

# АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В РАЗБАВЛЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $p$ -InAs⟨Mn⟩

*Р. К. Арсланов\**, *Т. Р. Арсланов*, *М. И. Даунов*

*Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук  
367003, Магачкала, Россия*

Поступила в редакцию 20 сентября 2016 г.

Приведены результаты количественного анализа зависимостей удельного сопротивления и коэффициента Холла в области примесной проводимости от всестороннего давления  $P = (4\text{--}6)$  ГПа при  $T = 300$  К в объемных монокристаллических образцах  $p$ -InAs⟨Mn⟩ с концентрацией акцепторов порядка  $10^{18}$  см $^{-3}$ . Показано, что в  $p$ -InAs⟨Mn⟩ наблюдается аномальный эффект Холла (АЭХ), вклад которого отрицателен и коррелирует с деионизацией акцепторов, а также с возрастанием магнитной восприимчивости.

DOI: 10.7868/S0044451017030129

Разбавленные магнитные полупроводники (РМП), в частности, однородные полупроводники типа А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> с добавлением Mn, привлекают внимание в качестве перспективных материалов для создания спиновых устройств магнитоэлектроники [1–3]. Одним из основных инструментов изучения магнитных свойств РМП является метод, основанный на исследовании аномального эффекта Холла (АЭХ). В области примесной проводимости РМП, когда в явлениях переноса принимает участие один сорт носителей заряда, нормальная составляющая электродвижущей силы (ЭДС) Холла  $V_B$ , обусловленная силой Лоренца, пропорциональна компоненте магнитной индукции вдоль оси  $z$  ( $B_z$ ):

$$V_B = R_B B_z I / d, \quad (1)$$

где  $I$  — ток, прикладываемый к образцу,  $d$  — толщина образца,  $R_B = (pe)^{-1}$  ( $p$  — концентрация дырок валентной зоны,  $e$  — заряд электрона).

В случае РМП в полном холловском сигнале появляется вклад ЭДС  $V_M$ , пропорциональный компоненте намагниченности вдоль оси  $z$  ( $M_z$ ):

$$V_M \propto R_B M_z I / d. \quad (2)$$

Тогда в общем случае полный холловский сигнал

$$V_H = V_B + V_M, \quad (3)$$

а соответствующее выражение для сопротивления Холла  $R_{xy}$  принимает вид

$$R_{xy} d = R_B B_z + R_B M_z = (V_B + V_M) d / I. \quad (3a)$$

Применяемый в настоящее время способ выделения аномальной составляющей ЭДС Холла заключается в вычитании из полного сигнала линейной по магнитному полю части. Процедура эта, однако, не всегда носит однозначный характер, так как отклонение магнитополевой зависимости от линейного поведения может быть вызвано различными причинами [4].

Всестороннее давление позволяет существенным образом воздействовать на электронный спектр, что соответственно сказывается на магнитных свойствах РМП. В частности, эти изменения могут влиять на АЭХ. Поэтому представляется актуальным исследование транспортных свойств РМП на основе однородных полупроводников группы А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> с добавлением марганца с использованием эффективно внешнего параметра — всестороннего давления.

В настоящей работе приведены результаты количественного анализа барических зависимостей удельного сопротивления  $\rho(P)$ , коэффициента Холла  $R_H(P)$  и магнитной восприимчивости  $\chi(P)$  от всестороннего давления до  $P = 7$  ГПа и  $T = 300$  К [5] для монокристаллических объемных образцов  $p$ -InAs⟨Mn⟩. Измерения барических зависимостей кинетических коэффициентов проводились в аппарате высокого давления типа «Тороид», который помещался в соленоид [6, 7]. Монокристаллы  $p$ -InAs⟨Mn⟩ были выращены из расплава по методу Чохраль-

\* E-mail: arslanovr@gmail.com

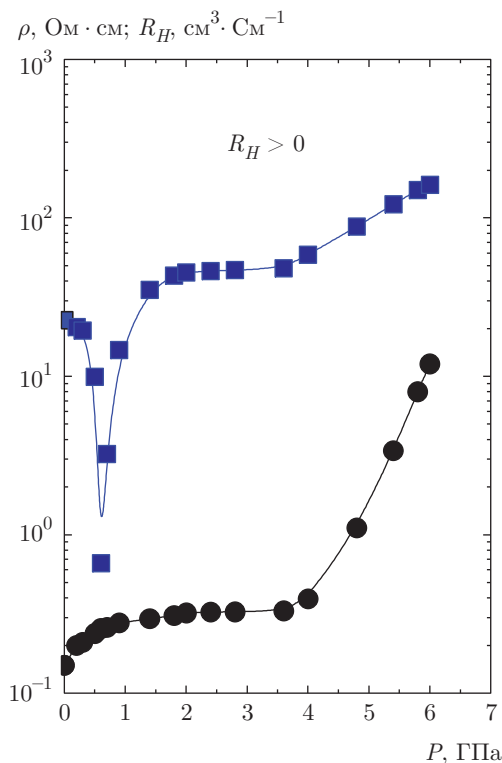


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла  $R_H$  при  $H = 5$  кЭ от давления для  $p$ -InAs(Mn)

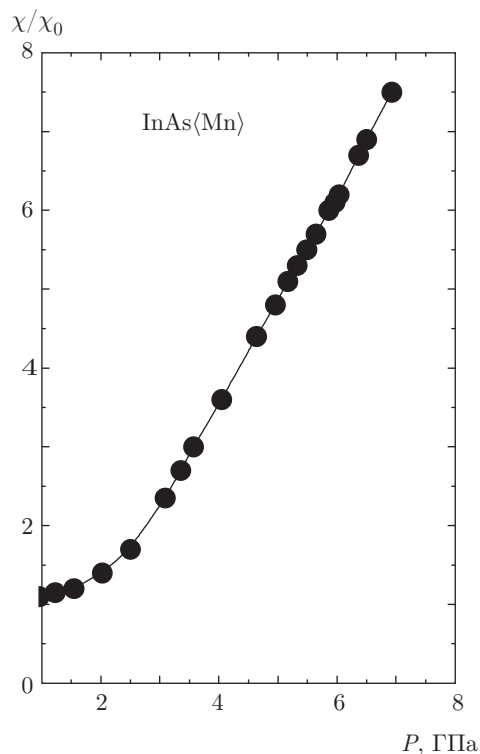


Рис. 2. Зависимость нормализованной к  $P = 1$  ГПа магнитной восприимчивости от давления для  $p$ -InAs(Mn)

ского в Институте тонкой химической технологии РАН. Для измерения магнитной восприимчивости регистрировалось изменение частоты резонансного контура, в катушку индуктивности которого помещался исследуемый образец.

Характерные зависимости  $\rho(P)$ ,  $R_H(P)$  и  $\chi(P)$  для образца с  $R_H = -36.5 \text{ см}^3 \cdot \text{См}^{-1}$ ,  $\rho = 0.17 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при атмосферном давлении и  $T = 300 \text{ К}$  представлены на рис. 1, 2. На рис. 3 приведена температурная зависимость коэффициента Холла для этого же образца при атмосферном давлении. Представленные зависимости коэффициента Холла демонстрируют изменение его знака, обусловленное переходом от смешанного типа проводимости к примесному при понижении температуры и атмосферном давлении, и увеличении ширины запрещенной зоны с ростом давления при  $T = 300 \text{ К}$ .

В исследованных образцах  $p$ -InAs(Mn) при атмосферном давлении и температурах  $T = 300 \text{ К}$  и  $T < 100 \text{ К}$  в диапазоне давлений от 4 до 6 ГПа (начало полиморфного перехода) наблюдается примесная проводимость (рис. 1, 3). Рост  $\rho$  и  $R_H$  с давлением при  $T = 300 \text{ К}$  (рис. 1) обусловлен увеличением энергетического зазора между уровнем энер-

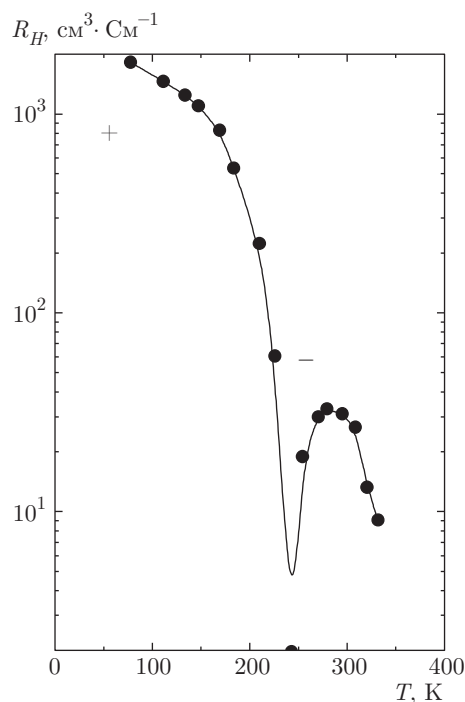


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента Холла при атмосферном давлении, измеренного в магнитном поле  $H = 9$  кЭ для образца  $p$ -InAs(Mn)

гии акцепторного примесного центра и потолком валентной зоны  $\varepsilon_a(P)$  и, соответственно, убыванием концентрации дырок  $p$ . Обращает на себя внимание тот факт, что при  $P > 4$  ГПа в интервале (4–6) ГПа коэффициент Холла возрастает примерно в 4 раза, а удельное сопротивление — примерно в 30 раз (рис. 1). Столь существенное различие не может определяться снижением подвижности дырок валентной зоны, вызванным ростом их эффективной массы и убыванием статической диэлектрической постоянной [8], а связано с появлением вклада  $V_M \sim M_z$  в полном холловском сигнале. Наблюдавшийся аномальный вклад в холловское сопротивление, возрастающее с ростом давления, является отрицательным, что находится в согласии с результатами, полученными в работах [4, 9].

В интервале давлений 4–6 ГПа были рассчитаны концентрации акцепторных  $N_a$  и компенсирующих донорных  $N_d$  примесей электронов на акцепторных уровнях  $n_a$ , энергетический зазор между акцепторным уровнем и потолком валентной зоны  $\varepsilon_a$  и их барические зависимости для образца  $p$ -InAs(Mn) с учетом уменьшения концентрации дырок валентной зоны по данным зависимости  $\rho(P)$  (рис. 1), величины подвижности дырок  $\mu = (200\text{--}240) \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  [10] и известным соотношениям.

Оценки проведены для соотношения  $R_{B6}/R_{B4} = 20\text{--}30$ , где индексы «6» и «4» соответствуют давлениям 6 ГПа и 4 ГПа. Используются уравнение нейтральности

$$p + N_d = n_a, \quad (4)$$

$$n_a^j - n_a^{j+1} = p^j - p^{j+1} \quad (4a)$$

и соотношения

$$n_a = N_a [1 + \beta \exp(\varepsilon_a^* + \eta_{FV})] - 1, \quad (5)$$

$$m_p = m_p(0) \left[ 1 + \frac{(\partial \varepsilon_g / \partial P) P}{\varepsilon_g} \right], \quad (6)$$

где  $\eta_{FV} = \varepsilon_{FV} / k_B T$  — приведенная энергия Ферми и  $\varepsilon_a$  — энергия акцепторного уровня относительно потолка валентной зоны,  $m_p$  — эффективная масса плотности состояний дырок валентной зоны,  $\varepsilon_g$  — ширина запрещенной зоны.

С использованием соотношений (4)–(6) было показано, что с ростом давления от 4 до 6 ГПа  $n_a$  убывает в 2 раза: примерно от  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Деионизация примесей марганца коррелирует с ростом магнитной восприимчивости (рис. 2). Эффек-

тивный коэффициент Холла  $R_H$ , рассчитанный по экспериментальным данным согласно (3), равен:

$$R_H = [R_B(B_z + M_z)] / B_z \quad (7)$$

и соответственно

$$M_z = B_z(R_H - R_B) / R_B. \quad (7a)$$

Согласно (7) и (7a) и приведенным выше оценкам в образце с концентрацией дырок  $p \approx 5.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $P = 4$  ГПа имеем  $M_z \approx -1.2 \text{ кЭ}$  при  $P = 4$  ГПа и  $M_z = 4.3 \text{ кЭ}$  при  $P = 6$  ГПа. Таким образом, барическая зависимость восприимчивости коррелирует с аномальным эффектом Холла.

В изучаемых системах  $A^{III}B^V$  с добавлением Mn при атмосферном давлении температура ферромагнитного упорядочения оказывается значительно ниже комнатной [1], в частности, в  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Sb}$   $T_C$  ниже 10 К [9, 11]. Это обусловлено тем, что концентрация нейтральных атомов марганца  $N_M$  с нечетным числом электронов в  $3d$ -подоболочке при  $T > 10$  К оказывается ниже критической величины  $N_M^C$ , и для реализации условия  $N_M > N_M^C$  необходимо достижение низких температур.

Воздействие всестороннего давления ведет к эволюции энергетического спектра электронов и, тем самым, позволяет реализовать условие  $N_M > N_M^C$  при  $T_C = 300$  К в РМП типа  $A^{III}B^V$  с добавлением марганца.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-02-00210а) и в рамках проекта Президиума РАН 1.11 П «Теплофизика высоких плотностей энергии. Материя при высоких давлениях. Фундаментальные проблемы удержания и нагрева плазмы в магнитных ловушках».

## ЛИТЕРАТУРА

1. T. Dietl, *Lecture Notes on Semiconductor Spintronics*, Springer, Berlin (2007).
2. *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, ed. by D. D. Awschalom, D. Loss, and N. Samarth, Springer, Series NanoScience and Technology (2002).
3. M. Tanaka, S. Ohya, and P. Nam Hai, *Appl. Phys. Rev.* **1**, 011102 (2014).
4. Е. И. Яковлева, Л. Н. Овешников, А. В. Кочура, К. Г. Лисунов, Э. Лахдерната, Б. А. Аронзон, Письма в ЖЭТФ **101**, 136 (2015).

5. И. К. Камиллов, М. И. Даунов, А. Ю. Моллаев, Р. К. Арсланов, Изв. РАН., Сер. физ. **74**(8), 1202 (2010).
6. L. G. Khvostantsev, V. N. Slesarev, and V. V. Brazhkin, High Press. Res. **24**, 371 (2004).
7. T. R. Arslanov et al., Sci. Rep. **5**, 7720 (2015).
8. М. М. Гаджиалиев, М. И. Даунов, А. М. Мусаев, ЖЭТФ **148**, 304 (2015).
9. G. Mihaly, M. Csontos, S. Bordacs, I. Kezsmarki, T. Wojtowicz, X. Liu, B. Janko, and J. K. Furdyna, Phys. Rev. Lett. **100**, 107201 (2008).
10. *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник*, Наука, Москва (1978).
11. A. V. Kochura, B. A. Aronzon, K. G. Lisunov, A. V. Lashkul, R. De Renzi, S. F. Marenkin, M. Alam, A. P. Kuzmenko, and E. Lähderanta, J. Appl. Phys. **113**, 083905 (2013).