

Краткие сообщения

Анизотропия электросопротивления $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$

В.Н. Светлов¹, А.В. Терехов^{1,2}, В.Б. Степанов¹, А.Л. Соловьев^{1,2}, Е.В. Христенко¹,
О.М. Ивасишин³, А.Д. Шевченко³, З.Д. Ковалюк⁴

¹Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины

пр. Ленина 47, г. Харьков, 61103, Украина

E-mail: terekhov@ilt.kharkov.ua; solovjov@ilt.kharkov.ua

²International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures

95 Gajowicka Str., Wroclaw 53-421, Poland

³Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины

пр. Вернадского, 36, г. Киев, 03142, Украина

⁴Институт Проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины

Черновицкое отделение, ул. И. Вильде, 5, г. Черновцы, 58001, Украина

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2014 г., после переработки 12 января 2015 г.,
опубликована онлайн 23 февраля 2015 г.

Впервые исследован продольный и поперечный магниторезистивный эффект в текстурированном поликристалле $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$. Зависимости $\rho(T)$ измерены в широком интервале температур (4,2–300 К) как без поля, так и в постоянном магнитном поле 6 Тл. Обнаружены положительное магнитосопротивление, а также кристаллографическая и магнитополовая анизотропии электросопротивления.

Вперше досліджено подовжній та поперечний магніторезистивний ефект в текстурованому полікристалі $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$. Залежності $\rho(T)$ виміряно в широкому інтервалі температур (4,2–300 К) як без поля, так і в постійному магнітному полі 6 Тл. Виявлено позитивний магнітоопір, а також кристаллографічну та магнітопольову анізотропію електроопору.

PACS: **75.30.-m** Специфические свойства магнитоупорядоченных материалов;

75.47.Gk Колоссальное магнитосопротивление;

75.47.-m Магнитотранспортные явления; материалы для магнитотранспорта.

Ключевые слова: анизотропия электросопротивления, магниторезистивный эффект, положительное магнитосопротивление.

Введение

Исследования магнитных свойств материалов на основе висмута и марганца показали, что эти соединения при комнатных температурах обладают высокими значениями коэрцитивной силы, которая растет с температурой. Этот факт, а также доступность базовых элементов, входящих в состав этих материалов, делает их перспективными в качестве постоянных магнитов для высокотемпературных приложений [1,2]. Вместе с тем изучению поведения электрического транспорта в магнитных полях для данных материалов, которое может быть не менее интересным, не уделялось доста-

точного внимания. В настоящей работе сделана попытка частично заполнить этот пробел. Проведены исследования удельного сопротивления текстурированного поликристалла $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ в широком интервале температур (4,2–300 К) как без поля, так и в постоянном магнитном поле 6 Тл, при параллельной и перпендикулярной ориентации поля относительно протекающего через образец транспортного тока.

Образцы и методика эксперимента

Исходными компонентами для получения кристаллов были висмут и марганец чистоты > 99,999%. Об-

разцы выращивали по методу Бриджмена. Контейнерами для синтеза и выращивания материала служили графитизированные кварцевые ампулы, вакуумированные до остаточного давления $\sim 10^{-2}$ Па. Электронно-микроскопические исследования показали, что в образцах присутствовало и небольшое количество железа, точная формула соединения $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$.

Рентгеноструктурный анализ кристаллов $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 в Cu-K_α -излучении ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Для $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ $a = 4,5474 \text{ \AA}$, $c = 11,8539 \text{ \AA}$, а для Bi $a = 4,54 \text{ \AA}$, $c = 11,82 \text{ \AA}$. Сопоставление интенсивностей рентгеновских пиков позволяет утверждать, что образец является однофазным текстурированным поликристаллом (т.е. имеет преимущественную ориентацию зерен кристаллических решеток, которая приводит к появлению анизотропии физических свойств и приближает его по свойствам к монокристаллу). Появление текстуры в нашем случае, вероятно, связано со способом изготовления кристалла. Исходный поликристалл имел форму цилиндра, из которого вырезали прямоугольные образцы с характерными размерами порядка $7 \times 2 \times 2$ мм. С целью проверки кристаллографической анизотропии электросопротивления образцы вырезали либо параллельно основанию цилиндра (№1), либо вдоль его образующей (№2).

Резистивные и магниторезистивные измерения выполнялись с использованием стандартной четырехзондовой схемы на автоматизированном комплексе Quantum Design PPMS-9T. Токовые и потенциальные контакты создавали с помощью серебряной пасты. Сопротивление контактов не превышало 1 Ом. Удельное сопротивление $\rho(T)$ измерялось на переменном токе ($I = 30 \text{ мА}$, $f = 17 \text{ Гц}$), направленном вдоль большего размера образца. Измерения проводились как без поля, так и в продольном и поперечном по отношению к току магнитном поле 6 Тл в интервале температур 4,2–300 К. Постоянное магнитное поле создавалось сверхпроводящим соленоидом.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ для образца №1 (кривая 1) и образца №2 (кривая 2) в отсутствие магнитного поля. Оба образца демонстрируют похожую зависимость $\rho(T)$: при понижении температуры, начиная с 300 К, электросопротивление линейно снижается примерно до $T_d \approx 180 \text{ К}$ для образца №1 и $T_d \approx 160 \text{ К}$ для образца №2, а затем отклоняется от линейности, демонстрируя другой квазилинейный участок до температур порядка 50 К и затем незначительный изгиб с отрицательным радиусом кривизны. Безусловно, эти характерные температуры связаны с изменением механизма рассеяния носителей заряда, который требует

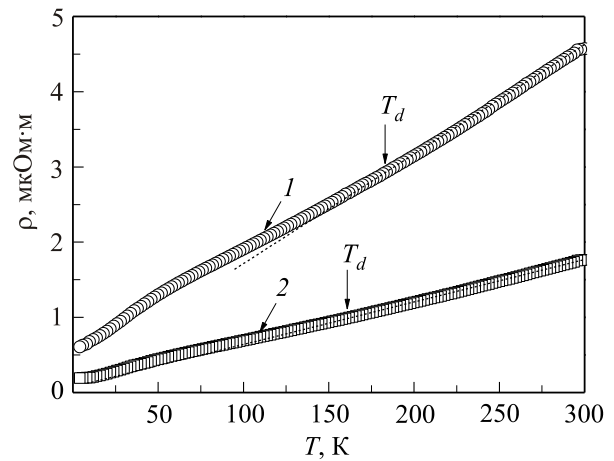


Рис. 1. Зависимости $\rho(T)$ для образцов №1 (1) и №2 (2). Пунктир — экстраполяция линейной зависимости в область низких температур.

дальнейшего исследования. При этом величина удельного сопротивления для образца №1 больше в 2,5 раза при 300 К и в 3,2 раза при 4,2 К. Обнаруженная анизотропия электросопротивления при измерении в отсутствие магнитного поля может объясняться наличием в поликристаллическом образце текстуры (преимущественной ориентации кристаллитов вдоль определенных кристаллографических направлений). По аналогии с монокристаллами образцы, вырезанные вдоль разных кристаллографических направлений, могут иметь существенную разницу в величине удельного сопротивления.

На рис. 2 представлена температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ обоих исследуемых образцов в магнитном поле 6 Тл. Кривые 1 и 2 отвечают образцам №1 и №2 в магнитном поле, перпендикулярном транспортному току ($H \perp I$). Соответственно кривые 3 и 4 — в поле, параллельном транспортному току

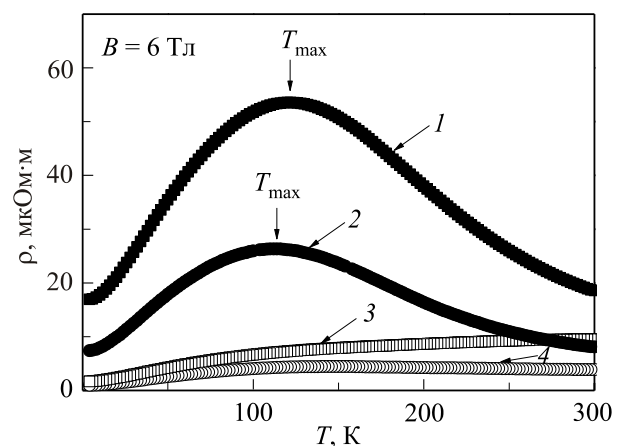


Рис. 2. Зависимости $\rho(T)$ в поле 6 Тл для образцов №1 (кривые 1, 3) и №2 (кривые 2, 4) в конфигурации $H \perp I$ (кривые 1, 2) и $H \parallel I$ (кривые 3, 4).

($H \parallel I$). В магнитном поле электросопротивление возрастает по величине во всей области температур, т.е. имеет место положительный магниторезистивный эффект (МРЭ). Однако в конфигурации $H \perp I$ (кривые 1 и 2) электросопротивление заметно больше, чем при $H \parallel I$ (кривые 3 и 4). Кроме того, на рисунке видно, что для конфигурации $H \perp I$ (кривые 1 и 2) вид температурных зависимостей существенно отличается от кривых, измеренных для случая $H \parallel I$ (кривые 3 и 4). При $H \perp I$ на $\rho(T)$ появляются ярко выраженные максимумы с $T_{\max} \approx 122$ К и $T_{\max} \approx 114$ К для образцов №1 и №2. В случае $H \parallel I$ этих максимумов практически не видно. Если сравнивать величины электросопротивления при $H \perp I$ и $H \parallel I$ то получается, что в поле 6 Тл в конфигурации $H \perp I$ удельное сопротивление образца №1 при 300 К в 2 раза, а при 4,2 К в 10 раз больше, чем при $H \parallel I$. Соответственно, и для образца №2 удельное сопротивление при 300 К в 2 раза, а при 4,2 К в 7,7 раз при $H \perp I$ больше, чем при $H \parallel I$. Кроме того, как и в отсутствие поля, омические потери в образце №1 существенно больше, чем в №2. Так удельное сопротивление образца №1 в поле 6 Тл и при 300 К, и при 4,2 К примерно в 2 раза больше, чем в образце №2 для обеих конфигураций поля. Таким образом, в магнитном поле анизотропия удельного сопротивления возрастает.

Описанное выше поведение электросопротивления в магнитном поле может быть обусловлено различными причинами. Одна из них — наличие в образце превращений в магнитной подсистеме марганца. Известно, что наличие марганца в различных соединениях может приводить к появлению ферромагнитных или антиферромагнитных переходов. Как известно переход от антиферро- или парамагнитного упорядочения к ферромагнитному может сопровождаться сильными изменениями в проводимости. К этому приводит так называемое спин-зависимое рассеяние электронов проводимости [3,4] при котором акты рассеяния более вероятны в случае, когда направление спина электрона проводимости и магнитного момента совпадают. Электроны, участвующие в процессе переноса, имеют разное направление спина. Поэтому спин-зависимое рассеяние сильнее в антиферромагнитном и парамагнитном состоянии и уменьшается в ферромагнитном [3,4]. Вне всякого сомнения, спин-зависимое рассеяние зависит от направления, в котором магнитное поле прикладывается к образцу. Так, имеются направления магнитного поля, вдоль которых изменения в магнитной подсистеме происходят быстрее и в более слабых полях, чем вдоль других направлений. Поскольку наш образец может находиться в магнитоупорядоченном состоянии и в отсутствие магнитного поля, описанные выше эффекты, могут вносить вклад в механизмы рассеяния и анизотропию электросопротивления и тогда, когда измерения проводятся без поля (анизотропное магнетосопротивление [5]).

Для подтверждения вышеприведенного объяснения и установления механизмов рассеяния носителей заряда в ближайшее время запланировано исследование температурной и магнитопольевой зависимостей намагниченности и термоэдс, а также магнитопольевых зависимостей $\rho(T)$ при разных температурах в $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$. Следует подчеркнуть, что и сам по себе висмут также обладает положительным магнетосопротивлением [6], что еще более усложняет ситуацию. Отметим, что наличие небольшого количества атомов железа в образце может оказывать влияние на характер магнитных превращений. Для того чтобы узнать каким образом влияет содержание этого элемента на электропроводность соединения, в дальнейшем мы планируем получить и исследовать материал $\text{Bi}_{94}\text{Mn}_6$, в котором железо будет отсутствовать.

Заключение

Отметим основные результаты работы.

1. Выявлено наличие анизотропии удельного электросопротивления в $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ в отсутствие магнитного поля (величина ρ для образца №1 при 300 К в 2,6 раза, а при 4,2 К в 3,2 раза больше, чем для образца №2), что можно объяснить выраженной текстурой поликристалла, а также наличием спин-зависимого рассеяния в $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ за счет вклада магнитной подсистемы.

2. Обнаружено наличие в $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ положительного магнетосопротивления.

3. Показано, что при включении магнитного поля величина магниторезистивного эффекта в $\text{Bi}_{93,99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0,01}$ заметно больше при измерении в конфигурации $H \perp I$, чем в $H \parallel I$, что, скорее всего, связано с различным вкладом спин-зависимого рассеяния при измерении вдоль разных направлений магнитного поля относительно транспортного тока и кристаллографических направлений.

4. Обнаружено, что в конфигурации $H \perp I$ на $\rho(T)$ обоих образцов наблюдаются четко выраженные максимумы, которые гораздо менее выражены при измерении $\rho(T)$ в конфигурации $H \parallel I$, что может быть связано с перестройкой магнитной подсистемы в этом материале.

1. Liu Yong-Sheng, Zhang Jin-Cang, Ren Zhong-Ming, Gu Min-An, Yang Jing-Jing, Cao Shi-Xum, and Yang Zheng-Long, *Chin. Phys. Lett.* **27**, 097502-1 (2010).
2. N.V. Rama Rao, A.M. Gabay, and G.C. Hadjipanayis, *J. Phys.* **46**, 062001 (2013).
3. Э.Л. Нараев, *УФН* **166**, 833 (1996).
4. M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
5. А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов. *Письма ЖТФ* **36**, 46 (2010).
6. P. Kapitza, *Proc. Roy. Soc. A* **119**, 401 (1928).

Anisotropy of resistivity in $\text{Bi}_{93.99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0.01}$

V.N. Svetlov, A.V. Terekhov, V.B. Stepanov,
A.L. Solovjov, E.V. Khristenko, O.M. Ivasishin,
A.D. Shevchenko, and Z.D. Kovalyuk

For the first time the longitudinal and transverse magneto-resistive effect in textured polycrystal $\text{Bi}_{93.99}\text{Mn}_6\text{Fe}_{0.01}$ was studied. $\rho(T)$ dependencies were measured in a wide temperature range from 4.2 K up to 300 K both without magnetic field and with the field of 6 T on. From the measurements, positive

magnetoresistance as well as both crystallographic and magnetic anisotropy of resistivity were revealed.

PACS: **75.30.-m** Intrinsic properties of magnetically ordered materials;
75.47.Gk Colossal magnetoresistance;
75.47.-m Magnetotransport phenomena; materials for magnetotransport.

Keywords: anisotropy of resistivity, magnetoresistive effect, positive magnetoresistance.