УДК 541.123:546.21'831'832

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-13-17

Р.К. Арсланов¹, У.З. Залибеков¹, Р.Г. Джамамедов¹, И.В. Федорченко²

Магнито-транспортные свойства нанокompозита $Zn_{0.1}Cd_{0.9}GeAs_2+10\%MnAs$ и $Zn_{0.1}Cd_{0.9}GeAs_2+15\%MnAs$ при высоком давлении

¹ Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН; Россия, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94; arslanovr@gmail.com;

² Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН; Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 31

Мы приводим систематические исследования магнитных и транспортных свойств высокотемпературных ферромагнитных систем на основе $Zn_{1-x}Cd_xGeAs_2$ включением наноразмерных MnAs кластеров с различной концентрацией и температурой Кюри 350 К. Транспортные характеристики показали, что все исследованные образцы имели удельную электропроводность p -типа, сильно зависящую от химического состава сплава. Измерения эффекта Холла показали, что концентрации носителей и относительно низкие подвижности также зависят от химического состава. В исследованных образцах обнаружен индуцированный высоким давлением переход из упорядоченной фазы в неупорядоченную и одновременно переход полупроводник–металл при давлении $p \approx 3,2$ ГПа. Наблюдаемый в эксперименте ферромагнетизм обусловлен наличием включений кластеров MnAs.

Ключевые слова: давление, магнитное поле, нанокompозит, магнито-транспорт.

Введение

В последние годы резко возрос интерес к ферромагнитным нанокompозитным материалам [1–3] из-за их возможного применения в спинтронике [4]. Такие неоднородные композитные системы являются более перспективными материалами, чем разбавленные магнитные полупроводники, легированные переходными металлами группы $3d^5$ [5].

В настоящей работе мы изучаем магнито-транспортные свойства под давлением композитов на основе полупроводниковой матрицы $Zn_{1-x}Cd_xGeAs_2$ с наноразмерными MnAs ферромагнитными включениями. $Zn_{1-x}Cd_xGeAs_2$ представляет собой узкозонный полупроводник с $E_g \sim 0,73$ эВ [3]. Этот проводник – представитель $A^{II}B^{IV}C^V_2$ халькопиритной группы, который является электронным аналогом соединений $A^{III}B^V$, кристаллизующихся в тетрагональной решётке.

Образцы и методика эксперимента

Нанокompозитные поликристаллические образцы $Zn_{0.1}Cd_{0.9}GeAs_2+10\%MnAs$ и $Zn_{0.1}Cd_{0.9}GeAs_2+15\%MnAs$ были получены по методике, описанной в работах [6; 7].

Магнито-транспортные свойства под давлением измерялись в аппарате высокого давления типа «тороид» [8; 9]. Методика измерения магнито-транспортных свойств описана в [10].

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения намагниченности под давлением $M(P)$ при комнатной температуре представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что в области структурных превращений при всестороннем давлении $p > 3,2$ ГПа наблюдается заметное уменьшение намагниченности, обусловленное магнитным фазовым превращением ферромагнетик–парамагнетик. На рис. 2, 3 приведены барические зависимости удельного электросопротивления $\rho(p)$ коэффициента Холла $R_H(p)$, измеренного в поле $H = 0.5$ Тл, для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ и $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$ при комнатной температуре.

Рис. 1. Зависимости намагниченности от давления для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ и $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$

Рис. 2. Зависимости удельного электросопротивления и коэффициента Холла, измеренного в магнитном поле 0.5 Тл, от давления для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$

Как видно из рис. 2, в $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ удельное сопротивление возрастает и достигает максимума при $p \approx 2$ ГПа, затем резко падает при $p > 3,5$ ГПа больше, чем на 1 порядок. Характер зависимости удельного сопротивления для образца $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$ рис. 3 заметно отличается от образца $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ отсутствием максимума. При этом коэффициенты Холла в обоих образцах возрастают и проходят через максимум при $p > 2,3$ ГПа, а затем резко падают при $p > 3,5$ ГПа почти на 2 порядка. В области насыщения для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ при $p > 5$ ГПа $\rho(p) \approx 0,5$ Ом см и $\mu(p) \approx 2,3$ см²В⁻¹с⁻¹. Для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$ при $p > 5$ ГПа $\rho(p) \approx 0,18$ Ом см и $\mu(p) \approx 1,7$ см²В⁻¹с⁻¹.

Рис. 3. Зависимости удельного электросопротивления и коэффициента Холла, измеренного в магнитном поле 0,5 Тл, от давления для $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$

Общепринятое объяснение аномалий кинетических эффектов в нанокompозитах отсутствует. Наиболее приемлемым в настоящее время представляется полуфеноменологический подход с использованием небольшого набора параметров, которые имеют ясный физический смысл и могут быть определены экспериментально.

Приводимые далее формулы являются обобщением результатов, опубликованных в [11]. При расчете проводимости σ используем выражение, предложенное Моттом,

$$\sigma = \int_{E_1}^{E_2} \left(-\frac{\partial F}{\partial E} \right) \sigma_E dE, \quad (1)$$

где $F(E)$ – функция Ферми, а интегрирование ведется в интервале между энергиями E_1 и E_2 , соответствующими нижнему и верхнему краю подвижностей. Положение краев подвижности определяется степенью беспорядка в системе. При низких температурах существенным является немагнитный беспорядок. Нарастание магнитных флуктуаций вблизи температуры Кюри приводит к сдвигу краев подвижности к центру зоны, в результате чего область делокализованных состояний сужается. В соответствии с [11] будем предполагать, что изменение E_1 и E_2 при изменении магнитного поля H и давления P можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} E(H, P) &= \Delta_{10} + \Delta_{11} \frac{M}{M_S}, \\ E(H, P) &= \Delta_{20} + \Delta_{21} \frac{M}{M_S}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H – магнитное поле, M – намагниченность, M_S – спонтанная намагниченность, Δ_{ij} параметры, определяемые из эксперимента. В основном нас будет интересовать ситуация, когда в ферромагнитной области реализуется полупроводниковое, а в парамагнитной – металлическое состояние.

Нанокompозит находится в металлическом состоянии, если уровень Ферми расположен между E_1 и E_2 , и $|E_F - E_1|, |E_F - E_2| \gg T$. В этом случае $\sigma = \sigma_E = EF$, и изменение проводимости происходит из-за изменения подвижности носителей заряда.

Вблизи температуры Кюри происходит переход полупроводник-металл, в результате которого уровень Ферми оказывается в области локализованных состояний. Столь значительное изменение транспортных параметров (рис. 2, 3) свидетельствует о том, что в образцах происходит перколяционный переход полупроводник-металл. Поскольку из измерений эффекта Холла следует, что основными носителями тока в интересующих нас материалах являются дырки, будем полагать, что переход обусловлен пересечением E_F и E_2 ; тогда в полупроводниковой фазе $E_F > E_2 > E_1$. Принимая, что $\sigma_E = \sigma_m$ (σ_m – минимальная металлическая проводимость), если $E_1 < E < E_2$, из (1) имеем

$$\sigma = \sigma_m [f(y_2) - f(y_1)], \quad (3)$$

где $y_{1,2} = (E_F - E_{1,2})/T$, $f(y) = (e^y + 1)^{-1}$. Близость нижнего края подвижности приводит к уменьшению проводимости. Эти изменения являются несущественными, если $y_1 \gg |y_2|$, $y_1 \gg 1$. В этом случае слагаемые, содержащие y_1 , можно не учитывать, и для окрестности перехода полупроводник-металл получается выражение [9]

$$\rho = \rho_m \left(\exp\left(\frac{E^p}{T}\right) + 1 \right). \quad (4)$$

Здесь $\rho_m = \sigma_m^{-1}$, энергия активации сопротивления $E^p = E_0^p - E_1^p m^2$, где $E_0^p = E_F - \Delta_{20}$, $E_1^p = \Delta_{21}$.

Совокупность полученных результатов можно объяснить следующим образом. Характерной особенностью новых композитов является наличие хаотически распределенных ионов переходных металлов, магнитные моменты которых сильно взаимодействуют с магнитными моментами подсистемы дырок (в случае материалов р-типа). Большие значения констант магнитного обмена, свойственные для новых магнитных полупроводников, обусловлены химической связью *p*- и *d*-орбиталей.

Литература

1. Rache Salles B., Girard J.C., David C., Offi F., Borgatti F., Eddrief M., Etgens V.H., Simonelli L., Marangolo M., Panaccione G. Electronic properties of embedded MnAs nano-clusters in a GaAs matrix and (Ga, Mn)As films: Evidence of distinct metallic character // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – P. 203121.
2. Ivanov V.A., Aminov T.G., Novotortsev V.M., Kalinnikov V.T. Spintronics and spintronics materials // Russian Chemical Bulletin, International Edition. – 2004. – V. 53, № 11. – P. 2357–2405.
3. Laiho R., Lisunov K.G., Lahderanta E., Zakhvalinskii V.S. Magnetic properties of the new diluted magnetic semiconductor $Zn_{1-x}Mn_xAs_2$: evidence of MnAs clusters // J. Phys.: Condens. Matter. – 1999. – V. 11. – P. 555–568.
4. Masatoshi Imada, Atsushi Fujimori, Yoshinori Tokura. Metal-insulator transitions // Reviews of Modern Physics. – 1998. – V. 70, №. 4. – P. 1039–1263.
5. Carsten Timm. Disorder effects in diluted magnetic semiconductors // J. Phys.: Condens. Matter. – 2003. – V. 15. – P. R1865–R1896.
6. Kilanski L., Górska M., Dobrowolsk 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 $Zn_{1-x}Mn_xGeAs_2$ semiconductor: The role of nanoscale magnetic clusters // Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 108. – P. 073925.
7. Kilanski L., Fedorchenko I.V., Górska M.A., Ślawska-Waniewska, Nedelko N., Podgórní A., Avdonin A., Lähderanta E., Dobrowolski W., Aronov A.N., Marenkin S.F. Mag-

netoresistance control in granular $\text{Zn}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{GeAs}_2$ nanocomposite ferromagnetic semiconductors // J. Appl. Phys. – 2015. – V. 118. – P. 103906.

8. 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.

9. 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.

10. Kilanski L., Szalowski K., Szymczak R., Gorska M., Dynowska E., Aleshkevych P., Podgorni A., Avdonin A., Dobrowolski W., Fedorchenko I.V., Marenkin S.F. Low-dilution limit of $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{GeAs}_2$: Electrical and magnetic properties // J. Appl. Phys. – 2013. – V. 114. – P. 093908.

11. Tokura Y., Tomioka Y. Colossal magnetoresistive manganites // J. Magn. Mater. – 1999. – V. 200. – P. 1–23.

Поступила в редакцию 26 октября 2018 г.

UDC 541.123:546.21'831'832

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-4-13-17

Magneto-transport properties of $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+10\%\text{MnAs}$ and $\text{Zn}_{0.1}\text{Cd}_{0.9}\text{GeAs}_2+15\%\text{MnAs}$ nanocomposites at high pressure

R.K. Arslanov¹, U.Z. Zalibekov¹, R.G. Dzhamamedov¹, I.V. Fedorchenko²

¹ Institute of Physics, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Russia, 367003, Makhachkala, M. Yaragsky st., 94; arslanovr@gmail.com;

² Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS; Russia, 119991, Moscow, Lenin Avenue, 31

The given research is a systematic study of the magnetic and transport properties of high-temperature ferromagnetic systems based on $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{GeAs}_2$ involving the inclusion of nanoscale MnAs clusters of various concentrations and Curie temperatures of 350 K. The transport characteristics showed that all the samples studied had a specific p-type electrical conductivity, strongly dependent on the chemical composition of the alloy. Measurements of the Hall effect showed that carrier concentrations and relatively low mobilities also depend on the chemical composition. In the samples studied, a high-pressure-induced transition from the ordered phase to the disordered phase and at the same time a semiconductor-metal transition was found at a pressure of $p \approx 3,2$ GPa. The ferromagnetism observed in the experiment is due to the presence of inclusions of MnAs clusters.

Keywords: *pressure, magnetic field, nanocomposite, magnetotransport.*

Received 26 October, 2018