном поле 20 Э положительный сигнал исчезает и появляется диамагнитный отклик. С дальнейшим ростом величины магнитного поля диамагнитный отклик в $YRh_4B_4$ растет, а парамагнитный вклад в суммарную намагниченность уменьшается (а не увеличивается, как в магнитных соединениях $Dy_{1-x}Y_xRh_4B_4$).

Автор выражает благодарность профессору А. Залескому (заведующему отделом Низких температур и сверхпроводимости, Институт низких температур и структурных исследований, Вроцлав, Польша) за содействие в проведении эксперимента и д.ф.-м.н. Е.П. Хлыбову (Институт физики высоких давлений, Троицк, Россия) за предоставленный образец и 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. M.D. Lan, J.Z. Liu, and R.N. Shelton, *Phys. Rev. B* **43**, 12989 (1991).
3. 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).
4. D.J. Thomson, M.S.M. Minhaj, L.E. Wenger, and J.T. Chen, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 529 (1995).
5. H. Sözeri, L. Dorosinskii, U. Topal, and İ. Ercan, *Physica C* **408–410**, 109 (2004).
6. M.S. Li, *Phys. Rep.* **376**, 133 (2003).
7. M. Sigrist and T.M. Rice, *J. Phys. Soc. Jpn.* **61**, 4283 (1992).
8. D. Khomskii, *J. Low Temp. Phys.* **95**, 205 (1994).
9. V.A. Khlus and A.V. Dyomin, *Physica C* **212**, 352 (1993).
10. Э.Б. Сонин, *Письма в ЖЭТФ* **47**, 415 (1988).
11. A.E. Koshelev and A.I. Larkin, *Phys. Rev. B* **52**, 13559 (1995).
12. В.М. Дмитриев, А.В. Терехов, А. Залеский, Е.Н. Хацько, П.С. Калинин, А.И. Рыкова, А.М. Гуревич, С.А. Глаголев, Е.П. Хлыбов, И.Е. Костылева, С.А. Лаченков, *ФНТ* **38**, 191 (2012) [*Low Temp. Phys.* **38**, 154 (2012)].
13. 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).
14. 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)].
15. M.B. Maple and O. Fischer, *Superconductivity in Ternary Compounds II, Superconductivity and Magnetism*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–NewYork (1982).

## Wohlleben effect in $YRh_4B_4$

A.V. Terekhov

The Wohlleben effect (the positive response in the superconducting state while measuring the temperature dependence of magnetization in the FC mode) was revealed in the superconductor $YRh_4B_4$ at $H = 10$ Oe. The positive response disappears in the magnetic field of 20 Oe and a diamagnetic signal appears. Its magnitude increases with magnetic field.

PACS: 74.70.Ad Metals; alloys and binary compounds.

Keywords: superconductivity, Wohlleben effect.