

Парамагнитный эффект Мейснера у магнитного сверхпроводника $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$

Г. С. Бурханов, С. А. Лаченков, Е. П. Хлыбов

Установлен парамагнитный эффект Мейснера у $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ — однофазного сверхпроводника с собственной магнитной подсистемой, ранее наблюдавшийся у иттриевых и висмутовых купратов. Измерение магнитного момента $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ выполнено в режимах с включенным магнитным полем FC (field-cooling) и без него ZFC (zero-field-cooling) — охлаждение в магнитном поле и без него с последующим нагревом уже при включенном магнитном поле. При исследовании сложного борида родия в режиме FC, в полях ~ 20 Э (ниже первого критического), установлено возникновение положительного магнитного момента. Появление парамагнитного эффекта Мейснера у $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ в полях с величиной магнитного поля меньше величины нижнего критического поля ($B < B_{k1}$) связано с особенностями поведения магнитной подсистемы при охлаждении образца в режимах FC и ZFC при температуре ниже точки фазового перехода из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Обсуждена связь этой аномалии с собственной магнитной подсистемой соединения, формируемой кластерной кристаллической структурой типа LuRu_4B_4 . Установлено влияние собственной магнитной подсистемы на повышение устойчивости сверхпроводящего состояния. Присутствие собственной магнитной подсистемы отличает исследованный однофазный борид родия от других сверхпроводников 2-го рода, у которых магнитная подсистема отсутствует.

Ключевые слова: сверхпроводимость, парамагнитный эффект Мейснера, магнитная подсистема, режим FC, режим ZFC.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-4-5-10

Введение

Эффект Мейснера отражает идеальный диамагнетизм сверхпроводников. При величине магнитного поля меньше величины нижнего критического поля $B < B_{k1}$ (B_{k1} — величина нижнего критического поля) магнитная восприимчивость образца $\chi = -1$. Однако не всегда сверхпроводники ведут себя как идеальные диамагнетики. В сверхпроводниках 2-го рода в отдельных случаях возникает положительный магнитный момент (парамагнитный эффект Мейснера).

Известно, что при $B_{k1} < B < B_{k2}$ (B_{k2} — величина верхнего критического поля) магнитный поток проникает извне в объем сверхпроводника и магнитная восприимчивость (χ) при этом возрастает от первоначального значения -1 , оставаясь отрицательной величиной, до перехода образца в нормальное состояние во всем объеме, при котором χ приобретает положительное значение ($B > B_{k2}$) [1].

В отдельных случаях переход образца из нормального в сверхпроводящее состояние наблюдается

на фоне уже возникшего положительного магнитного момента (парамагнитный эффект Мейснера). Впервые парамагнитный эффект Мейснера был установлен у высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [2, 3]. Его наблюдали также на тонких дисках ниобия, относящегося в отличие от других чистых металлов к сверхпроводникам 2-го рода [4].

Парамагнитный эффект Мейснера в зависимости от природы исследуемого вещества объясняли различными причинами: джозефсоновские петли, захват магнитного потока и его последующее сжатие в гигантский вихрь [2, 5].

Цель работы — исследование парамагнитного эффекта Мейснера в магнитных полях ниже первого критического B_{k1} у синтезированного однофазного магнитного сверхпроводника — $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$.

Объекты и методы исследования

Синтезированное для исследований соединение относится к массиву боридов с общей формулой RERh_4B_4 . В зависимости от редкоземельного компо-

нента (RE) бориды могут быть сверхпроводниками, кооперативными магнетиками или, как в нашем случае, магнитными сверхпроводниками [6 – 8].

Синтезирован однофазный магнитный сверхпроводник $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$, который радикально отличается от других сверхпроводников 2-го рода присутствием собственной магнитной подсистемы, формируемой кластерной кристаллической структурой типа LuRu_4B_4 .

Синтез проводили прямым сплавлением исходных компонентов в контролируемой атмосфере (аргодуговой нагрев). Стабилизацию кластерной кристаллической структуры типа LuRu_4B_4 осуществляли частичным замещением родия рутением. Благоприятное влияние рутения на стабилизацию кластерной структуры установлено экспериментально. Другой возможный способ стабилизации — высокотемпературный синтез (1800 – 2000 °С) при давлении ~ 8 ГПа.

Измерение магнитного момента однофазного магнитного сверхпроводника $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ проводили в режимах FC и ZFC — охлаждение в магнитном поле и без него с последующим нагревом уже при включенном магнитном поле. Положительный магнитный момент сохранялся при переходе в сверхпроводящее состояние в процессе охлаждения и ниже критической температуры сверхпроводящего перехода T_c во внешнем магнитном поле ~ 20 Э (режим FC); отрицательный — в его отсутствии и с последующим нагревом при включенном магнитном поле (режим ZFC). Для получения однофазных образцов использовали исходные компоненты особой чистоты.

Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре ДРОН-ЗМ с использованием отфильтрованного CuK_α -излучения. Удельное электросопротивление измеряли стандартным четырехконтактным методом в интервале температур от 1,6 до 250 К, погрешность измерения температуры — в пределах 0,1 К. Критическую температуру сверхпроводящего перехода определяли по измерениям магнитной восприимчивости образцов. $B_{c2}(T)$ определяли из температурной зависимости электросопротивления $R(T)$ в магнитных полях до 1,5 Тл. Влияние поля на температурную зависимость намагниченности, теплоемкости и магнитного момента изучали с помощью универсального прибора PPMS-3 фирмы Quantum Design.

Экспериментальные результаты

Результаты исследования магнитной восприимчивости $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ представлены на рис. 1.

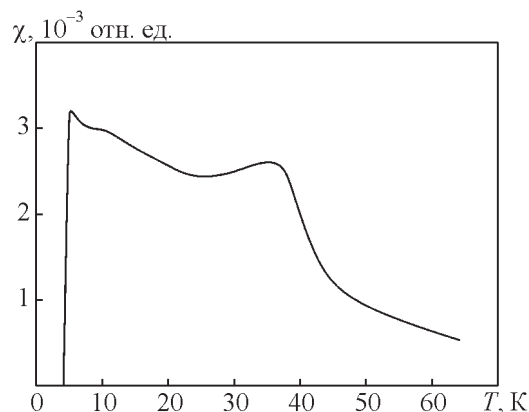


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости $\chi(T)$ для $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$.

Fig. 1. Temperature dependence of magnetic susceptibility $\chi(T)$ for $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$.

Величина критической температуры сверхпроводящего перехода (T_c), с учетом ошибки при определении температуры, составила $4,5 \pm 0,2$ К.

Зависимость верхнего критического поля от температуры ($B_{c2}(T)$) для соединения $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ представлена на рис. 2. Из рис. 2 следует, что при $T \sim 2,8$ К кривая $B_{c2}(T)$ имеет точку перегиба и отклоняется от классической параболической зависимости. На вставке рис. 2 представлена зависимость удельной приведенной теплоемкости от температуры, которая имеет λ -пик при $T \sim 2,8$ К.

На рис. 3 представлена температурная зависимость магнитного момента $M(T)$ $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$

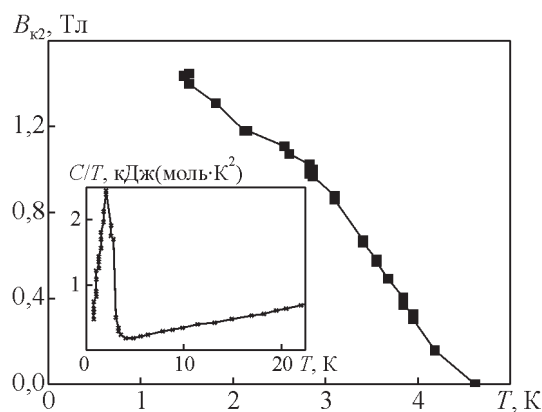


Рис. 2. Зависимость верхнего критического магнитного поля от температуры ($B_{c2}(T)$) сверхпроводника $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$. На вставке зависимость приведенной теплоемкости от температуры.

Fig. 2. Dependence of the upper critical magnetic field on the temperature ($B_{c2}(T)$) of the superconductor $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$. On the insert the dependence of the reduced heat capacity on temperature.

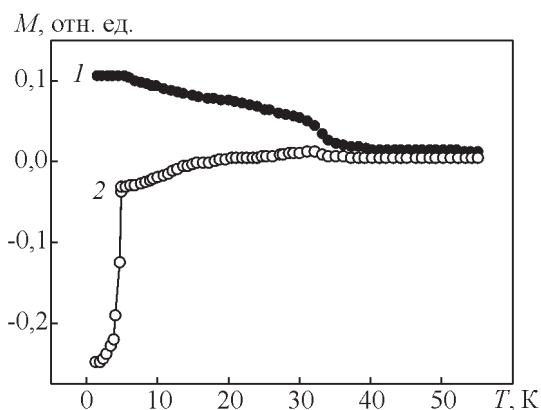


Рис. 3. Температурная зависимость магнитного момента $M(T)$ для $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ для двух режимов: 1 — FC (охлаждения в поле 20 Э); 2 — ZFC (охлаждения в нулевом магнитном поле с последующим отогревом в поле 20 Э).

Fig. 3. Temperature dependence of the magnetic moment $M(T)$ for $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ for two modes: 1 — FC (cooling in the field of 20 Oe); 2 — ZFC (cooling in the zero magnetic field followed by warming in the field of 20 Oe).

для двух режимов: FC (охлаждения в поле 20 Э) и ZFC (охлаждения в нулевом магнитном поле с последующим отогревом в поле 20 Э). Зависимости $M(T)$ для режимов FC и ZFC до 45 К совпадают (образцы находятся в парамагнитном состоянии).

Исследование температурной зависимости магнитной восприимчивости $(\chi)^{-1}$ соединения $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ представлены на рис. 4. Из анализа рис. 4 следует, что магнитная восприимчивость при температурах выше 45 К следует закону Кюри.

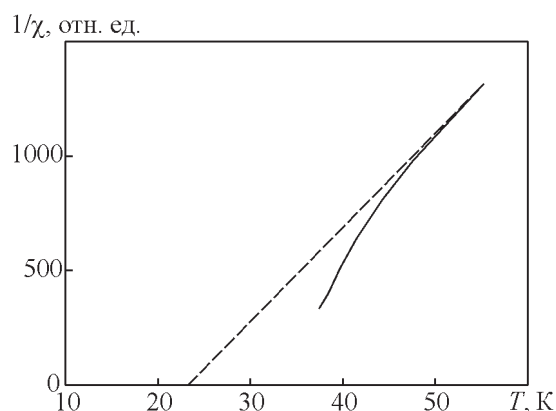


Рис. 4. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости для $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$.

Fig. 4. Temperature dependence of reverse magnetic susceptibility for $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$.

Обсуждение результатов

Возникновение парамагнитного эффекта Мейснера у сверхпроводящего однофазного борида $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ связано с особенностями собственной магнитной подсистемы, формируемой кристаллической кластерной структурой соединений типа LuRu_4B_4 . Её модель в виде объёмно-центрированной тетрагональной структуры (ОЦТ) представлена на рис. 5. Согласно [8] основные составные блоки ОЦТ структуры — слегка искажённые ГЦК решетки, по узлам которой распределены атомы лутеция (Lu), в нашем случае атомы Dy. Атомы редкоземельного металла отделены один от другого неэквивалентными тетраэдрами Ru_4B_4 двух типов (рис. 5). Эти тетраэдры развернуты относительно друг друга на 90° . Расстояние между атомами рутения в тетраэдрах, ориентированных различным образом — 2,98 и 3,10 Å.

Наличие неэквивалентных тетраэдров, по Нелю [9], приводит к возникновению двух неэквивалентных магнитных подрешеток с противоположным направлением магнитных моментов. Неэквивалентные магнитные подрешетки позволяют сформировать в образце собственную магнитную подсистему, с которой может быть связано ферромагнитное или антиферромагнитное состояние $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$.

Парамагнитный эффект Мейснера можно объяснить особенностями магнитной подсистемы соединения $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$.

Подчеркнем, что в $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ сверхпроводимость возникает в однофазном образце на фоне уже сформировавшейся собственной маг-

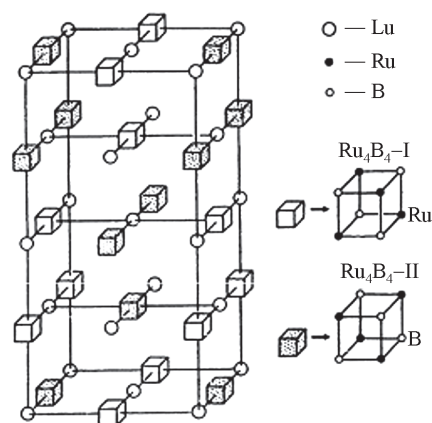


Рис. 5. Объёмно-центрированная тетрагональная структура соединения типа LuRu_4B_4 .

Fig. 5. Body-centered tetragonal structure of LuRu_4B_4 type compound.

нитной подсистемы. Такое состояние магнитных сверхпроводников принципиально отличается от смешанного (Шубниковского) со сверхпроводящей фазой и структурой электронных вихрей вокруг нитей магнитного потока [1], в котором сверхпроводник способен частично пропускать внешнее магнитное поле.

Рассмотрим магнитный сверхпроводник $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ с собственной магнитной подсистемой и аномальной температурной зависимостью верхнего критического магнитного поля $B_{k2}(T)$. Отклонение $B_{k2}(T)$ от классической параболической зависимости с перегибом и резким подъемом соответствует началу фазового перехода ферромагнетик $\rightarrow$ антиферромагнетик собственной магнитной подсистемы (рис. 2). λ -пик на кривой теплоемкости (рис. 2, вставка) отвечает переходу ферромагнетик $\rightarrow$ антиферромагнетик ($T \sim 2,8$ К). Резкий рост $B_{k2}(T)$ с отклонением от классической параболической зависимости свидетельствует о повышении устойчивости сверхпроводящего состояния $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ в магнитном поле после λ -пика.

Возникновение сверхпроводимости на фоне собственной магнитной подсистемы может быть связано с новым типом электронного спаривания в магнитных сверхпроводниках — триплетным, более прочным по сравнению с обычным синглетным. Рассматриваемый в работе [10] механизм триплетного спаривания связан с взаимным орбитальным моментом пары $L = 1$. Параметр порядка Δ для близкого по своим свойствам другого борида $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$, $\Delta(1,6 \text{ К}) = 0,98$ мэВ дает отношение $2\Delta(0)/k_B T_K = 4,00$ против 3,52, которое следует из теории БКШ для синглетных сверхпроводников [11].

Взаимосвязь устойчивости сверхпроводящего состояния с собственной магнитной подсистемой — важный фактор для объяснения возникновения положительного магнитного момента (парамагнитного эффекта Мейснера) в однофазных боридах родия при воздействии слабых магнитных полей, ниже первого критического (~ 20 Э). Согласно выполненным измерениям, величина первого критического поля $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ составляет $\sim 70 - 80$ Э.

Из анализа результатов, представленных на рис. 3, следует, что при охлаждении магнитного сверхпроводника $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ до 45 К зависимости $M(T)$ для режимов FC и ZFC совпадают (образцы находятся в парамагнитном состоянии). При $T < 45$ К наблюдается увеличивающееся с понижением температуры расхождение $M(T)$ для каждого из двух выбранных режимов FC и ZFC.

Исследование температурной зависимости магнитной восприимчивости $(\chi)^{-1}$ соединения

$\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ показало (рис. 4), что 45 К — точка фазового перехода в ферромагнитное состояние, а выше этой температуры соблюдается закон Кюри. Следовательно, расхождение кривых FC и ZFC (рис. 3) начинается с перехода собственной магнитной подсистемы $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ из парамагнитного в ферромагнитное состояние.

Традиционный (диамагнитный) эффект Мейснера у сверхпроводников может отсутствовать по разным причинам [2 – 5]. В случае синтезированного нами однофазного образца $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ отсутствие диамагнитного эффекта Мейснера может быть объяснено положительным магнитным моментом собственной магнитной системы.

В случае немагнитных сверхпроводников переход в сверхпроводящее состояние происходит, как правило, из парамагнитного состояния. При таких условиях $M(B, T)$ — магнитный момент образца имеет незначительную положительную величину, а кривые M_{FC} и M_{ZFC} совпадают.

Из анализа зависимостей FC и ZFC на рис. 3, следует, что при температуре $T < 45$ К существуют две величины магнитного момента M_{FC} и M_{ZFC} , причем $M_{FC} - M_{ZFC} = \Delta M \neq 0$. При температурах немного больше критической T_K , величина магнитного момента M_{FC} превышает M_{ZFC} , то есть при величине $B = 20$ Э и $T \sim T_K$ состояние магнитной подсистемы однозначно не определено. Если бы переход $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ в сверхпроводящее состояние состоялся правее точки 45 К по шкале температур (рис. 3), то он происходил бы из двух эквивалентных состояний ($M_{FC} = M_{ZFC}$), и возможно традиционный эффект Мейснера был бы обнаружен.

В нашем случае переход в сверхпроводящее состояние при режиме FC происходит на фоне значительного положительного магнитного момента M_{FC} . По-видимому, он перекрывает диамагнитный эффект Мейснера, который при определенных условиях может себя проявить. В случае ZFC-режима магнитное поле, приложенное к системе уже перешедшей в сверхпроводящее состояние, вызывает реакцию в виде отрицательного магнитного момента M_{ZFC} (рис. 3), который наряду с квантовой природой традиционного диамагнитного эффекта Мейснера может быть результатом возникновения по закону Фарадея – Ленца экранирующих токов. Подчеркнем, что по мере отогрева образца, с приближением к критической температуре перехода T_K , магнитный момент уменьшается по модулю, продолжая оставаться отрицательным.

Интересно отметить, что переход $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ в антиферромагнитное состояние при 2,8 К никак не сказался на кривых FC и ZFC.

Сверхпроводимость можно рассматривать как новое фазовое состояние с нулевым электро-сопротивлением и идеальным диамагнетизмом — эффектом Мейснера, который является прямым следствием теории Бардина — Купера — Шриффера (БКШ) [10]. Обнаружено, что для ряда новых сверхпроводников диамагнитный эффект Мейснера может нарушаться и вместо него проявляться парамагнитный эффект Мейснера [2 – 5]. У однофазных магнитных сверхпроводников на основе боридов родия диамагнитный эффект Мейснера может перекрываться положительным магнитным моментом собственной магнитной подсистемы.

В зависимости от физико-химической природы сверхпроводника могут быть предложены другие подходы к объяснению причин парамагнитного эффекта Мейснера. Возможно, что во всех случаях диамагнитный эффект Мейснера восстановится при снятии перекрывающего его положительного магнитного момента.

Выводы

Установлен парамагнитный эффект Мейснера, ранее наблюдавшийся у иттриевых и висмутовых купратов, в слабых магнитных полях при $B < B_{к1}$ у $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ — однофазного сверхпроводника с собственной магнитной подсистемой, создаваемой кластерной кристаллической структурой типа LuRu_4B_4 .

Появление парамагнитного эффекта Мейснера у $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ в полях $B < B_{к1}$ связано с особенностями поведения магнитной подсистемы при охлаждении образца в режимах с включенным магнитным полем (FC) и без него (ZFC) при температуре ниже точки фазового перехода из парамагнитного в ферри-магнитное состояние. Суммарный положительный момент магнитной подсистемы, сформированный в режиме FC, перекрывает вклад от диамагнитного эффекта Мейснера. Переход в сверхпроводящее состояние происходит на фоне положительного магнитного момента. В случае воздействия магнитного поля на образец, уже находящейся в сверхпроводящем состоянии (ZFC), возникает отклик в виде отрицательного магнитного момента.

Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-00.

Литература

1. Буккель В. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975, 366 с.
2. Svedlindh P., Niskanen K., Norling P., Nordblad P., Lundgren L., Lonnberg B., Lundstrom T. Anti-Meissner

- effect in the BiSrCaCuO -system. *Physica C: Supercond*, 1989, v. 162 – 164, part 2, p. 1365 – 1366.
3. Rykov A.I., Tajima S. High-field paramagnetic effect in large crystals of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Physical Rev. B*, 1997, v. 55, no. 13, p. 8557 – 8563.
4. Pust L., Wenger L.E. Detailed investigation of the superconducting transition of niobium disks exhibiting the paramagnetic Meissner effect. *Physical Rev. B*, 1998, v. 58, no. 2, p. 14191 – 14194.
5. Moshchalkov V.V., Qiu X.G., Bruyndoncx V. Paramagnetic Meissner effect from the self-consistent solution of the Ginzburg-Landau equations. *Physical Rev. B*, 1997, v. 55, no. 17, p. 11793 – 11801.
6. Бурханов Г.С., Лаченков С.А., Хлыбов Е.П. Анализ взаимосвязи магнитной и сверхпроводящей подсистем соединений $\text{RE}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{B}_4$ на примере $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ и $\text{HoRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$. *ДАН*, 2015, т. 460, № 4, с. 398 – 402.
7. Бурханов Г.С., Лаченков С.А., Хлыбов Е.П. Особенности фазовых переходов магнитного сверхпроводника $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$. *Металлы*, 2010, № 3, с. 79 – 83.
8. Сверхпроводимость в тройных соединениях. Т. 2. Сверхпроводимость и магнетизм. Под ред. М. Мейпла, Э. Фишера. М.: Мир, 1985, 392 с.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978, 792 с.
10. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО, 2000, 402 с.
11. Дмитриев В.М., Залеский А., Хлыбов Е.П., Рыбальченко Л.Ф., Христенко Е.В., Ищенко Л.А., Терехов А.В., Костылева И.Е., Лаченков С.А. Магнитные фазовые превращения и сверхпроводимость в $\text{Dy}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{Rh}_4\text{B}_4$. *Физика низких температур*, 2008, т. 34, № 11, с. 1152 – 1162.

References

1. Buckel V. *Sverkhprovodimost* [Superconductivity]. Moscow, Mir Publ., 1975, 366 p.
2. Svedlindh P., Niskanen K., Norling P., Nordblad P., Lundgren L., Lonnberg B., Lundstrom T. Anti-Meissner effect in the BiSrCaCuO system. *Physica C: Supercond.*, 1989, vol. 162 – 164, part 2, pp. 1365 – 1366.
3. Rykov A.I., Tajima S. High-field paramagnetic effect in large crystals of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Physical Rev. B*, 1997, vol. 55, no. 13, pp. 8557 – 8563.
4. Pust L., Wenger E.L. Detailed investigation of the superconducting transition of niobium disks exhibiting the paramagnetic Meissner effect. *Physical Rev. B*, 1998, vol. 58, no. 2, pp. 14191 – 14194.
5. Moshchalkov V.V., Qiu X.G., Bruyndoncx V. Paramagnetic Meissner effect from the self-consistent solution of the Ginzburg-Landau equations. *Physical Rev. B*, 1997, vol. 55, no. 17, pp. 11793 – 11801.
6. Burkhanov G.S., Lachenkov S.A., Khlybov E.P. Analysis of the relationship of magnetic and superconducting subsystems of $\text{re}(\text{Rh}_{1-x}\text{Ru}_x)_4\text{B}_4$ compounds on the example of $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$ and $\text{DyRh}_{3,8}\text{Ru}_{0,2}\text{B}_4$.

- Doklady Akademii Nauk — Doklady Physics*, 2015, vol. 460, no. 4, pp. 398 – 402.
7. Burkhanov G.S., Lascencov S.A., Khlybov E.P. Specificity of phase transitions in the magnetic superconductor $\text{Dy}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$. *Metally — Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, no. 3, pp. 79 – 83.
 8. Maple M., Fisher E. *Sverkhprovodimost v troynykh soyedineniyakh* [Superconductivity in triple junctions]. Vol. 2, *Sverkhrovodimost i magnetizm* [Superconductivity and magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1985, 392 p.
 9. Kittel C. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to solid state physics]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 792 p.
 10. Schmidt V.V. *Vvedenie v fiziku sverkhprovodnikov* [Introduction to the physics of superconductors]. Moscow, MTSNMO Publ., 2000, 402 p.
 11. Dmitriev V.M., Zaleski A., Khlybov E.P., Rybalchenko L.F., Khristenko E.V., Ishchenko L.A., Terekhov A.V., Kostyleva I.E., Lachenkov S.A. Magnetic phase transformations and superconductivity in $\text{Dy}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{Rh}_4\text{B}_4$. *Fizika Nizkikh Temperatur — Low Temperature Physics*, 2008, vol. 34, no. 11, pp. 1152 – 1162.

Статья поступила в редакцию — 10.12.2019 г.
после доработки — 26.12.2019 г.
принята к публикации — 27.12.2019 г.

Бурханов Геннадий Сергеевич — Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (199334, Москва, Ленинский пр. 49), член-корр. РАН, заведующий лабораторией, специалист в области физико-химии и технологии неорганических материалов. E-mail: genburkh@imet.ac.ru.

Лаченков Сергей Анатольевич — Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (199334, Москва, Ленинский пр. 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области сверхпроводящих материалов, металлофизики сверхпроводников. E-mail: lachenck@imet.ac.ru.

Хлыбов Евгений Петрович — Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина РАН (Москва, 142190, Троицк, Калужское шоссе, стр. 14), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области сверхпроводимости, магнетизма и физики высоких давлений. E-mail: ekhlybov@rambler.ru.

Paramagnetic Meissner effect of the $\text{Dy Rh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ magnetic superconductor

G. S. Burkhanov, S. A. Lachenkov, E. P. Khlybov

The paramagnetic Meissner effect, previously observed in yttrium and bismuth cuprates, was established by us in $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ — a single-phase superconductor with its own magnetic subsystem. Measurement of the magnetic moment $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ is performed in FC and ZFC modes – cooling in a magnetic field and without it, followed by heating already when the magnetic field is turned on. In the study of complex rhodium boride in the FC mode, in the fields of ~ 20 Oe (below the first critical), the occurrence of a positive magnetic moment was established. The appearance of a paramagnetic Meissner effect at $\text{DyRh}_{3.8}\text{Ru}_{0.2}\text{B}_4$ fields $B < B_c$, is connected with the peculiarities of behavior of the magnetic subsystem with the cooling of the sample in modes-enabled by a magnetic field (FC) and without (ZFC) at a temperature below the phase transition point from paramagnetic to ferrimagnetic state. The connection of this anomaly with the intrinsic magnetic subsystem of the compound formed by a cluster crystal structure of the LuRu_4B_4 type is discussed. The influence of the intrinsic magnetic subsystem on increasing the stability of the superconducting state is established. The presence of its own magnetic subsystem distinguishes the studied single-phase rhodium boride from other superconductors of the 2nd kind, which do not have a magnetic subsystem.

Keywords: superconductivity, paramagnetic Meissner effect, magnetic subsystem, the mode of FC, ZFC.

Burkhanov Gennadiy — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS (49 Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia), corresponding member of RAS, head of laboratory Physical chemistry of refractory and rare metals and alloys, specialist in the field of physical chemistry and technology of inorganic materials. E-mail: genburkh@imet.ac.ru.

Lachenkov Sergey — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS (49 Leninskii pr., Moscow, 119334, Russia), PhD, leading research worker, specialist in the field of superconducting materials and metal physics of superconductors. E-mail: lachenck@imet.ac.ru.

Khlybov Evgeniy — Vereshchagin Institute for High Pressure Physics, Russian Academy of Sciences (HPPI RAS, 142190, Troitsk, Moscow, Russia), Dr Sci (Phys-Math), leading researcher, specialist in the field of superconductivity, magnetism and high pressure physics. E-mail: ekhlybov@rambler.ru.