

УДК: 538.945

PACS: 71.20.Eh (Rare earth metals and alloys);

74.20.Mn (Nonconventional mechanisms);

74.45.+c (Proximity effects; Andreev reflection; SN and SNS junctions);

74.70.Dd (Ternary, quaternary, and multinary compounds (including Chevrel phases, borocarbides, etc.))

Увеличение сверхпроводящего параметра порядка в $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$ в широком интервале магнитных полей

А.В. Терехов¹, И.В. Золочевский¹, Е.В. Христенко¹, Л.А. Ищенко¹,
В.Н. Светлов¹, А. Залеский², Е.П. Хлыбов^{3,4}, С.А. Лаченков⁵

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина, Украина, 61103, г. Харьков, пр. Ленина, 47
zolochevskii@ilt.kharkov.ua

²W. Trzebiatowski Institute for Low Temperatures & Structure Research PAS, Poland, Box 1410, 50-950, Wrocław, Okolna, 2

³Международная Лаборатория сильных магнитных полей и низких температур, Польша, 53-421, г. Вроцлав, ул. Гайовицкая, 95

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

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

Впервые изучены спектры андреевского отражения в магнитном сверхпроводнике $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$. Обнаружен сильный рост сверхпроводящего параметра Δ в широком интервале магнитных полей: $0 \div 0.9H_{c2}$ при 1.6 К и $0 \div 0.6H_{c2}$ при 4.2 К. Показано, что при 1.6 К во внешнем магнитном поле максимальное значение $2\Delta/k_B T_c \approx 5.93$, что превышает значение 3.52, которое свойственно традиционным сверхпроводникам. В то же время при 4.2 К отношение $2\Delta/k_B T_c$ не превышает 3.52. Высказано предположение о том, что в $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$ увеличение сверхпроводящего параметра порядка Δ в магнитном поле может быть обусловлено нетрадиционным механизмом сверхпроводящего спаривания или/и изменениями в магнитной подсистеме.

Ключевые слова: сверхпроводящий параметр порядка, андреевское отражение, магнитный сверхпроводник, модифицированная теория Блондера-Тинкхама-Клапвика (БТК)

Вперше вивчені спектри Андріївського відбиття в магнітному надпровіднику $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$. Виявлено сильне зростання надпровідного параметра Δ в широкому інтервалі магнітних полів: $0 \div 0.9H_{c2}$ при 1.6 К і $0 \div 0.6H_{c2}$ при 4.2 К. Показано, що при 1.6 К в зовнішньому магнітному полі максимальне значення $2\Delta/k_B T_c \approx 5.93$, що перевищує значення 3.52, яке є властивим для традиційних надпровідників. У той же час при 4.2 К відношення $2\Delta/k_B T_c$ не перевищує 3.52. Висловлено припущення про те, що в $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$ збільшення надпровідного параметра порядку Δ в магнітному полі може бути обумовлено нетрадиційним механізмом надпровідного спарювання або/і змінами в магнітній підсистемі.

Ключові слова: надпровідний параметр порядку, андріївське відбиття, магнітний надпровідник, модифікована теорія Блондера-Тінкхама-Клапвіка (БТК)

The Andreev reflection spectra were studied for the first time in the magnetic superconductor $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$. A strong increase of the superconducting parameter Δ in a wide range of magnetic fields: $0 \div 0.9H_{c2}$ at 1.6 K and $0 \div 0.6H_{c2}$ at 4.2 K was found. It is shown that at 1.6 K in an external magnetic field, the maximum value of the $2\Delta/k_B T_c \approx 5.93$, which is greater than 3.52, which is typical for conventional superconductors. At the same time the ratio of the $2\Delta/k_B T_c$ not exceed 3.52 at 4.2 K. It was suggested that increase of superconducting order parameter Δ in the magnetic field in $\text{Dy}_{0.6}\text{Y}_{0.4}\text{Rh}_{3.85}\text{Ru}_{0.15}\text{B}_4$ may be due to the unconventional superconducting pairing mechanism or/and changes in the magnetic subsystem.

Keywords: superconducting order parameter, Andreev reflection, magnetic superconductor, the modified Blonder-Tinkham-Klapwijk theory (BTK)

Введение

Редкоземельные бориды родия MRh_4B_4 (где М – редкоземельный элемент, а также Y и Th) являются одними из первых соединений, в которых было обнаружено сосуществование сверхпроводимости и

магнитного упорядочения [1]. Недавно было показано, что в соединениях $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$ ($x = 0.2, 0.4$ и 0.6), в которых магнитный атом редкой земли (Dy) частично замещался немагнитным иттрием, возможно появление магнитоупорядоченного состояния со спонтанным

суммарным магнитным моментом отличным от нуля (ферримагнетизм) и сосуществование этого состояния со сверхпроводимостью, которая появляется при более низких температурах [2-4].

В работе [4] мы провели исследование поведения температурных и магнитопольевых зависимостей сверхпроводящих параметров (сверхпроводящая щель Δ , второе критическое поле H_{c2}) $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_4B_4$ с помощью метода микроконтактной (МК) спектроскопии. Был обнаружен ряд особенностей: рост величин H_{c2} и Δ с увеличением температуры в узком диапазоне температур и магнитных полей, высокие значения $2\Delta/k_B T_c > 4$. Причина такого поведения сверхпроводящих параметров окончательно все еще не выяснена.

В данной работе исследовано влияние магнитного поля на МК спектры андреевского отражения $dI/dV(V)$ еще одного представителя семейства редкоземельных боридов родия – $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ с более высокой ($T_c \approx 7$ K), чем в $Dy_{0.8}Y_{0.2}Rh_4B_4$ температурой сверхпроводящего перехода. Результаты получились еще более ошеломляющими, поскольку было обнаружено значительное увеличение сверхпроводящего параметра порядка в широком интервале магнитных полей.

Образцы и техника измерений

Образец $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ был приготовлен с помощью аргоно-дуговой плавки исходных компонентов с последующим отжигом в течение нескольких дней. Данные рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа показали однофазность поликристаллических образцов с кристаллической структурой типа $LuRu_4B_4$ (пространственная группа $I4/mmm$).

В работе исследовались микроконтактные (МК) спектры андреевского отражения ($dI/dV(V)$ -характеристики) контактов нормальный металл - сверхпроводник (N-S) в широком интервале смещений электрического напряжения, значительно превышающих щелевые значения, что позволило контролировать поведение избыточного (андреевского) тока и исключить из рассмотрения нестабильные контакты. Для создания контактов применялся метод «игла – наковальня». В качестве «наковальни» использовался исследуемый поликристаллический образец, а контрэлектрод механически заостренная и затем химически травленная тонкая, диаметром ~ 0.1 мм, Au- проволока.

Измерения были выполнены при 1.6 K и 4.2 K в магнитных полях, варьируемых от нулевого до H_{c2} . Также, с целью определения критической температуры начала сверхпроводящего перехода было измерено несколько семейств спектров для интервала температур

от 1.6 K и вплоть до T_c .

Микроконтактные спектры $dI/dV(V)$ измерялись с помощью стандартного модуляционного метода. Обработка спектров проводилась на основе модифицированной теории Блондера-Тинкхама-Клапвика (БТК) [5-7], широко используемой для параметризации точечных N-S контактов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.1. представлена температурная зависимость электросопротивления массивного образца $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$. Температура начала перехода в сверхпроводящее состояние $T_c^{on} \approx 7$ K.

На рис.2 представлены МК спектры, $dI/dV(V)$, для Au- $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ контакта с нормальным сопротивлением $R_N \approx 3.7 \Omega$, записанные в различных магнитных полях ($0 \div H_{c2}$) при 1.6 K. Аналогичные магнитно-полевые семейства спектров регистрировались на всех без исключения стабильных контактах, на которых удавалось провести полный цикл измерений. Всего их оказалось порядка десяти с $R_N \leq 20 \Omega$. Температура начала сверхпроводящего перехода T_c^{on} , определяемая по началу появления заметного максимума при нулевом смещении на $dI/dV(V)$ кривой, оказалась в пределах $6.7 \div 6.9$ K и мало отличалась от значения T_c массивного образца (рис.1). Этот факт является подтверждением достаточно высокого качества исследованных контактов. О высоком качестве контактов также свидетельствует значительная величина (вплоть до 80% от теоретически ожидаемого значения) избыточного тока I_{exc} мало меняющегося в

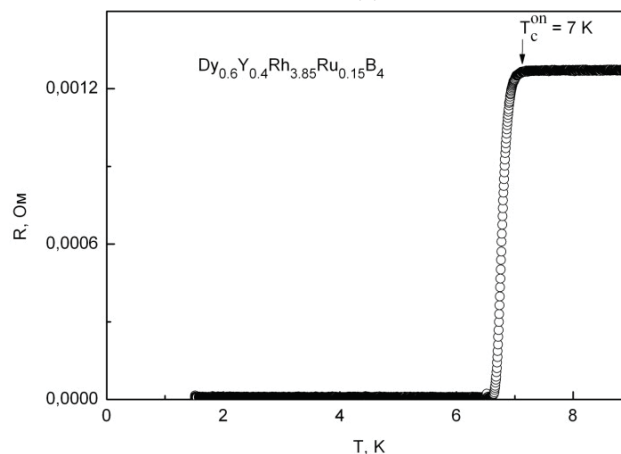


Рис.1. Резистивный переход $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ образца в сверхпроводящее состояние.

защелевой области напряжений ($V \gg \Delta/e$).

Анализ спектральных характеристик $dI/dV(V)$ при 1.6 K в разных магнитных полях, показывает, что они имеют два существенных отличия от подобных зависимостей в случае традиционных сверхпроводников. Во-первых, в нулевом магнитном поле на спектрах в окрестности $V = 0$ нет двойных

щелевых максимумов, которые наблюдаются в традиционных сверхпроводниках и возникают при несовпадении фермиевских импульсов в контактирующих электродах или при появлении тонкого диэлектрического слоя на N-S границе [8]. Второе, отличие наших спектров, измеренных вблизи 1.6 К (рис.2), от классического вида проявляется в усилении щелевой структуры при увеличении магнитного поля Н. Начиная с некоторого значения магнитного поля на спектрах появляются двойные максимумы, как в N-S контактах на основе традиционных сверхпроводников. При дальнейшем росте поля происходит увеличение интенсивности максимумов до определенного уровня, а затем процесс идет в обратном направлении, пока максимумы полностью не подавляются. Соответственно растут и напряжения при щелевых максимумах до тех пор, пока не достигнут некоторой величины, которая остается постоянной вплоть до H_{c2} . Таким образом, наблюдаются явные признаки усиления

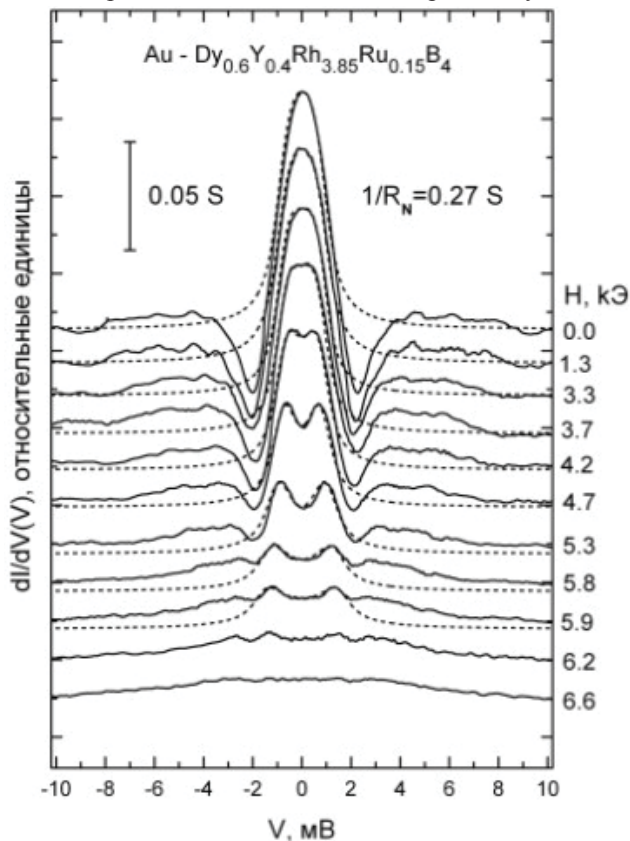


Рис.2. Андреевские спектры ($dI/dV(V)$) в различных магнитных полях при $T = 1.6$ К одного из типичных контактов. Результаты подгонки спектров к БТК теории показаны пунктирными линиями. Для наглядности кривые смещены по вертикали на произвольную величину.

сверхпроводимости постоянным магнитным полем.

На рис.3. представлены зависимости $\Delta(H)$, полученные при $T = 1.6$ К. Сверхпроводящий параметр Δ определялся путем подгонки

спектров модифицированной БТК теории [6] к экспериментальным спектрам (рис.2). Для сравнения на рис.3 представлена теоретическая зависимость $\Delta(H)$, рассчитанная для традиционных массивных сверхпроводников второго рода [9]. С ростом поля величина Δ растет в магнитных полях вплоть до $0.9H_{c2}$ и затем резко падает вблизи H_{c2} . Значение $2\Delta/k_B T_c \approx 2.8$

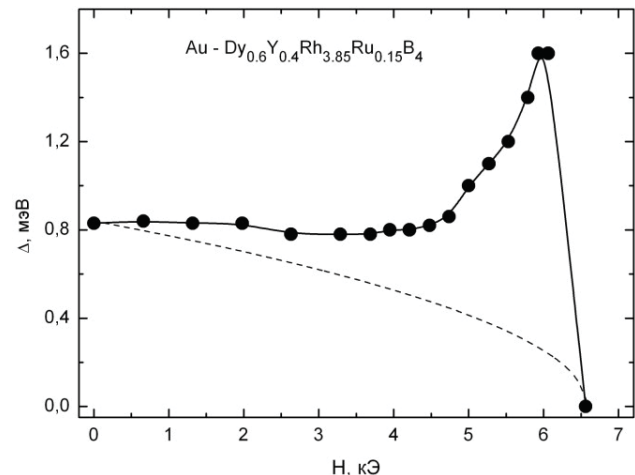


Рис.3. Зависимость параметра порядка от магнитного поля $\Delta(H)$ при $T = 1.6$ К для контакта, спектры которого представлены на рис.2. Для сравнения пунктирной линией показана теоретическая зависимость для традиционных массивных сверхпроводников II-го рода.

при $H = 0$ и $2\Delta/k_B T_c \approx 5.93$ при $H = 0.9H_{c2}$.

На рис.4 представлены микроконтактные спектры $dI/dV(V)$ для $Au-Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ контакта с нормальным сопротивлением $R_N \approx 3.7 \Omega$, записанные в различных магнитных полях ($0 \div H_{c2}$) при 4.2 К. Как видно на рис.4, при $T = 4.2$ К магнитное поле не стимулирует появление щелевых максимумов на спектрах, как это было при $T = 1.6$ К. Однако, отсутствие сужения центрального максимума с ростом поля, ширина которого непосредственно коррелирует с Δ , и последующий его резкий спад вблизи H_{c2} находятся в принципиальном согласии с данными, полученными при $T = 1.6$ К. По данным взятым из рис.4, аналогично тому, как это было сделано для спектров при $T = 1.6$ К, определялся сверхпроводящий параметр Δ и построены зависимости $\Delta(H)$ (рис.5). Здесь также, как и при $T = 1.6$ К, наблюдается рост Δ с увеличением магнитного поля, но в более узком интервале магнитных полей $0 \div 0.6H_{c2}$, затем параметр Δ уменьшается и при $H > 0.9H_{c2}$ на зависимости $\Delta(H)$ прослеживается его резкий спад. Значение $2\Delta/k_B T_c \approx 2$ при $H = 0$ и $2\Delta/k_B T_c \approx 3.43$ при $H = 0.6H_{c2}$.

Обсудим полученные экспериментальные результаты. Прежде всего, на рис. 3 и 4 видно, что экспериментально измеренные зависимости $\Delta(H)$ $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ очень сильно отклоняются от теоретической кривой, построенной для традиционных

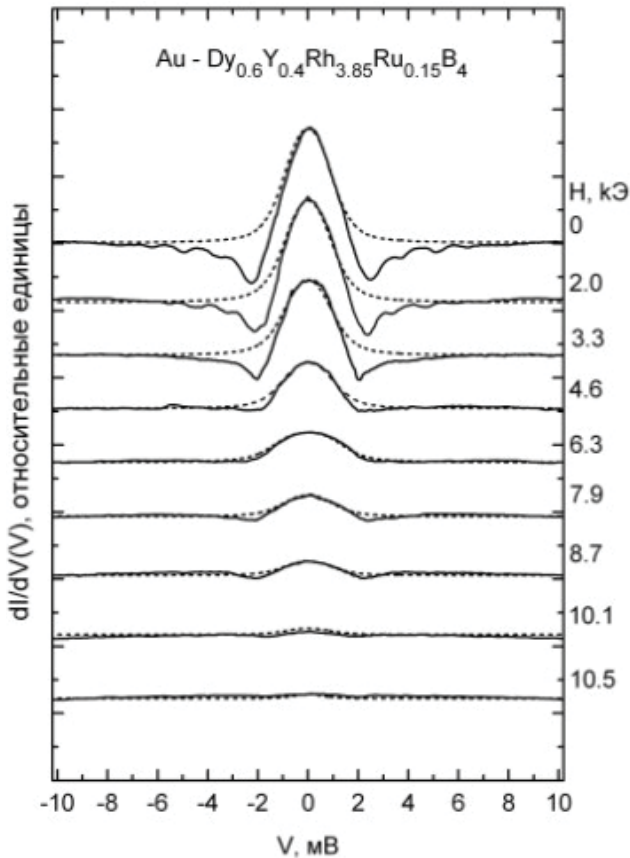


Рис.4. Андреевские спектры ($dI/dV(V)$) в различных магнитных полях одного из типичных контактов при $T = 4.2$ К. Результаты подгонки спектров к БТК теории показаны пунктирными линиями. Для наглядности кривые смещены по вертикали на произвольную величину.

массивных сверхпроводников II-го рода. Необычным является и рост сверхпроводящего параметра Δ в магнитном поле. Также обращает на себя внимание большое значение $2\Delta/k_B T_c \approx 5.93$ при 1.6 К, которое существенно выше ожидаемого $2\Delta/k_B T_c = 3.52$ для традиционных сверхпроводников из теории БКШ. Все эти особенности на наш взгляд могут быть объяснены либо сосуществованием сверхпроводимости и внутреннего магнетизма с отличным от нуля спонтанным магнитным моментом либо нетрадиционным типом спаривания и, не исключено, что присутствием обоих этих факторов. В первом случае, в образце при температурах ниже температуры сверхпроводящего перехода сосуществуют сверхпроводимость и магнитоупорядоченное состояние с отличным от нуля суммарным магнитным моментом (неколлинейное расположение магнитных моментов двух подрешеток). Под действием магнитного поля магнитные моменты разворачиваются коллинеарно друг относительно друга, так что суммарный магнитный становится равным нулю, и, таким образом, исчезает фактор подавляющий

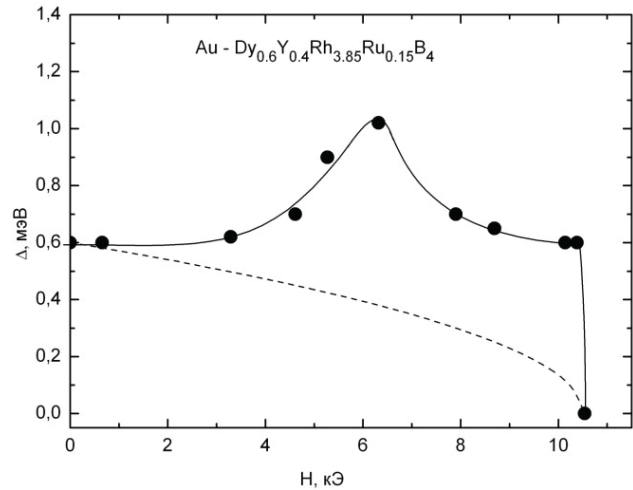


Рис.5. Зависимость параметра порядка от магнитного поля $\Delta(H)$ при $T = 4.2$ К для контакта, спектры которого представлены на рис.4. Для сравнения пунктирной линией показана теоретическая зависимость для традиционных массивных сверхпроводников II-го рода.

сверхпроводящее состояние, что в конечном итоге приводит к возрастанию сверхпроводящего параметра Δ относительно своего первоначального значения в нулевом поле. Эта концепция может объяснить поведение Δ при 4.2 К. При этой температуре, действительно в нулевом поле $2\Delta/k_B T_c \approx 2$, а при $0.6H_{c2}$ достигает максимального значения $2\Delta/k_B T_c \approx 3.43$, которое близко 3.52 для традиционных сверхпроводников. В то же время такая интерпретация сталкивается с трудностями при объяснении зависимости $\Delta(H)$ при 1.6 К, которые связаны с тем что значение $2\Delta/k_B T_c$ при этой температуре достигает 5.93 , что существенно выше ожидаемого для традиционных сверхпроводников. Следовательно, в этом случае не исключается возможность реализации нетрадиционного типа сверхпроводящего спаривания, возможно даже электрон - магнитного.

Другие возможные причины, объясняющие особенность поведения $\Delta(H)$ в $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$, например, попадание в микроконтактную область посторонних включений (отличающихся фазовым составом) или диэлектрических прослоек, вряд ли имеют место, поскольку критические параметры всех исследованных контактов оставались практически неизменными. К тому же, избыточный ток I_{exc} , как уже отмечалось, достигал 80% от теоретически возможного значения и никогда не снижался ниже 25%.

Отметим еще одну особенность поведения сверхпроводящих параметров в $Dy_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$. На рис. 3 и 5 видно, что $H_{c2}(T = 1.6 \text{ К}) = 6.56$ кЭ, а $H_{c2}(T = 4.2 \text{ К}) = 10.54$ кЭ, т.е. $H_{c2}(T = 1.6 \text{ К}) < H_{c2}(T = 4.2 \text{ К})$. В то же время, для традиционных сверхпроводников H_{c2} с ростом температуры должно уменьшаться. Подобное

поведение H_{c2} наблюдалось нами ранее в $Du_{0.8}Y_{0.2}Rh_4B_4$ и могло быть связано с фазовым превращением в магнитной подсистеме ниже некоторой температуры. Возможно, подобное происходит и в исследуемом в данной работе соединении, но для однозначного ответа необходимо проведение дополнительных исследований.

Заключение

1. Впервые исследованы спектры андреевского отражения $dI/dV(V)$ в микроконтактах на основе магнитного сверхпроводника $Du_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ с $T_c^{on} = 6.7 \div 6.9$ К в различных магнитных полях при температурах 1.6 К и 4.2 К.

2. Обнаружено, что с ростом магнитного поля сверхпроводящий параметр Δ возрастает в широком интервале магнитных полей ($0 \div 0.9H_{c2}$ при 1.6 К и $0 \div 0.6H_{c2}$ при 4.2 К), достигает максимума и затем снижается. Эффект более ярко выражен при 1.6 К.

3. Показано, что при 1.6 К во внешнем магнитном поле отношение $2\Delta/k_B T_c$ достигает 5.93, что больше значения 3.52, ожидаемого для традиционных сверхпроводников.

4. Высказано предположение о том, что в $Du_{0.6}Y_{0.4}Rh_{3.85}Ru_{0.15}B_4$ увеличение сверхпроводящего параметра порядка Δ в магнитном поле может быть связано с нетрадиционным механизмом сверхпроводящего спаривания или/и изменениями в магнитной подсистеме.

Настоящие исследования частично поддержаны грантом № 12-02-01193-а Российского фонда фундаментальных исследований.

1. M.B. Maple and O. Fischer. Superconductivity in Ternary Compounds II, Superconductivity and Magnetism. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982.
2. V.M. Dmitriev, A.J. Zaleskii, E.P. Khlybov, L.F. Rybaltchenko, E.V. Khristenko, L.A. Ishchenko and A.V. Terekhov, Acta Phys. Polon. A **114**, 83 (2008).
3. 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)].
4. В.М. Дмитриев, А. Залеский, Е.П. Хлыбов, Л.Ф. Рыбальченко, Е.В. Христенко, Л.А. Ищенко, А.В. Терехов, ФНТ 35, 537 (2009) [Low Temp. Phys. 35, 424 (2009)].
5. G.E. Blonder, M. Tinkham, and T.M. Klapwijk, Phys. Rev. B **27**, 112 (1982).
6. Y. DeWilde, T.M. Klapwijk, A.G.M. Jansen, J. Heil, and P. Wyder, Physica B **218**, 165 (1996).
7. R.C. Dynes, V. Narayanamurti, and J.P. Garno, Phys. Rev. Lett. **41**, 1509 (1978).
8. G.E. Blonder and M. Tinkham, Phys. Rev. B **27**, 112 (1983).
9. H. Kusunose, Phys. Rev. B, **70**, 054509 (2004).