

УДК 537.311.31

М.А. Анисимов¹, А.В. Богач², В.В. Глушков², С.В. Демидов², Н.А. Самарин²,
Н.Ю. Шичевалова³, 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

Эффект Холла в NdB₆

В работе выполнено исследование эффекта Холла монокристаллических образцов гексаборида неодима (NdB₆) в области температур $2\text{ К} < T < 300\text{ К}$, в магнитных полях до 8 Тл. Установлено, что угловые зависимости холловского сопротивления $R_h(\varphi)$ описываются простым гармоническим законом $R_h(\varphi) = R_{h0} + R_{h1} \cos(\varphi)$ кроме антиферромагнитной (АФМ) фазы при $T < T_N \sim 7,7\text{ К}$, где необходим учёт вклада второй гармоники. В работе также было оценено значение холловской подвижности $\mu_H = R_H/\rho$. Оказалось, что $\mu_H(T)$ описывается степенным законом $\mu_H \sim T^{-\alpha}$, $\alpha \approx 0,6$. Сильное уменьшение значений холловской подвижности μ_H и показателя степени α в сравнении с результатами исследования эффекта Холла для немагнитного гексаборида лантана (LaB₆) указывает на значительное усиление рассеяния электронов проводимости на локализованных $4f$ -состояниях ионов Nd³⁺.

Ключевые слова: сильно коррелированные электронные системы, гексабориды, эффект Холла, холловская подвижность.

I. Введение

Среди боридов редкоземельных элементов особо выделяются соединения на основе каркасных структур из нанокластеров бора B₆ и B₁₂. В данной работе рассматривается класс гексаборидов редкоземельных элементов RB₆. В зависимости от заполнения $4f$ — и валентных $5d$ — и $6s$ -оболочек, а также степени их гибридизации соединения данного класса характеризуются диэлектрическим (SmB₆ [1]), полуметаллическим (EuB₆ [2]) или металлическим (RB₆, R = Pr, Nd [3]) типом проводимости с различным характером магнитного упорядочения. В частности, исследуемый в работе гексаборид неодима (NdB₆) переходит в АФМ состояние ниже температуры Нееля $T_N \sim 8\text{ К}$ [4]. Однако теоретические оценки спектра магнитных возбуждений в NdB₆ [5] указывают на наличие в этом соединении заметного ферроквадрупольного взаимодействия, которое, как правило, приводит к более сложному виду магнитной фазовой диаграммы. Для получения дополнительной информации о характеристиках носителей заряда в работе проведён цикл измерений транспортных свойств NdB₆ в интервале температур $2\text{ К} < T < 300\text{ К}$ в магнитных полях до 8 Тл.

II. Методика эксперимента

Исследуемые в работе монокристаллы гексаборида неодима выращены в институте проблем материаловедения ИАНУ методом вертикального бестигельного индукционного зонного плавления с многократным переплавом в атмосфере аргона. Контроль качества образцов осуществлялся при

помощи рентгеноструктурного и микроскопического анализа. Подготовка образцов к измерениям эффекта Холла включала электроэрозионную резку и последующую шлифовку. Особое внимание уделялось удалению поверхностного слоя, нарушенного в результате электроэрозионной и механической обработок, для чего после шлифовки образцов проводилось химическое травление поверхности в водном растворе азотной кислоты.

Измерения эффекта Холла осуществлялись на установке для гальваномагнитных измерений, аналогичной использовавшейся в [6]. Высокая точность стабилизации температуры ($\Delta T \sim 0,01\text{ К} - 0,02\text{ К}$) и магнитного поля (около 10^{-5} при 8 Тл), необходимая для прецизионных исследований характеристик зарядового транспорта, достигалась благодаря использованию оригинального температурного контроллера на цифровых сигнальных процессорах (CRYOTEL, TC 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 Keythley (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.

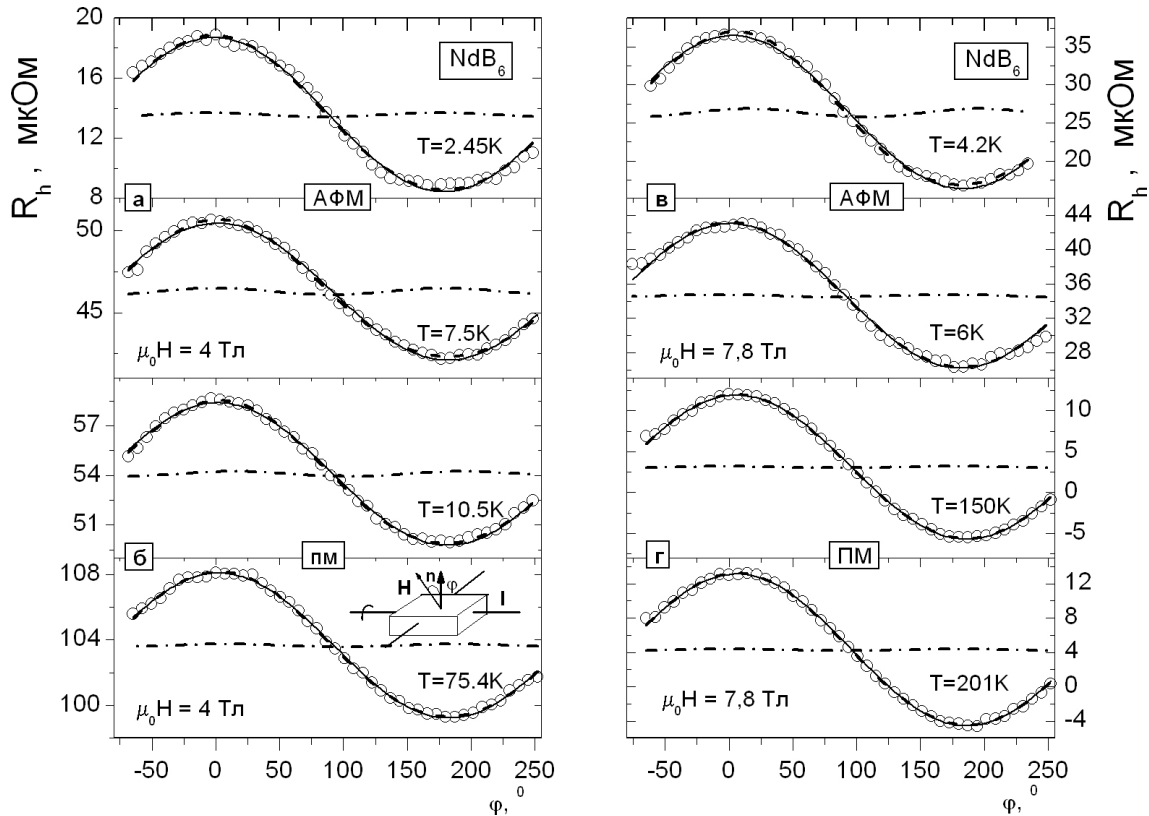


Рис. 1. Угловые зависимости холловского сопротивления $R_h(\varphi)$ в АФМ (а, в) и ПМ (б, г) фазах NdB_6 в магнитных полях $\mu_0 H = 4$ Тл (а, б) и $\mu_0 H = 7,8$ Тл (в, г) соответственно. Линии соответствуют вкладам первой гармоники (сплошная), второй гармоники (пунктирная с точкой) и суммы первой и второй гармоник (пунктирная). На нижней панели (б) приведена схема вращения образца в магнитном поле

III. Результаты и дискуссия

Полученные угловые зависимости холловского сопротивления $R_h(\varphi)$ для антиферромагнитной и парамагнитной фаз NdB_6 представлены на рис. 1а, 1б (в поле $\mu_0 H = 4$ Тл) и рис. 1в, 1г (в поле $\mu_0 H = 7,8$ Тл) соответственно. В отличие от гексаборида церия, для которого угловые зависимости $R_h(\varphi)$ анализировались с учётом вклада второй гармоники $R_h(\varphi) = R_{h0} + R_{h1} \cos(\varphi) + R_{h2} \cos 2(\varphi - \Delta\varphi)$ (где R_h — сопротивление холловских контактов, φ — угол между магнитным полем и нормалью к поверхности образца, $\Delta\varphi$ — разность фаз первой и второй гармоник) [7], в исследуемом NdB_6 $R_h(\varphi)$ описывается простым гармоническим законом $R_h(\varphi) = R_{h0} + R_{h1} \cos(\varphi)$ в области температур $2 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ в полях $\mu_0 H \leq 4$ Тл. Однако вклад второй гармоники $R_{h2} \cos 2(\varphi - \Delta\varphi)$ становится заметен в АФМ фазе в области магнитных полей $\mu_0 H \geq 4$ Тл (рис. 1в), что, тем не менее, не усложняет анализ коэффициента Холла в NdB_6 .

Согласно используемой экспериментальной схеме, R_H вычисляется из соотношения $R_H = R_{h1} \cdot d/H$, где d — толщина образца. На рис. 2а представлена температурная зависимость коэффициента Холла для гексаборида неодима. Оказалось, что коэффициент Холла в NdB_6 слабо за-

висит от температуры ($R_H \sim -3,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{К}$), обнаруживая небольшую особенность ($\sim 8\%$) в виде широкого минимума в окрестности температур $T \sim 40 \text{ К} - 70 \text{ К}$. При этом переход в АФМ фазу при температуре Нееля $T_N \sim 7,7 \text{ К}$ приводит к резкому уменьшению значений R_H до величины $R_H \sim -4,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{К}$ при $T = 2,5 \text{ К}$ (рис. 2а). Заметим, что в пределах экспериментальной погрешности найденные значения R_H согласуются с результатами исследования R_H [3], но оказываются более точными.

Также в работе оценена холловская подвижность $\mu_H = R_H/\rho$ (рис. 2б). Установлено, что μ_H растёт с понижением температуры, достигая максимального значения $\mu_H(\text{NdB}_6) \approx 700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. При этом в области промежуточных и высоких температур $50 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ зависимость $\mu_H(T)$ описывается степенным законом $T^{-\alpha}$ с показателем степени $\alpha(\text{NdB}_6) \approx 0,6$. Схожее поведение наблюдается и у немагнитного аналога NdB_6 — гексаборида лантана (LaB_6). Однако максимальное значение холловской подвижности оказывается в нём существенно больше $\mu_H(\text{LaB}_6) \approx 21\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Более того, в случае LaB_6 высокотемпературное поведение $\mu_H(T)$ также описывается степенным законом, но величина показателя степени $\alpha(\text{NdB}_6) \approx 1,5$ значительно превосходит значение, найденное для NdB_6 . Таким образом, сопоставляя максимальные значе-

ния холловской подвижности и показателей степени α для магнитного NdB_6 и немагнитного LaB_6 , а также основываясь на результатах анализа магнитосопротивления и данных по исследованию коэффициента теплопроводности и результатов ЯМР из работ [8, 9], можно сделать вывод о значительном усилении магнитного рассеяния электронов проводимости на $4f$ -центрах Nd^{3+} в области температур $T < 20$ К.

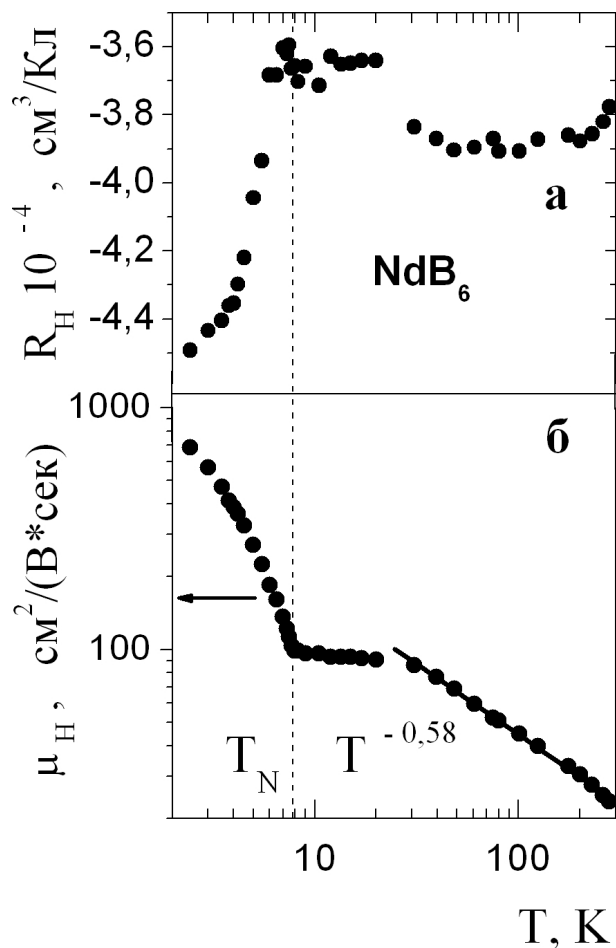


Рис. 2. Температурные зависимости (а) коэффициента Холла $R_H(T)$ и (б) холловской подвижности $\mu_H(T)$ в NdB_6 . На панели (б) сплошной линией представлен результат аппроксимации зависимостью вида $T^{-\alpha}$

IV. Заключение

Подводя итог, укажем, что в работе выполнены подробные измерения коэффициента Хол-

ла гексаборида неодима в области температур $2 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$, в полях до 8 Тл. Сопоставление найденных значений коэффициента Холла и холловской подвижности с данными для немагнитного гексаборида лантана (LaB_6) указывает на значительное усиление магнитного рассеяния электронов проводимости на $4f$ -центрах Nd^{3+} .

Литература

1. Flachbart K., Gloos K. [et al.]. Energy gap of the intermediate-valent SmB_6 studied by point-contact spectroscopy // Phys. Rev. B. — 2001. — V. 64. — P. 085104.
2. Wigger G.A., Monier R. [et al.]. Electronic transport in EuB_6 // Phys. Rev. B. — 2004. — V. 69. — P. 125118.
3. Onuki Y., Umezawa A. [et al.]. High-field magnetoresistance and de Haas–van Alphen effect in antiferromagnetic PrB_6 and NdB_6 // Phys. Rev. B. — 1989. — V. 40. — P. 11195.
4. Goodrich R.G., Harrison H. [et al.]. Fermi surface changes across the Neel phase boundary of NdB_6 // Phys. Rev. Lett. — 2006. — V. 97. — P. 146404.
5. Awaji S., Kobayashi N. [et al.]. Metamagnetic transition in NdB_6 with a small magnetic anisotropy in Low magnetic fields // Phys. Soc. Jpn. — 1999. — V. 68. — P. 2518.
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. 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 strong electron correlations // JETP. — 2007. — V. 104. — P. 120.
8. Sera M., Kobayashi S. [et al.]. Thermal conductivity of RB_6 ($R = \text{Ce, Pr, Nd, Sm, Gd}$) single crystals // Phys. Rev. B. — 1996. — V. 54. — P. R5207.
9. Takagi S. [et al.]. Boron-11 nuclear relaxation studies of praseodymium hexaboride and neodymium hexaboride // J. Magn. Magn. Mat. — 1985. — V. 52. — P. 267.

Поступила в редакцию 29.12.2008.