УДК 541.123:546.21'831'832

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-18-22

Р.К. Арсланов, М.И. Даунов, У.З. Залибеков

**Применение обобщенной модели аномальной холловской проводимости
для неоднородных магнитных нанокompозитных систем в области фазовых
превращений под давлением**

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук; Россия, 367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94, arslnovr@gmail.com

Приведена классическая теория эффективной среды для тензора холловской проводимости в неупорядоченных нанокompозитных магнитных материалах, которые одновременно претерпевают переход ферромагнетик–парамагнетик и полупроводник–металл через микроскопически неоднородный магнето–транспортный режим. Производились расчеты (включая диагональную и недиагональную части) компонент тензора проводимости, определяемые диагональю проводимости в первом приближении для эффективной проводимости. Приведены зависимости аномальной компоненты холловского сопротивления от объемной концентрации частиц и давления для композитов в области перехода ферромагнетик–парамагнетик. Экспериментально определена взаимосвязь между коэффициентом аномального холловского сопротивления и проводимостью.

Ключевые слова: *давление, магнитное поле, аномальный эффект Холла, рассеяние.*

Введение

Микроскопические неоднородности всегда присутствуют в неупорядоченных материалах. Именно они затрудняют интерпретацию транспортных свойств. Приближение эффективной среды, аналогичное приближению когерентного потенциала в теории твердого тела [1, 2], является одним из базовых при описании эффективных параметров сильно неоднородных композитных сред. Предложенное впервые Браггеманом [3] для сред с макроскопическими включениями, оно широко применяется в качестве аппроксимации и при описании композитов, содержащих наноструктурные объекты, например, графены и углеродные трубки, а также метаматериалов, т. е. сложных композитных сред с отрицательными значениями эффективной диэлектрической и/или магнитной проницаемостей.

Образцы и методика эксперимента

Нанокompозитный образец $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ был получен по методике, описанной в работе [4].

Магнето–транспортные свойства под давлением измерялись в аппарате высокого давления типа «Тороид» [5]. Методика измерения магнето–транспортных свойств описана в [6].

Результаты и их обсуждение

Как известно, сопротивление Холла ρ_H в магнетиках описывается следующим соотношением:

$$\rho_H = \rho_o^N B_z + \rho_{xy}^A 4\pi M_z, \quad (1)$$

где B_z – компонент магнитной индукции, M_z – компонент намагниченности вдоль оси OZ, ρ_o^N – нормальный эффект Холла (НЭХ), обусловленный действием силы Лоренца, и ρ_{xy}^A – аномальный эффект Холла (АЭХ), связанный с действием спин-орбитального взаимодействия (COB). Вклад аномального эффекта Холла в ЭДС Холла значительно преобладает. Из соотношения (1) следует, что ρ_{xy}^A пропорционально недиагональному (антисимметричному) компоненту тензора проводимости σ_{xy} :

$$\rho_{xy}^A = \frac{\sigma_{xy}(M_z)}{4\pi M_z(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2)}, \quad (2)$$

где σ_{xy} – недиагональный компонент тензора проводимости, линейный по спин-орбитальному взаимодействию, а σ_{xx} – диагональный компонент проводимости. В выражении (2) учтено, что $\sigma_{xy} \ll \sigma_{xx}$ и $\sigma_{xx} = \rho^{-1}$, следовательно, АЭХ возникает из-за асимметричного рассеяния спин-поляризованных носителей тока, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием. Теория АЭХ была разработана для однородных металлов и неупорядоченных сплавов, то есть для систем с микроскопическими неоднородностями [7; 8]. В работе [7] была предложена модель для описания АЭХ макроскопически неоднородных магнитных полупроводников с применением теории эффективной среды, в рамках которой отсутствует адекватное описание перколяционных переходов для систем с магнитными включениями. В этой же работе было получено уравнение для макроскопически неоднородных магнитных систем, содержащих сферические частицы с объемной концентрацией c , холловской проводимостью σ_{xy1} , σ_{xy2} , намагниченностью M_1 , M_2 и обычной проводимостью σ_1 , σ_2 . Однако результаты сравнения экспериментальных данных с известными точными решениями и с расчетами Монте-Карло указывают на высокую точность метода эффективной среды для выражения проводимости в немагнитных системах [9–12]. Методика вычисления ρ_{xy}^A аналогична той, что использовалась в работе [9]. Производились расчеты (включая диагональную и недиагональную части) компонентов тензора проводимости σ_i , определяемых диагонально проводимости в первом приближении для эффективной проводимости

$$\left[\frac{\sigma_i - \sigma}{\sigma_i + 2\sigma} \right] = 0 \quad (3)$$

и в приближении эффективного поля для эффективной холловской проводимости, которое имеет вид

$$\sigma_{xy} = \left(\frac{\sigma_{xy}^i}{[\sigma_i + 2\sigma]^2} \right) [(\sigma_i + 2\sigma)^{-2}]^{-1}. \quad (4)$$

Из уравнений (4) и (2) для макроскопической неоднородной системы с намагниченностью M для АЭХ

$$\rho_{xy}^A = \rho_{xy1}^A \left(\frac{\sigma_{xy1}^2}{\sigma_{xx1}^2 + \sigma_{xy1}^2} \right) \frac{M_1}{M} \times \frac{c}{c + (1-c) \left[\frac{\sigma_{xx1} + 2\sigma}{\sigma_{xx2} + \sigma} \right]^2} + \rho_{xy2}^A \left(\frac{\sigma_{xy2}^2}{\sigma_{xx2}^2 + \sigma_{xy2}^2} \right) \frac{M_2}{M} \times \frac{c}{c + (1-c) \left[\frac{\sigma_{xx2} + 2\sigma}{\sigma_{xx1} + \sigma} \right]^2}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет производить расчеты для материалов с низкой проводимостью $\sigma_{xy}^i \ll \sigma^i$ при условии, что $\sigma_{xy} \sim \sigma^2$. Следует отметить, что значения параметров σ_{xy1} , σ_{xy2} , M_1 и M_2 могут зависеть от концентрации c из-за возможных размерных эф-

фектов и изменений в электронной структуре, связанных с изменениями состава или размеров кластеров MnAs.

Для более глубокого понимания данного явления были экспериментально исследованы зависимости намагниченности M , аномальной компоненты холловского сопротивления ρ_{xy}^A и удельного сопротивления ρ_{xx} от давления для нанокompозита $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2 + 10\text{wt.}\%$. На рис. 1–3 приведены зависимости намагниченности, аномальной компоненты холловского сопротивления, измеренного в магнитном поле 5 kOe , и удельного сопротивления от давления при комнатной температуре. Как видно из рис. 1–2, экспериментально реализуется состояние, когда $\rho_{xy1}^A < \rho_{xy2}^A$ и значение намагниченности $M_2 < M_1$. Тогда ρ_{xy}^A можно определить из выражения (5). Предположим, что $\sigma_2 = x\sigma_1$ и $M = cM_1$. Тогда в случае перехода полупроводник-металл (рис. 3) при ($\sigma = 1$) ρ_{xy1}^A уменьшается в области перехода при давлении $P > 3 \text{ GPa}$, а c растет (рис. 4). На пороге фазового перехода, когда $c = 0.4$, появляется «излом» в зависимости от концентрации c , а в полупроводниковой области ($c \leq 0.4$, $\sigma = 0$) $\rho_{xy}^A = \rho_{xy1}^A(1 - c)$. Согласно выражению (9) наблюдаемое уменьшение ρ_{xy}^A экспериментально возможно только в металлической области при условии ($\sigma = 1$) (см. рис. 3). На рис. 2 показано поведение ρ_{xy}^A в случае перехода ферромагнетик-парамагнетик при $P > 3.5 \text{ GPa}$, когда $\sigma_1 < \sigma_2$. Экспериментально полученная корреляция $\rho_{xy}^A \sim \rho_{xx}^{1.6}$ (рис. 2, 3) отличается от скейлинга для однородных ферромагнетиков. Подобный скейлинг ($\gamma = 1.4 \div 1.6$) наблюдался также в металл-диэлектрических нанокompозитах вблизи порога перколяции, в т. ч. на диэлектрической стороне в режиме прыжковой проводимости [13].

Рис. 1. Зависимость намагниченности от давления для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2 + 10\text{wt.}\%\text{MnAs}$

Рис. 2. Зависимость аномальной компоненты холловского удельного сопротивления от давления для образцов 1 – $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2 + 10\text{wt.}\%\text{MnAs}$

Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления от давления для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$

Рис. 4. Нормализованная зависимость аномального коэффициента Холла μ_{xy}^A/ρ_{xy1}^A для нанокompозита $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ от концентрации c и давления P . Расчетная кривая построена с использованием выражения (5): при $\rho_{xy2}^A = 0$, $M = cM_I = 0.8$, $x = \sigma_2/\sigma_I = 10^{-1}$

В случае систем с металлической проводимостью он объясняется подавлением собственного механизма АЭХ в условиях сильного рассеяния носителей заряда [14].

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 08 «Физика конденсированных сред и материалы нового поколения».

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – С. 450.
2. Ведяев А.В., Грановский А.Б., Котельникова О.А. Кинетические явления в неупорядоченных ферромагнитных сплавах. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – С. 153.
3. Bruggeman A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen // Annalen der Physik. – 1935. – V. 5, № 24. – P. 636–664.
4. Kilanski L., Górski M., Dobrowolski W., Dynowska E., Wójcik M., Kowalski B.J., Anderson J.R., Rotundu C.R., Maude D.K., Varnavskiy S.A., Fedorchenko I.V., Marenkin S.F. Magnetism and magnetotransport of strongly disordered $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$ semiconductor: the role of nanoscale magnetic clusters // Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 108. – P. 073925.
5. Khvostantsev L.G., Vereshagin L.P., Novikov A.P. Device of Toroid type for high pressure generation // High Temp.-High Pressure. – 1977. – V. 9, № 6. – P. 637–639.
6. Nakanishi T., Takeshita N., Mo N. A newly developed high-pressure cell by using modified Bridgman anvils for precise measurements in magnetic fields at low temperatures // Review of scientific instruments. – 2013. – V. 73, № 4. – P. 1828–1831.

7. Granovsky A.B., Vedyayev A.V., Brouers F. Extraordinary Hall effect (EHE) of ferromagnetic composites in the effective medium approximation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1994. – V. 136. – P. 229–232.
8. Ведяева А.В., Грановский А.Б., Калицов А.В., Брауэрс Ф. Аномальный эффект Холла гранулированных сплавов // *ЖЭТФ*. – 1997 – Т. 112, вып. 6 (12). – С. 2198–2209.
9. Morrel H. Cohen. Effective Medium Theory for the Hall Effect in Disordered Materials // *Phys. Rev. Lett.* – 1973. – V. 30. – P. 696–698.
10. Juretschke H.J., Landauer R., Swanson J.A. Hall Effect and Conductivity in Porous Media // *Journal of Applied Physics*. – 1956. – V. 27. – P. 838.
11. Norris A.N., Sheng P., Callegari A.J. Effective-medium theories for two-phase dielectric media // *Journal of Applied Physics*. – 1985. – V. 57. – P. 1990.
12. Peng Xiong, Gang Xiao, Wang J.Q., John Q., Xiao J., Samuel Jiang, Chien C.L. Extraordinary Hall effect and giant magnetoresistance in the granular Co–Ag system // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – V. 69. – P. 3220.
13. Черноглазова К.Ю., Николаева С.Н., Рылькова В.В., Семисалова А.С., Зенкевич А.В., Тугушева В.В., Васильева А.Л., Чеснокова Ю.М., Пашаева Э.М., Матвеев Ю.А., Грановский А.Б., Новодворский О.А., Веденеев А.С., Бугаев А.С., Драченко А., Жоус Ш. Аномальный эффект Холла в поликристаллических пленках $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$ ($x \approx 0.5$) с самоорганизованным распределением кристаллитов по форме и размерам // *Письма в ЖЭТФ*. – 2016. – Т. 103, вып. 7. – С. 539–546.
14. Onoda S., Sugimoto N., Nagaosa N. Intrinsic Versus Extrinsic Anomalous Hall Effect in Ferromagnets // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – V. 97. – P. 126602.

Поступила в редакцию 10 ноября 2018 г.

UDC 541.123:546.21'831'832

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-18-22

Application of a generalized model of anomalous Hall conductivity for inhomogeneous magnetic nanocomposite systems in the area of phase transformations under pressure

R.K. Arslanov, M.I. Daunov, U.Z. Zalibekov

Institute of Physics, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Russia, 367003, Makhachkala, M. Yaragsky st., 94; arslanovr@gmail.com

The classical theory of the effective medium for the Hall conductivity tensor in disordered nanocomposite magnetic materials, which simultaneously undergo a ferromagnet-paramagnet and semiconductor-metal transition through a microscopically inhomogeneous magneto transport mode is presented in the given article. The calculations were performed (including the diagonal and nondiagonal parts) of the components of the conductivity tensor, determined by the diagonal of conductivity in the first approximation for effective conductivity. The dependences of the anomalous component of the Hall resistance on the volume concentration of particles and pressure for composites in the region of the ferromagnet-paramagnet transition are given. The relationship between the coefficient of anomalous Hall resistance and conductivity was experimentally obtained.

Keywords: *pressure, magnetic field, anomalous Hall effect, scattering.*

Received 10 November, 2018