

УДК 537.311.31

М.А. Анисимов¹, А.В. Богач², В.В. Глушков², С.В. Демидов², Н.А. Самарин²,
В.Б. Филипов³, Н.Ю. Штцвалова³, Н.Е. Случанко²

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

³ Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича ИАНУ

Новая магнитная фаза в гексабориде празеодима

На высококачественных образцах гексаборида празеодима (PrB_6) выполнены исследования угловых и полевых зависимостей поперечного магнитосопротивления в интервале температур $2 \text{ К} < T < 8 \text{ К}$ в магнитном поле до 80 кЭ . Анализ полученных данных $\Delta\rho(H)/\rho$ вдоль направления $H \parallel \langle 110 \rangle$ позволяет обнаружить новую магнитную фазу в антиферромагнитном (АФМ) состоянии PrB_6 . При этом новая магнитная фаза наблюдается в узком диапазоне углов вблизи $H \parallel \langle 110 \rangle$. Полученные данные снимают существовавшие ранее противоречия в представлении магнитной фазовой диаграммы PrB_6 .

Ключевые слова: гексабориды, магнитосопротивление, спиновая поляризация, феррон.

I. Введение

В последнее время гексаборид празеодима (PrB_6) вызывает значительный интерес у исследователей. Располагаясь в ряду RB_6 между гексаборидом церия (CeB_6) с промежуточной фазой в виде волны спиновой плотности [1] и гексаборидом неодима (NdB_6) с антиферромагнитной соразмерной (АФМ С) фазой ($H \leq 150 \text{ кЭ}$) [2], PrB_6 демонстрирует сложный вид магнитной H - T фазовой диаграммы с двумя фазовыми переходами: в АФМ несоразмерную (НС) ($T < T_N \sim 7 \text{ К}$) и АФМ соразмерную фазы ($T < T_M \sim 4,2 \text{ К}$) [3, 4] (рис. 1). При этом в гексабориде празеодима в АФМ С фазе по данным [3] наблюдается также переход в магнитном поле $H > H_C \sim 20 \text{ кЭ}$ для направления $H \parallel \langle 110 \rangle$ к простой (single-k) коллинеарной магнитной структуре (C_H). Значительная анизотропия H - T фазовой диаграммы в PrB_6 отмечена авторами [4], в работе которых только для направления магнитного поля $H \parallel \langle 111 \rangle$ установлен положительный наклон границы $T_M(H)$ и переход в несоразмерную фазу НС_2 в сильных полях. В то же время большой шаг по температуре и магнитному полю при построении H - T фазовой диаграммы, допущенный в работах [3, 4], существенно затрудняет идентификацию природы магнитных фаз в этом соединении.

С этой целью в работе выполнены комплексные измерения угловых и полевых зависимостей магнитосопротивления $\Delta\rho(H, \varphi, T_0)/\rho$ гексаборида празеодима в магнитном поле до 80 кЭ и в области температур 2 – 8 К .

II. Методика эксперимента

Исследуемые в работе монокристаллы гексаборида празеодима PrB_6 высокого качества

($T_N \sim 6,7 \text{ К}$, $T_M \sim 4,6 \text{ К}$) выращены в институте проблем материаловедения ИАНУ методом вертикального бестигельного индукционного зонного плавления с двукратным переплавом в атмосфере аргона [5]. Контроль качества образцов осуществлялся при помощи рентгеноструктурного и микронзондового анализов. Подготовка образцов к измерениям угловых зависимостей сопротивления включала электроэрозионную резку и последующую шлифовку. Особое внимание уделялось удалению поверхностного слоя, нарушенного в результате электроэрозионной и механической обработки, для чего после шлифовки образцов проводилось химическое травление поверхности в водном растворе азотной кислоты.

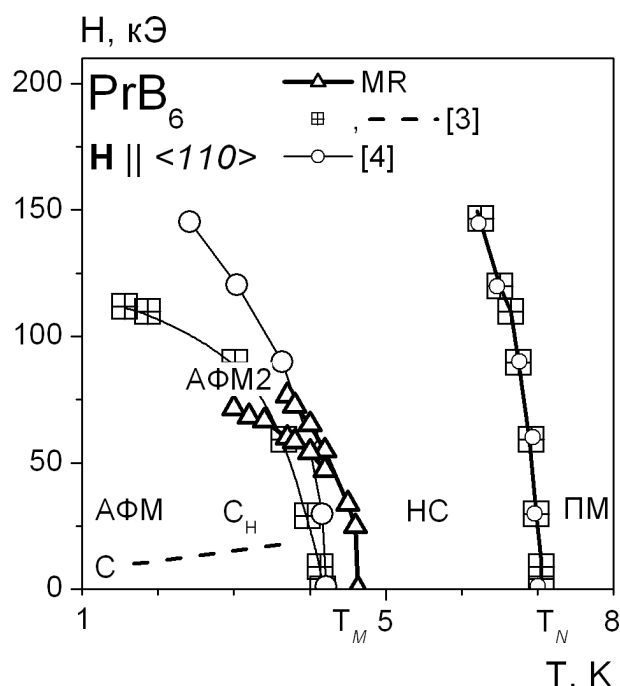


Рис. 1. Магнитная H - T фазовая диаграмма PrB_6 для направления поля $H \parallel \langle 110 \rangle$. С (C_H) — соразмерная, НС — несоразмерная антиферромагнитные фазы

Измерения угловых зависимостей сопротивления проводились методом вращения с пошаговой фиксацией положения образца в постоянном магнитном поле [6]. Высокая точность стабилизации температуры ($\Delta T \sim 0,01$ К– $0,02$ К) и магнитного поля (около 10^{-5} при 80 кЭ), необходимая для прецизионных исследований характеристик зарядового транспорта, достигалась благодаря использованию оригинального температурного контроллера на цифровых сигнальных процессорах (CRYOTEL, ТС 1,5/300) в схеме с эталонным термометром модели CERNOX-1050 и источника тока сверхпроводящего магнита (CRYOTEL,

SMPS-120). Измерения малых напряжений с потенциальных контактов к образцу осуществлялись благодаря использованию двухканальных нановольтметров Keithley (США) модели 2182. Для уменьшения влияния паразитных термоэдс и других наводок измерения проводились на постоянном токе в режиме коммутации измерительного тока через образец. Сбор и обработка экспериментальных данных, а также управление параметрами и режимами работы устройств и блоков осуществлялись системой регистрации и управления на базе микропроцессорного устройства, связанного с персональным компьютером.

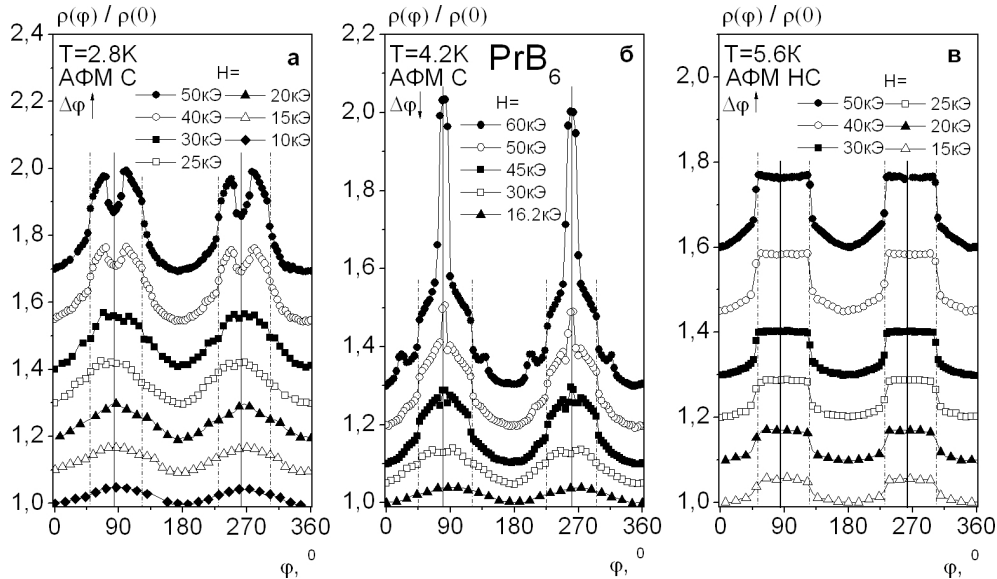


Рис. 2. Угловые зависимости нормированного сопротивления $\rho(\varphi, H_0, T_0)/\rho(0, H_0, T_0)$ PrB_6 для (а, б) АФМ С фазы, (в) АФМ НС фазы. Вертикальными линиями обозначены направления магнитного поля: $H \parallel \langle 110 \rangle$ (сплошная линия) и $H \parallel \langle 111 \rangle$ (пунктирная линия)

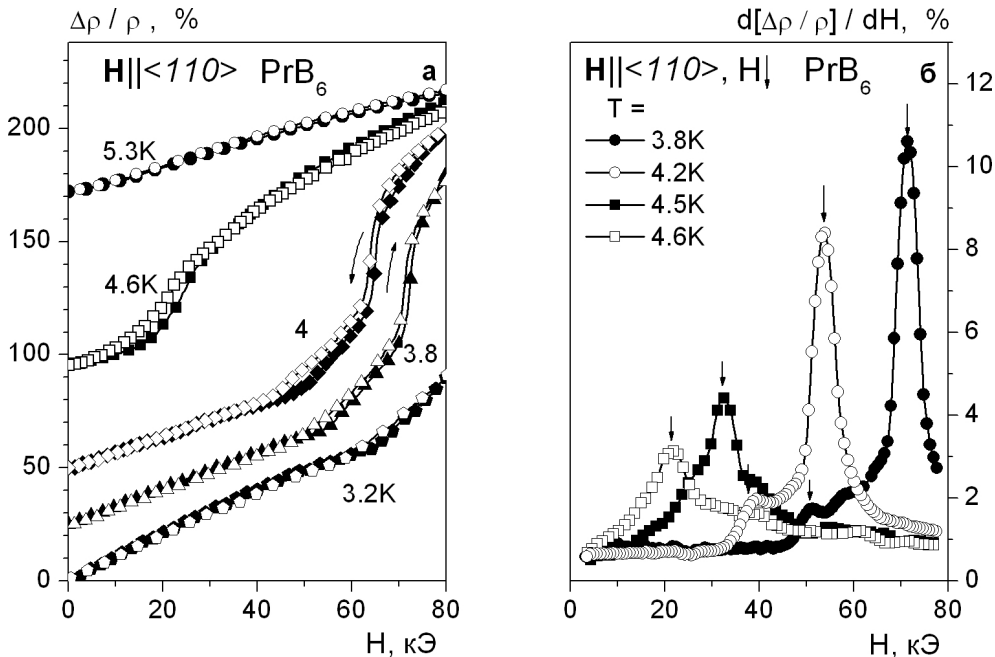


Рис. 3. Полевые зависимости (а) магнитосопротивления и (б) производной магнитосопротивления по полю в АФМ фазе PrB_6 для направления магнитного поля вдоль $H \parallel \langle 110 \rangle$

III. Результаты и дискуссия

На рис. 2 представлены угловые зависимости нормированного сопротивления $\rho(\varphi, H_0, T_0)/\rho(0, H_0, T_0)$ для температур, соответствующих 2а, 2б АФМ соразмерной и 2в АФМ несооразмерной фазе PrB_6 в магнитном поле до 60 кЭ. Как видно из рис. 2, направления $H \parallel < 110 >$ и $H \parallel < 111 >$ оказываются выделенными для всех представленных температур. В частности, для температуры $T = 2,8$ К наблюдается резкий минимум в магнитных полях $H \geq 35$ кЭ вдоль направления $H \parallel < 110 >$. Окрестность перехода в АФМ НС фазу при $T = 4,2$ К характеризуется крайне необычным поведением углового сопротивления, рис. 2б. Так, в сильных магнитных полях $H \geq 40$ кЭ вместо заметного минимума, характерного для низких температур, на кривых $\rho(\varphi, H_0, T_0)/\rho(0, H_0, T_0)$ наблюдается резкий положительный пик, соответствующий узкому интервалу углов вблизи ориентации магнитного поля $H \parallel < 110 >$. В АФМ НС фазе при $T > T_M$ форма кривых $\rho(\varphi, H_0, T_0)/\rho(0, H_0, T_0)$ близка к меандру при $H \leq 20$ кЭ. С ростом поля в окрестности $H \parallel < 110 >$ образуется минимум малой амплитуды (рис. 2в). Данная работа посвящена исследованию поперечного магнитосопротивления вдоль ориентации $H \parallel < 110 >$.

Представленные на рис. 3а полевые зависимости $\Delta\rho(H)/\rho$ демонстрируют значительное усиление амплитуды магнитосопротивления до значений $\Delta\rho(H)/\rho \sim 160\%$ ниже $T_M \sim 4,6$ К, сопровождающееся появлением полевого гистерезиса. Переход в АФМ несооразмерную фазу ($T_M < T < T_N \sim 6,7$ К) приводит к значительному уменьшению амплитуды магнитосопротивления (рис. 3а) ($T = 5,3$ К) и подавлению особенностей на кривых $\Delta\rho(H)/\rho$ в сильном магнитном поле (рис. 4). Наиболее наглядно изменения магнитосопротивления с ростом H в интервале температур ниже T_M показаны на полевых зависимостях производной магнитосопротивления (рис. 3б). Кривые $d[\Delta\rho(H)/\rho]/dH$ демонстрируют наличие двух особенностей для каждой кривой, соответствующих, по-видимому, двум близко расположенным магнитным фазовым переходам, причём высокополевой особенности отвечает пик производной наибольшей амплитуды.

В результате анализ полевых зависимостей $d[\Delta\rho(H)/\rho]/dH$ позволяет установить вид H - T магнитной фазовой диаграммы с дополнительной фазой ниже $T_M(H)$, рис. 1. Представленные на рис. 1 данные из работ [3, 4], полученные при измерениях намагниченности [3] и продольного магнитосопротивления [4], демонстрируют наличие только одной ветви $T_M(H)$, зарегистрированной каждым из двух методов. В то же время существует заметное несоответствие поведения фазовой границы $T_M(H)$ из данных [3, 4], что, на наш

взгляд, следует связать с различием экспериментальных методик. Указанное различие используемых в [3, 4] экспериментальных методик вместе со значительной величиной интервала между точками по температуре [4] и по магнитному полю [3], по нашему мнению, не позволили авторам обнаружить дополнительную фазу ниже $T_M(H)$ (рис. 1) (MR).

По нашему предположению, учитывая характер гистерезиса, новая фаза имеет ферромагнитную природу. К аналогичному выводу приводят также результаты разделения вкладов в магнитосопротивление в рамках спин-поляронного подхода, полученные в [7]. Численный анализ магнитосопротивления, выполненный в работе [7], позволяет сделать вывод о формировании магнитных кластеров наноразмера, димеров, состоящих из локализованных магнитных моментов $4f$ -оболочки Pr^{3+} и спин-поляризованных областей $5d$ -состояний (ферронов) вдоль направления $H \parallel < 110 >$. Однако для окончательной проверки необходимы дальнейшие подробные измерения, включая полевые и угловые зависимости намагниченности в PrB_6 .

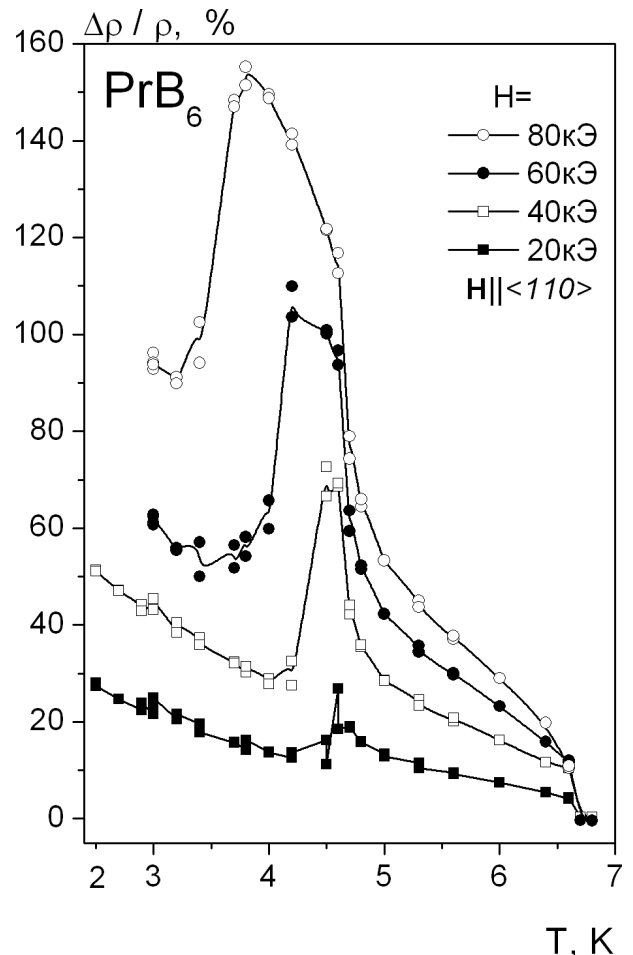


Рис. 4. Температурные зависимости амплитуды магнитосопротивления PrB_6 в постоянном магнитном поле

IV. Заключение

Представленные в работе подробные измерения анизотропии поперечного магнитосопротивления в гексабориде празеодима PrB_6 указывают на наличие новой магнитной фазы в окрестности температуры $T_M \sim 4,6$ К для ориентации магнитного поля $H \parallel \langle 110 \rangle$. Наличие гистерезиса на кривых $\Delta\rho(H)/\rho$ указывает на возможное фазовое расслоение в АФМ фазе с формированием магнитных $5d$ -ферронов и на их значительный вклад в образование новой фазы.

Литература

1. *Sluchanko N.E., Bogach A.V. [et al.]*. Enhancement of Band Magnetism and Features of the Magnetically Ordered State in the CeB_6 Compound with the Strong Electron Correlations // *JETP*. — 2007. — V. 104. — P. 120.
2. *Awaji S., Kobayashi N. [et al.]*. Metamagnetic transition in NdB_6 with a small magnetic anisotropy

in Low magnetic fields // *J. Phys. Soc. Jpn.* — 1999. — V. 68. — P. 2518.

3. *Sera M., Kobayashi S. [et al.]*. Crystal Structure and Magnetic Anisotropy in the Magnetic ordered Phases of PrB_6 // *J. Phys. Soc. Jpn.* — 2004. — V. 73. — P. 3422.

4. *Kobayashi S., Sera M., Hiroi M. [et al.]*. Anisotropic Magnetic Phase Diagram of PrB_6 Dominated by the O_{xy} Antiferro-Quadrupolar Interaction // *J. Phys. Soc. Jpn.* — 2001. — V. 70. — P. 1721.

5. *Щицевалова Н.Ю.* Магнитные, термические и транспортные свойства додекаборидов редкоземельных элементов: канд. дис. — 2001. — Вроцлав.

6. *Sluchanko N.E., Bogach A.V. [et al.]*. Genesis of the *anomalous Hall effect* in CeAl_2 // *JETP*. — 2004. — V. 98. — P. 793.

7. *Anisimov M.A., Bogach A.V., Glushkov V.V. [et al.]*. Magnetoresistance and Magnetic Ordering in Praseodymium and Neodymium Hexaborides // *JETP*. — 2009. — V. 109. — P. 815.

Поступила в редакцию 05.01.2010.