

*Краткие сообщения*

**Усиление параметра сверхпроводящего  
упорядочения в соединении  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  при  
фазовой перестройке его магнитной подсистемы от  
антиферромагнитного к ферримагнитному состоянию**

**В.М. Дмитриев<sup>1,2</sup>, А. Залеский<sup>3</sup>, Е.П. Хлыбов<sup>2,4</sup>, Л.Ф. Рыбальченко<sup>1</sup>,  
Е.В. Христенко<sup>1</sup>, Л.А. Ищенко<sup>1</sup>, А.В. Терехов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина  
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua*

<sup>2</sup>*International Laboratory of High Magnetic Fields & Low Temperatures, Wroclaw, Poland*

<sup>3</sup>*Institute of Low Temperatures & Structure Research, PAS, Wroclaw, Poland*

<sup>4</sup>*Институт высоких давлений РАН, Троицк, Россия*

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2009 г.

Впервые экспериментально исследованы зависимости параметра сверхпроводящего упорядочения  $\Delta$  соединения  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  от магнитного поля  $H$  при температурах как выше, так и ниже температуры фазового перехода антиферромагнетик–ферримагнетик  $T_N \approx 2,7K$  в магнитной подсистеме  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$ . Показано, что этот фазовый переход существенно влияет на зарядовую подсистему сверхпроводника и параметр  $\Delta$ . Параметр  $\Delta$  оказывается больше в присутствии нескомпенсированного магнитного момента ферримагнитного состояния, чем при его отсутствии в антиферромагнитном состоянии. В системе  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  зарядовая и спиновая подсистемы оказываются существенно связанными, а механизм сверхпроводящего спаривания может оказаться нетрадиционным.

Вперше експериментально досліджено залежності параметра надпровідного впорядкування  $\Delta$  сполуки  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  від магнітного поля  $H$  при температурах як вище, так і нижче температури фазового переходу антиферомагнетик–феримагнетик  $T_N \approx 2,7K$  у магнітній підсистемі  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$ . Показано, що цей фазовий перехід істотно впливає на зарядову підсистему надпровідника та параметр  $\Delta$ . Параметр  $\Delta$  виявляється більше в присутності нескомпенсованого магнітного моменту феримагнітного стану, чим у його відсутності в антиферомагнітному стані. У системі  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  зарядова та спінова підсистеми виявляються істотно зв'язаними, а механізм надпровідного спарювання може виявитися нетрадиційним.

PACS: 74.70.Ad Металлы, сплавы и бинарные соединения (включая  $Al_5$ ,  $MgB_2$  и т.д.).

Ключевые слова: сверхпроводимость, ферримагнетик, антиферромагнетик, андреевское отражение, параметр сверхпроводящего упорядочения.

Недавно в работах [1,2] нами впервые было показано, что соединения  $Du_{1-x}Y_xRh_4B_4$  обнаруживают интересный набор фазовых превращений в широкой области температур. На примере  $Du_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  [2]

можно увидеть, что по мере снижения температуры соединения последовательно претерпевает переходы парамагнетик–ферримагнетик ( $T_C \approx 30,5 K$ ), ферримагнетик–сверхпроводящий ферримагнетик ( $T_C \approx 5,9 K$ ),

сверхпроводящий ферромагнетик–сверхпроводящий антиферромагнетик ( $T_N \approx 2,7$  К). При этом сверхпроводимость наблюдается вплоть до  $T \approx 0,32$  К — самой низкой температуры, доступной в нашем эксперименте. Заслуживает внимание тот факт, что, в отличие от большинства известных сверхпроводящих соединений, переход в сверхпроводящее состояние в  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$  происходит на фоне отличного от нуля спонтанного магнитного момента ферромагнитного состояния. Большой интерес представляют и особенности, обнаруженные на температурных и магнитопольных зависимостях сверхпроводящего параметра  $\Delta(T, H)$ . На магнитопольной зависимости  $\Delta(H)$ , измеренной при  $T = 1,6$  К, которая ниже температуры перехода ферромагнетик–антиферромагнетик в магнитной подсистеме  $T_N \approx 2,7$  К, в поле  $H \approx 3$  кЭ наблюдался минимум. В более высоких полях наблюдался рост  $\Delta$ , за которым следовал его монотонный спад. Предполагалось, что рост  $\Delta$  мог быть обусловлен восстановлением ферромагнитного состояния, в котором поведение сверхпроводящей подсистемы отличается от поведения в антиферромагнитной области, что выражается в более высоких значениях параметра порядка. В связи с этим важно провести исследования магнитопольной зависимости  $\Delta(H)$  и при температурах более высоких, чем  $T_N$ , т.е. в заведомо ферромагнитном состоянии магнитной подсистемы  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$ . В этих условиях особенность на зависимости  $\Delta(H)$  должна исчезнуть, если она действительно связана с фазовым переходом антиферромагнетик – ферромагнетик. Результаты таких исследований и представлены в данной работе.

Исследован тот же поликристаллический образец  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$ , что и в работе [2]. Для изучения зависимости  $\Delta(H)$  при различных температурах, как и в [2], использован метод микроконтактной спектроскопии.

Зависимость параметра сверхпроводящего упорядочения от магнитного поля  $\Delta(H)$  для соединения  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$  при температуре 1,6 К, представленная на рис. 1,а, аналогична измеренной в [2]. На рис. 1,б представлена зависимость  $\Delta(H)$  при температуре 2,4 К. Так как обе температуры, при которых выполнены эти измерения, ниже температуры  $T_N \approx 2,7$  К, то зависимости  $\Delta(H)$  имеют особенности в виде минимумов и максимумов при некоторых значениях магнитных полей. Мы связываем это с тем, что при повышении поля в образце индуцируется фазовый переход магнитной подсистемы сверхпроводника от антиферромагнитного к ферромагнитному упорядочению. Параметр сверхпроводящего упорядочения  $\Delta$  при этом заметно возрастает. Видно, что с повышением температуры значение поля, при котором индуцируется фазовый переход, заметно снижается. На рис. 1,а,б хорошо видно также, что чем ближе мы подходим к температуре  $T_N$ , тем менее ярко выра-

жена особенность на зависимости  $\Delta(H)$ : глубина минимума и высота максимума на этой зависимости уменьшаются. Уменьшается также отношение поля  $H_{\text{max}}$ , при котором наблюдается максимум на зависимости  $\Delta(H)$ , к значению второго критического поля  $H_{c2}$ . Так, для  $T = 1,6$  К  $H_{\text{max}}/H_{c2} \approx 0,72$ , а для  $T = 2,4$  К  $H_{\text{max}}/H_{c2} \approx 0,37$ . Из этих данных следует, что при понижении температуры значение поля  $H_{\text{max}}$  возрастает быстрее, чем значение поля  $H_{c2}$ . При этом возможна ситуация, когда при некоторой температуре возникнет неравенство  $H_{\text{max}} > H_{c2}$ . Это должно привести к тому, что зависимость  $\Delta(H)$  не будет иметь особенностей вплоть до поля  $H_{c2}$ , при котором сверхпроводимость будет разрушена. При дальнейшем повышении поля в магнитной подсистеме образца будет индуцирован фазовый переход антиферромагнетик–ферромагнетик, но уже в нормальном состоянии зарядовой подсистемы. К сожалению, в настоящее время этот сценарий мы не можем реализовать по техническим причинам, но это остается планом на ближайшее будущее. В настоящей работе реализован другой крайний случай, когда температура измерения зависимости  $\Delta(H)$  выше, чем температура  $T_N \approx 2,7$  К.

На рис. 1,в приведена зависимость  $\Delta(H)$ , измеренная при температуре 3,4 К. В этой ситуации, прикладывая магнитное поле, мы стартуем из заведомо ферромагнитного состояния, и поэтому наблюдаем гладкую, без особенностей, зависимость  $\Delta(H)$  вплоть до разрушения сверхпроводимости при значении поля  $H_{c2}$ . Здесь следует заметить, что близость значений полей  $H_{c2}$  при температурах 2,4 К и 3,4 К связана с немонотонной зависимостью  $H_{c2}(T)$ , обусловленной фазовым переходом в магнитной подсистеме при  $T_N \approx 2,7$  К [1,2]. Приведенные экспериментальные результаты также указывают на то, что значение магнитного поля, способного разрушить ферромагнитное состояние и превратить его в ферромагнитное, является величиной, значительно большей, чем значение поля  $H_{c2}$ . Таким образом, важно провести исследования в более высоких полях, чем это было доступно при выполнении настоящей работы, и исследовать процесс разрушения ферромагнитного состояния магнитным полем.

В заключение отметим, что в данной работе впервые экспериментально исследованы зависимости параметра сверхпроводящего упорядочения  $\Delta$  соединения  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$  от магнитного поля  $\Delta(H)$  при температурах как выше, так и ниже температуры фазового перехода антиферромагнетик – ферромагнетик  $T_N \approx 2,7$  К в магнитной подсистеме  $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$ . Показано, что этот фазовый переход существенно влияет на зарядовую подсистему сверхпроводника и параметр сверхпроводящего спаривания. Более того, параметр сверхпроводящего упорядочения оказывается больше в присутствии нескомпенсированного

магнитного момента ферромагнитного состояния, чем при его отсутствии в антиферромагнитном состоянии. Таким образом, в системе  $Dy_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  зарядовая и спиновая подсистемы оказываются существенно связанными, что может влиять на механизм

сверхпроводящего спаривания, который может оказаться нетрадиционным.

1. 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).
2. V.M. Dmitriev, A.J. Zaleski, E.P. Khlybov, L.F. Rybaltchenko, E.V. Khristenko, L.A. Ishchenko, A.V. Terekhov, I.E. Kostyleva, and S.A. Lachenkov, *Fiz. Nizk. Temp.* **34**, 1152 (2008) [*Low Temp. Phys.* **34**, 909 (2008)].

Enhancement of superconducting order parameter in the compound  $Dy_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  at phase transition of its magnetic subsystem from antiferromagnetic to ferrimagnetic state

V.M. Dmitriev, A. Zaleski, E.P. Khlybov, L.F. Rybaltchenko, E.V. Khristenko, L.A. Ishchenko, and A.V. Terekhov

For the first time the magnetic field dependence of superconducting order parameter  $\Delta(H)$  of the compound  $Dy_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  at temperatures above and below the antiferromagnetic-ferrimagnetic phase transition point  $T_N \approx 2.7$  K in the compound has been measured. It is shown that the charge subsystem and the order parameter  $\Delta$  are substantially influenced by this phase transition. The parameter  $\Delta$  appears to be higher in the presence of a noncompensated magnetic moment in the ferrimagnetic state than that in the absence of the moment in the antiferromagnetic state. The charge and spin subsystems in this compound are substantially coupled and the mechanism of superconducting pairing may be unconventional.

PACS: 74.70.Ad Metals, alloys and binary compounds (including A15,  $MgB_2$ , etc.).

Keywords: superconductivity, ferrimagnetic, antiferromagnetic, Andreev reflection, superconducting order parameter.

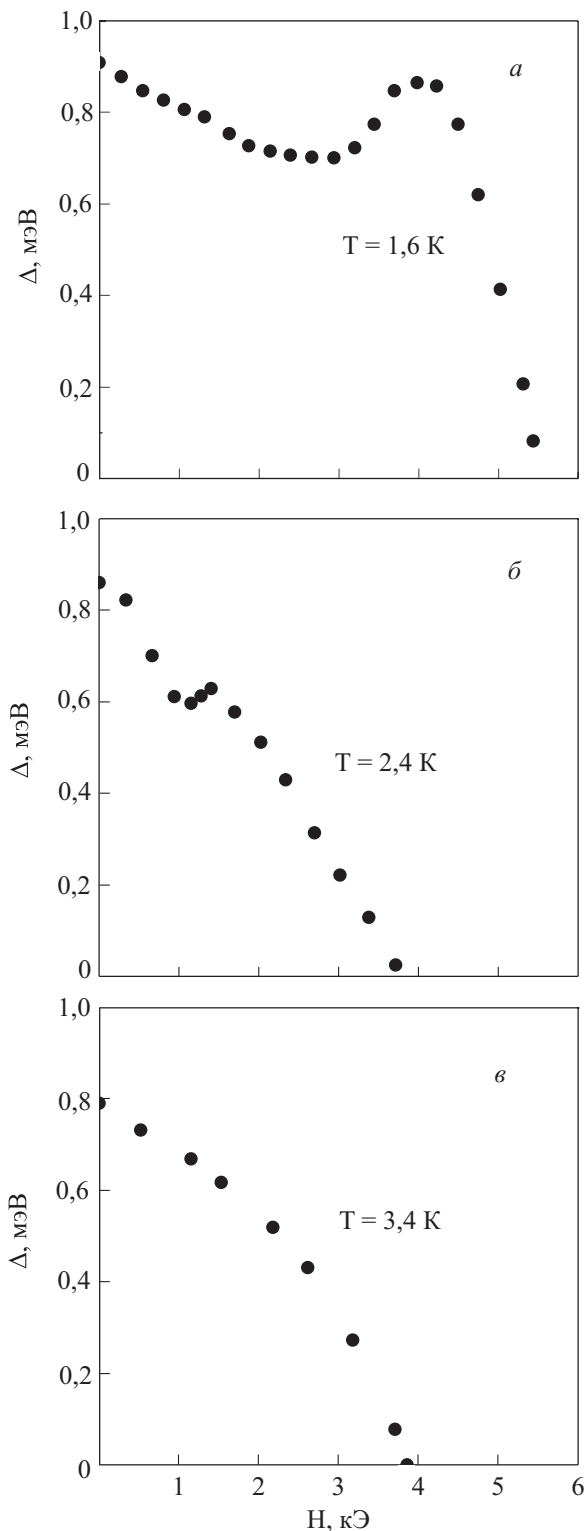


Рис. 1. Зависимость параметра порядка  $\Delta(H)$  в  $Dy_{0,8}Y_{0,2}Rh_4B_4$  от магнитного поля при различных температурах.