

Обнаружение аномального пика электросопротивления монокристалла UFe_4Al_8 в области температур 160–100 К и отрицательного магнитосопротивления в полях до 400 Э

В.М. Дмитриев^{1,2}, А.В. Терехов¹, В. Суски^{2,3}

¹*Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркина НАН України
пр. Леніна, 47, г. Харків, 61103, Україна
E-mail: dmitriev@ilt.kharkov.ua*

²*International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures
95 Gajowicka St., 53-421 Wrocław, Poland*

³*W. Trzebiatowski Institute of Low Temperatures and Structure Research
Polish Academy of Sciences, P.O. 1410, 50-950 Wrocław, Poland*

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2006 г.

В урановом монокристаллическом соединении UFe_4Al_8 в интервале температур 160–100 К экспериментально обнаружена аномалия электросопротивления в виде пика, который подавляется слабыми магнитными полями 1–400 Э (отрицательное магнитосопротивление). Максимальное снижение электросопротивления в магнитном поле $H = 400$ Э наблюдается в максимуме аномалии и достигает 25 %. Рассматриваются возможные механизмы аномального поведения электрического транспорта в интервале температур 160–100 К.

В урановій монокристалічній сполуці UFe_4Al_8 в інтервалі температур 160–100 К експериментально виявлено аномалію електроопору у вигляді піку, який подавляється слабкими магнітними полями 1–400 Е (негативний магнітоопір). Максимальне зниження електроопору в магнітному полі $H = 400$ Е спостерігається в максимумі аномалії і досягає 25 %. Розглядаються можливі механізми аномальної поведінки електричного транспорту в інтервалі температур 160–100 К.

PACS: 74.25.Nf, 72.15.Eb

Ключевые слова: электросопротивление, монокристалл UFe_4Al_8 , отрицательное магнитосопротивление.

Недавно в некоторых тройных редкоземельных соединениях RFe_4Al_8 с кристаллической структурой типа $ThMn_{12}$ было обнаружено явление отрицательного магнитосопротивления (ОМ) в малых магнитных полях (единицы и десятки эрстед) [1–3]. Естественно возник вопрос о возможности существования ОМ и в соединениях с актиноидами $AnFe_4Al_8$ (где $An = U, Np, Th$). Среди этих соединений наибольшее разнообразие интересных физических явлений (различные типы магнитного упорядочения в подрешетках Fe и U, состояние спинового стекла) обнаружено в UFe_4Al_8 [4,5].

Отрицательное магнитосопротивление в умеренных и сильных магнитных полях от нескольких килоэрстед до нескольких тесла в UFe_4Al_8 уже наблюдалось ранее и было подробно исследовано [6,7]. Настоящая работа посвящена исследованию резистивных и магниторезистивных свойств монокристалла UFe_4Al_8 на предмет обнаружения ОМ в малых магнитных полях аналогично системам RFe_4Al_8 . С этой целью указанные свойства этого соединения были изучены в области температур 300–4,2 К и диапазоне магнитных полей 0–400 Э.

Образцы и методика измерений

Монокристаллы $UF_{e_4}Al_8$ были выращены методом Чохральского — вытягиванием из стехиометрического расплава исходных компонентов. Образцы имели форму цилиндров диаметром около 2,5 мм и длиной до 8 мм. Многочисленные измерения удельного сопротивления ρ четырехконтактным методом на постоянном токе и поверхностного сопротивления R_S бесконтактным резонаторным методом [8,9] на частотах 40 и 70 МГц показали, что $R_S \sim \sqrt{\rho}$. То есть во всем температурном интервале измерений от 300 до 4,2 К мы находимся в области нормального скин-эффекта, как это было и ранее в случае монокристаллов $ScFe_4Al_8$ и YFe_4Al_8 [3].

Поскольку, с одной стороны, бесконтактный резонаторный метод более удобен, а, с другой, для сравнения с литературными данными лучше использовать значения ρ , в настоящей работе измеренные зависимости $R_S(T, H)$ перестроены в зависимости $R_S^2(T, H) \sim \rho(T, H)$.

Измерения проведены в двух различных конфигурациях. Катушка индуктивности резонансного контура была соосно размещена внутри катушки соленоида постоянного магнитного поля. Образец размещался внутри катушки индуктивности и мог быть ориентирован своим большим размером как вдоль оси катушки, так и поперек. Таким образом, можно было проводить измерения в конфигурации $\mathbf{H} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{I} \perp \mathbf{b}$, $\mathbf{I} \perp \mathbf{H}$ (случай $R_{S\perp}$, ρ_{\perp}) и в конфигурации $\mathbf{H} \perp \mathbf{b}$, $\mathbf{I} \parallel \mathbf{b}$, $\mathbf{I} \perp \mathbf{H}$ (случай $R_{S\parallel}$ и ρ_{\parallel}). Большинство измерений выполнено в наиболее удобной с экспериментальной точки зрения конфигурации \perp .

В качестве сравнительной характеристики отрицательного магнитосопротивления в данной работе берется относительная величина

$$[R_S^2(H) - R_S^2(0)]/R_S^2(0) = \Delta\rho/\rho(0),$$

где $R_S(0)$ — поверхностное электросопротивление в отсутствие магнитного поля, а $R_S(H)$ — поверхностное электросопротивление в отличном от нуля магнитном поле, которое изменялось в пределах 0–400 Э.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследования температурных зависимостей $R_S(T)$ монокристалла $UF_{e_4}Al_8$ в интервале температур 300–4,2 К выявили ряд особенностей. Аномальное поведение $R_S(T)$ в области температур 70–4,2 К полностью совпало с результатами работы [10]. В данном интервале температур $R_S(T)$ не зависело от магнитного поля. В интервале температур 160–100 К обнаружен не наблюдавшийся ранее аномальный

пик $R_S(T)$, подавляемый магнитным полем (снижение электросопротивления в магнитном поле), обсуждению которого и посвящена настоящая работа.

На рис. 1 представлен типичный пик $R_S^2(T)$, наблюдаемый в интервале температур 160–100 К и измеренный в конфигурации \perp на двух частотах: 40 и 70 МГц. Видно, что в этом диапазоне частот относительная величина особенности $R_S^2(T)$ не зависит от частоты. Аномальное возрастание $R_S^2(T)$ начинается при $T = 160$ К, следует логарифмическому закону, достигает максимума при $T = 135$ К и от 130 до 100 К заканчивается спадом по степенному закону $T^{2,5}$.

На рис. 2 представлены температурные зависимости $R_S^2(T) \sim \rho(T)$, измеренные на частоте 70 МГц в двух конфигурациях: \perp и \parallel . Кривые 1' и 2' сняты в постоянном магнитном поле 50 Э. Видно, что в отсутствие внешнего магнитного поля в обоих случаях аномальный рост сопротивления начинается при $T = 160$ К и происходит по логарифмическому закону. Максимум достигается при $T = 135$ К. При дальнейшем снижении температуры спад сопротивления происходит по степенному закону $T^{2,5}$. Слабое магнитное поле 50 Э подавляет особенность $R_S^2(T) \sim \rho(T)$, но не влияет на температуру начала роста сопротивления. Характерно, что при этом рост сопротивления не логарифмический, хотя ниспадающая часть зависимости $R_S^2(T)$ по-прежнему подчиняется закону $T^{2,5}$. Значения $R_S^2 \sim \rho$, измеренные в различных конфигурациях, отличаются (анизотропия сопротивлений), однако значения ОМ в обеих ситуациях практически одинаковы и достигают наибольших значений при $T = 135$ К: –12,1% для конфигурации \perp и –11,7% для случая \parallel .

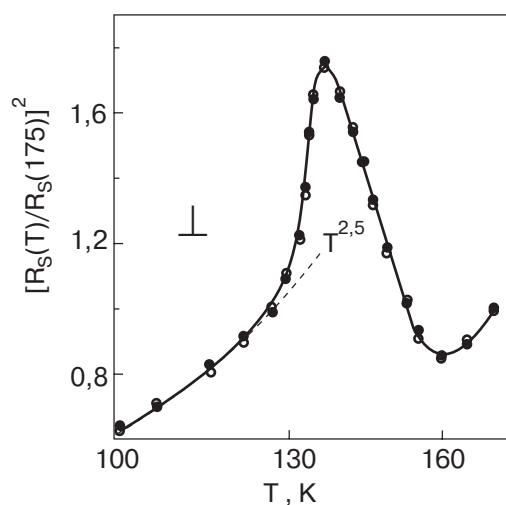


Рис. 1. Температурные зависимости $[R_S(T)/R_S(175)]^2$ монокристалла $UF_{e_4}Al_8$, измеренные в конфигурации \perp на частотах 40 (●) и 70 (○) МГц.

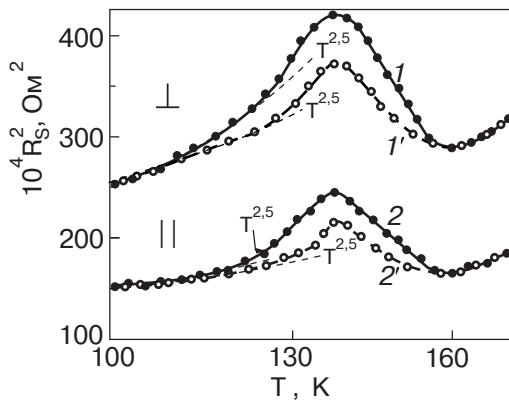


Рис. 2. Температурные зависимости $R_S^2(T)$ монокристалла UFe_4Al_8 , измеренные на частоте 70 МГц в двух конфигурациях: \perp (кривые 1 и 1') и \parallel (2 и 2'). Кривые 1 и 2 сняты в отсутствие магнитного поля, 1' и 2' — в магнитном поле 50 Э.

На рис. 3 представлены зависимости $R_S^2(T)$ на частоте 40 МГц в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле 400 Э. Включение магнитного поля величиной 400 Э приводит к заметному снижению электросопротивления ($\approx -24,5\%$ при $T = 135$ К) и сдвигу температуры минимума в более низкотемпературную область ($T = 150$ К). Температура максимума остается равной 135 К, как и в случае $H = 0$. Ниже точки минимума электросопротивление растет по отличному от логарифмического закону. В интервале 120–100 К магнитное поле не нарушает зависимость $R_S^2(T) \sim T^{2,5}$.

Магнитополевые зависимости значений $\Delta\rho/\rho(0)$ при разных температурах в области существования ОМ представлены на рис. 4. Хорошо видно, что кривые, измеренные при температурах 155, 150 и 145 К, имеют колоколообразную форму, а измеренные при 140, 135 и 130 К — ступенчатую. Максимальное

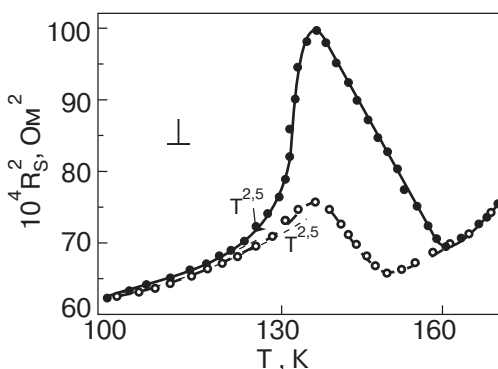


Рис. 3. Температурные зависимости $R_S^2(T)$ монокристалла UFe_4Al_8 , измеренные в конфигурации \perp на частоте 40 МГц в отсутствие магнитного поля (●) и в магнитном поле $H = 400$ Э (○).

снижение электросопротивления при 400 Э наблюдается в точке максимума $T = 135$ К и достигает величины $-24,5\%$. При этом снижение электросопротивления начинается в очень слабых магнитных полях ниже 1 Э. Таким образом, ступенчатый вид зависимостей $\Delta\rho/\rho(0)$ наблюдается при температурах вблизи максимума $R_S(T)$. Это может указывать на то, что при этих температурах в образце возможно фазовое расслоение. Причем такое расслоение возникает довольно резко, так как разница всего в 5 К (от 145 до 140 К) приводит к заметному изменению формы кривых $\Delta\rho/\rho(0)$.

Согласно литературным данным [4,11–13], в образце UFe_4Al_8 наблюдается переход в магнитоупорядоченное состояние (температуры перехода разных образцов существенно различаются и лежат в области 130–155 К [4,11–13]) с отличной от нуля спонтанной намагниченностью. Такое магнитное превращение сопровождается появлением магнитодоменной структуры. Наличие доменов может приводить к дополнительному рассеянию электронов проводимости на доменных границах или внутри доменных стенок, т.е. к росту электросопротивления. В нашем случае рост сопротивления наблюда-

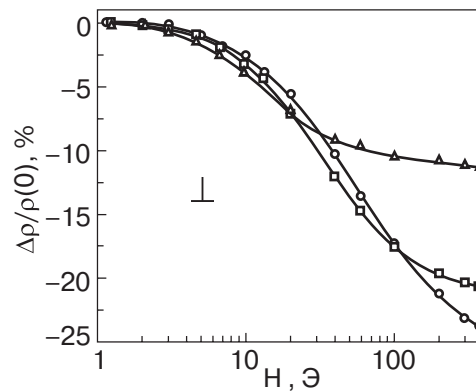
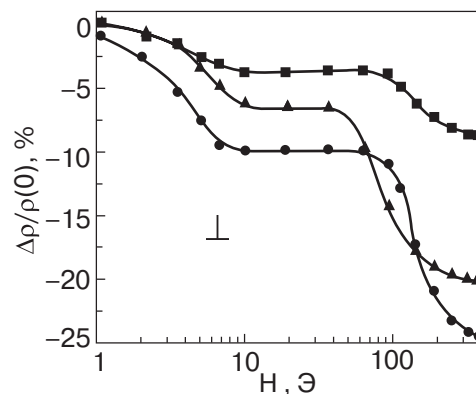


Рис. 4. Магнитополевые зависимости значений $\Delta\rho/\rho(0)$ монокристалла UFe_4Al_8 в интервале магнитных полей 1–400 Э, измеренные при температурах 130 (■), 135 (●), 140 (▲), 145 (○), 150 (□) и 155 (△) К.

ется в интервале температур 160–135 К. Спад электросопротивления ниже 135 К может быть связан с укрупнением доменной структуры и уменьшением количества доменных стенок. Включение слабого магнитного поля может приводить к росту объема доменов с ориентацией магнитных моментов вдоль поля за счет доменов с противоположной ориентацией и снижению электросопротивления. Такое объяснение аномального поведения электросопротивления оставляет открытыми вопросы, связанные с присутствием двух видов магнитополевых зависимостей (колоколообразных и ступенчатых), существованием узкой температурной области перехода (≤ 5 К) от одних зависимостей к другим и с наличием логарифмического роста электросопротивления, который часто связывают с эффектом Кондо. При некоторых допущениях механизм рассеяния электронов с переворотом спина возможен и в исследованном соединении.

Согласно результатам нейтронографических исследований [5], в UFe_4Al_8 может существовать некоторое количество атомов Fe (около нескольких процентов), занимающих $8j$ -позиции, которые в идеальном случае должны быть полностью заняты атомами Al [5]. Железо, находясь на этих позициях, может играть роль магнитных примесей, что делает возможным рассеяние на них носителей заряда, и тогда минимум электросопротивления и сменяющий его с понижением температуры логарифмический рост можно объяснить эффектом Кондо. Наличие максимума и снижение электросопротивления при дальнейшем понижении температуры можно объяснить переходом магнитной подсистемы атомов железа на $8j$ -позициях либо в магнитоупорядоченное состояние, либо в состояние кластерного спинового стекла. При этом ориентация спинов атомов железа, расположенных на $8j$ -позициях, фиксируется, а канал рассеяния электронов с переворотом спина подавляется. Включение магнитного поля также приводит к фиксации спинов, подавлению кондовского рассеяния электронов проводимости и появлению вследствие этого отрицательного магнитосопротивления. Возвращаясь к магнитополевым зависимостям, можно отметить, что ступенчатые магнитополевые зависимости как раз и наблюдаются в переходной области температур между уже существующим эффектом Кондо и появляющимся при более низких температурах магнитоупорядоченным состоянием. Следует отметить, что для рассмотрения состояний на $8j$ -позициях в качестве примесных необходимы экспериментальные подтверждения существования большого различия во временах магнитной релаксации между магнитными моментами атомов железа на основных $8f$ - и нетипич-

ных $8j$ -позициях. В настоящий момент такие данные отсутствуют.

Заключение

В заключение отметим, что впервые в монокристалле UFe_4Al_8 в интервале температур 160–100 К обнаружен аномальный пик поверхностного и удельного электросопротивлений $R_S^2(T) \sim \rho$. Этот пик подавляется слабым постоянным магнитным полем. Рост сопротивления при понижении температуры ниже 160 К происходит по логарифмическому закону. Спад сопротивления при $T < 130$ К происходит по степенному закону $T^{2,5}$. Зависимости сопротивления от магнитного поля имеют плавный колоколообразный вид в области логарифмического роста сопротивления. Вблизи своего максимального значения и на спаде сопротивление снижается ступенчатым образом под воздействием магнитного поля. В настоящий момент какое-либо полное объяснение аномального поведения электросопротивления и появления отрицательного магнитосопротивления в малых магнитных полях (единицы и десятки эрстед) в UFe_4Al_8 в интервале температур 160–100 К все еще отсутствует. Для полного понимания механизмов, ответственных за аномальное поведение электрического транспорта в UFe_4Al_8 , требуется проведение дополнительных исследований в интервале температур 160–100 К с привлечением нейтронографии, мессбауэровской спектроскопии, ЯМР, микроскопии Керра, измерений рентгеновских L_{III} -спектров поглощения Fe.

Авторы выражают благодарность А.Г. Андерсу за ценные замечания, доброжелательное и полезное обсуждение.

1. А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Б.Я. Котур, Н.Н. Пренцлау, В. Суски, А.В. Терехов, Л.В. Шлык, *ФНТ* **27**, 1308 (2001).
2. V.M. Dmitriev, L.F. Rybaltchenko, R. Wyder, A.G.M. Jansen, N.N. Prentslau, and W. Suski, *Fiz. Nizk. Temp.* **28**, 374 (2002).
3. В.М. Дмитриев, Н.Н. Пренцлау, И.В. Золочевский, Л.А. Ищенко, Б.Я. Котур, В. Суски, Е. Талик, А.В. Терехов, *ФНТ* **29**, 1189 (2003).
4. J. Gal, I. Yaar, D. Regev, S. Fredo, G. Shani, E. Arbaboff, W. Potzel, K. Aggarwal, J.A. Pereda, G.M. Kalvius, F.J. Litterst, W. Schäfer, and G. Will, *Phys. Rev.* **B42**, 8507 (1990).
5. K. Rečko, M. Biernacka, L. Dobrzyński, K. Perzyńska, D. Satula, K. Szymański, J. Waliszewski, W. Suski, K. Wochowski, G. André, and F. Bourée, *J. Phys.: Condens. Matter* **9**, 9541 (1997).
6. G. Bonfait, A.P. Goncalves, J.C. Spirlet, and M. Almeida, *Physica* **B211**, 139 (1995).

7. G. Bonfait, M. Godinho, P. Estrela, A.P. Gonçalves, M. Almeida, and J.C. Spirlet, *Phys. Rev.* **B53**, R480 (1996).
8. В.М. Дмитриев, М.Н. Офицеров, Н.Н. Пренцлау, *Радиотехника* **97**, 91 (1993).
9. А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Л.А. Ищенко, Н.Н. Пренцлау, Л.В. Шлык, *ФНТ* **25**, 15 (1999).
10. В.М. Дмитриев, Н.Н. Пренцлау, А.М. Гуревич, Л.А. Ищенко, В. Суски, А.В. Терехов, Р. Троч, *ФНТ* **30**, 644 (2004).
11. J.A. Paixão, S. Langridge, S.Aa. Sørensen, B. Lebech, A.P. Gonçalves, G.H. Lander, P.J. Brown, P. Burllet, and E. Talik, *Physica* **B234–236**, 614 (1997).
12. J.A. Paixão, B. Lebech, A.P. Gonçalves, P.J. Brown, G.H. Lander, P. Burllet, A. Delapalme, and J.C. Spirlet, *Phys. Rev.* **B55**, 14370 (1997).
13. M. Kuznietz, A.P. Gonçalves, J.C. Waerenborgh, M. Almeida, C. Cardoso, M.M. Cruz, and M. Godinho, *Phys. Rev.* **B60**, 9494 (1999).

Detection of an anomalous electrical resistance peak in UFe_4Al_8 single crystal at 160–100 K and negative magnetoresistance in fields up to 400 Oe

V.M. Dmitriev, A.V. Terekhov, and W. Suski

It has been found experimentally that the UFe_4Al_8 single crystal has a peak-like electrical resistance anomaly at temperatures between 160 and 100 K, which is suppressed by weak magnetic field (negative magnetoresistance). The greatest decrease in the electrical resistivity at $H = 400$ Oe is observed at the anomaly maximum and amounts to as much as $\Delta\rho/\rho(0) \approx -25\%$. The available mechanisms of the anomalous behavior of electric transport in a temperature interval of 160–100 K has been considered.

Keywords: electrical resistance, single crystal UFe_4Al_8 , negative magnetoresistance.