

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. В. Бродовой, Г. В. Лашкарев, М. В. Радченко,  
Е. И. Слынько, К. Д. Товстюк, Влияние приме-  
си Mn на магнитные и электрические свойства уз-  
кощелевых полупроводников  $(\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y)_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ,  
*Физика и техника полупроводников*, 1984, том 18,  
выпуск 9, 1547–1551

Использование Общероссийского математического портала Math-  
Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовател-  
ским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.119.113.73

10 января 2025 г., 17:52:45



## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ Mn НА МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЗКОЩЕЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $(Pb_{1-y}Sn_y)_{1-x}Mn_xTe$

Бродовой А. В., Лашкарев Г. В., Радченко М. В., Слынько Е. И.,  
Товстюк К. Д.

Исследованы отрицательное магнитосопротивление при 4.2 К, температурные зависимости магнитной восприимчивости, коэффициента Холла, удельного сопротивления на монокристаллических образцах  $(Pb_{1-y}Sn_y)_{1-x}Mn_xTe$  с содержанием марганца в диапазоне  $0.04 \leq x \leq 0.1$ .

Полученные результаты позволяют проследить изменения обменных взаимодействий по мере изменения концентрации марганца.

Показано, что в области концентраций носителей тока  $\sim 6.0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и  $x \sim 0.1$  между ионами  $Mn^{2+}$  существует обменное ферромагнитное взаимодействие. Высказывается предположение, что взаимодействие типа Рудермана—Киттеля—Касуйя—Иосиды (РККИ) здесь должно играть существенную роль. Величина обменного интеграла при 4.2 К составляет 2 эВ.

Комплексные исследования полупроводников с магнитными примесями позволяют получить сведения об электронном состоянии и энергетическом спектре последних. Особый интерес представляет изучение обменных взаимодействий между ионами примеси, а также между магнитными ионами и носителями тока (НТ).

В качестве объекта исследования выбран узкощелевой полупроводник  $Pb_{1-y}Sn_yTe$ , зонный спектр которого изучен в работе [1]. Поэтому оказалось возможным сравнение свойств полупроводника с магнитными примесями и без них.

Примесью, наиболее удобной для легирования твердого раствора  $Pb_{1-y}Sn_yTe$ , является марганец, поскольку его ионы в типичном зарядовом состоянии  $Mn^{2+}$  имеют электронную конфигурацию  $3d^5$  с нулевым орбитальным моментом (*S*-состояние) [2], что значительно облегчает интерпретацию экспериментальных результатов.

Монокристаллы  $(Pb_{1-y}Sn_y)_{1-x}Mn_xTe$  выращены методом Бриджмена—Стокбаргера. При легировании  $Mn^{2+}$  проводимость остается *p*-типа. Для получения образцов с проводимостью *n*-типа их отжигали в парах Cd.

Электрические и магнитные свойства ионов  $Mn^{2+}$  в твердом растворе  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.18 \leq x \leq 0.23$ ) изучены в работах [2, 3]. Концентрация марганца составляла  $2.2 \cdot 10^{18} \div 5.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что в зоне проводимости возникают донорные состояния с энергией  $(0.075 + 1.5 \cdot 10^{-4}) \text{ эВ/К}$ . Интеграл обменного взаимодействия между НТ и магнитными центрами меняет знак с отрицательного на положительный при увеличении концентрации НТ выше  $1.5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

В настоящей работе исследованы монокристаллические образцы  $(Pb_{1-y}Sn_y)_{1-x}Mn_xTe$  ( $0.04 \leq x \leq 0.1$ ). Электрические параметры изученных кристаллов представлены в таблице.

Наиболее полные данные о характере обменных взаимодействий могут быть получены путем исследований в области низких температур. Поэтому измере-

Состав, электрические и магнитные характеристики образцов  $(\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y)_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$

№ образца	Состав $y$	Тип проводимости	Легирующая примесь, $x$	Содержание Mn, ат%	Содержание Cd, ат%	$N$ , $\text{см}^{-3}$ при 4.2 К	$\rho$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 4.2 К	Постоянная Вейса $\theta$ , К
1	0.18	$n$	Mn	0.4	—	$6.6 \cdot 10^{17}$	$8.2 \cdot 10^3$	-80
2	0.18	}	Mn, Cd	2.5	1	$1.3 \cdot 10^{20}$	$1.7 \cdot 10^2$	-20
2a	0.18			2.5	1	$1.5 \cdot 10^{20}$	$1.6 \cdot 10^2$	-24
2б	0.18			2.5	1	$1.25 \cdot 10^{20}$	$1.7 \cdot 10^2$	-24
3	0.28	}	Mn, Cd	10	5	$2.4 \cdot 10^{19}$	$3.4 \cdot 10^2$	-40
3a	0.28			10	5	$3.0 \cdot 10^{19}$	$3.5 \cdot 10^2$	-46
4	0.60	}	Mn	10	—	$6.4 \cdot 10^{20}$	$2.2 \cdot 10^2$	+10
4a	0.60			10	—	$6.0 \cdot 10^{20}$	$2.4 \cdot 10^2$	+8
4б	0.60			10	—	$6.2 \cdot 10^{20}$	$2.2 \cdot 10^2$	+10

ния магнитной восприимчивости (МВ), коэффициента Холла ( $R$ ), удельного сопротивления ( $\rho$ ) проводились в диапазоне 4.2–300 К.

Измерения МВ выполнены относительным методом Фарадея с помощью электронных микровесов с автоматической компенсацией по методике, описанной в [4].

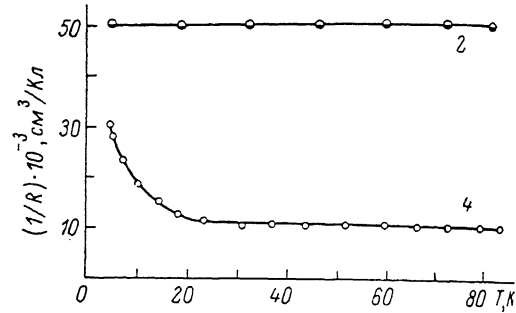
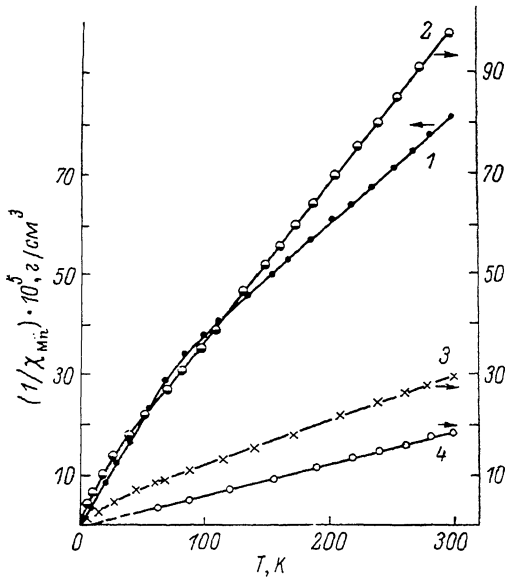


Рис. 2. Типичные температурные зависимости  $R$  для случая антиферромагнитного взаимодействия (2) и ферромагнитного взаимодействия (4).

Рис. 1. Типичные температурные зависимости МВ кристаллов  $(\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y)_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ .

Номера кривых здесь и далее соответствуют номерам образцов в таблице.

Кинетические свойства ( $R$ ,  $\rho$ ) измерялись компенсационным методом. Концентрация НТ определялась из измерений  $R$ , величина холл-фактора оценивалась по формулам, предложенным в [5].

Анализ экспериментальных данных по МВ проводился в предположении об аддитивности отдельных вкладов

$$\chi = \chi_A + \chi_{\text{Mn}}$$

где  $\chi_A$  — расчетная МВ нелегированных кристаллов  $\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y\text{Te}$  [1],  $\chi_{\text{Mn}}$  — МВ примесных ионов  $\text{Mn}^{2+}$ .

Полученные температурные зависимости МВ ионов марганца представлены на рис. 1. Видно, что для образцов 1–3 в области температур 30–300 К  $\chi_{\text{Mn}}$  подчиняется закону Кюри–Вейса

$$\chi_{\text{Mn}} = N_{\text{Mn}} \mu_B^2 / 3K (T - \theta) \quad (1)$$

с отрицательным значением  $\Theta$ . Здесь  $N_{\text{Mn}}$ ,  $\mu_1$  — концентрация и магнитный момент ионов  $\text{Mn}^{2+}$  соответственно. При этом  $\mu_1^2 = \mu_B^2 g^2 S(S+1)$ ,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $S=5/2$  — спин,  $g=2$  — фактор Ланде иона  $\text{Mn}^{2+}$ . При низких температурах зависимость  $\chi_{\text{Mn}}^{-1}(T)$  увеличивает наклон и стремится к началу координат. Аналогичный ход кривых  $\chi_{\text{Mn}}^{-1} = f(T)$  наблюдался ранее для ряда соединений  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  и  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ , легированных марганцем [6-9], и был объяснен существованием в кристаллах магнитных кластеров, состоящих из двух (трех) ионов  $\text{Mn}^{2+}$ , взаимодействие между которыми носит антиферромагнитный характер.

Температурная зависимость МВ ионов  $\text{Mn}^{2+}$  для образца 4 подчиняется закону Кюри—Вейса с положительным значением  $\Theta$ , причем при  $T \sim 10$  К МВ возрастает на порядок. Это же наблюдается и на поликристаллических образцах  $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ , где при  $x > 0.05$   $\Theta$  становится положительной [7].

Отметим, что для состава  $(\text{Pb}_{0.72}\text{Sn}_{0.28})_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  с  $N \sim 2.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  наблюдается  $\Theta < 0$  в отличие от образцов  $(\text{Pb}_{0.4}\text{Sn}_{0.6})_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  с концентрацией дырок  $\sim 6.0 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Это позволяет считать, что взаимодействие типа РККИ при столь больших концентрациях НТ может играть существенную роль.

Мы оценили обменный интеграл РККИ взаимодействия по формулам работы [10] для образцов 3 и 4 при  $T=4.2$  К. Расчеты химического потенциала выполнены в рамках модели Диммока [1]. Расстояние между ионами определялось с учетом того, что примесь Mn статистически распределяется по кристаллу. Оказалось, что при этих условиях знак обменного интеграла существенно зависит от концентрации НТ. При  $N \geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$  взаимодействие между магнитными ионами носит ферромагнитный характер, при более низкой концентрации НТ имеет место антиферромагнитное взаимодействие. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными.

Для изучения взаимодействия НТ с локализованными магнитными моментами проведены исследования температурных зависимостей отрицательного магнитосопротивления (ОМС),  $R$ ,  $\rho$ .

В области  $T \sim 4.2-30$  К температурная зависимость  $R$  образца 4 (рис. 2) характеризуется наличием парамагнитного члена, связанного с асимметрией рассеяния НТ вследствие спин-орбитального взаимодействия дырок с магнитными моментами примесных атомов [11],

$$R = R_0 + R_p \chi,$$

где  $R_0$  — нормальный, а  $R_p$  — парамагнитный коэффициенты Холла. Образцы 1-3 не обнаружили этого эффекта. Величина  $R_p \chi$  возрастает (как и МВ) с понижением температуры, а зависимость  $(R_p \chi)^{-1} = f(T - \Theta)$  характеризуется значением  $\Theta \approx 13 \pm 1$  К, что близко для образцов типа 4.

На рис. 3 представлена зависимость  $\rho = f(T)$  для образцов 2-4. Видно, что для кристалла 4 на температурной зависимости наблюдается особенность в виде максимума при  $T \sim 10$  К. Мы считаем, что увеличение  $\rho$  связано с рассеянием НТ на флуктуациях спинового порядка в области температуры ферромагнитного упорядочения. Этот результат согласуется с выводами работ [12, 13]. Отметим, что для образцов 1-3 вышеуказанная особенность не наблюдается.

На взаимодействие НТ с магнитными моментами ионов марганца в  $(\text{Pb}_{0.4}\text{Sn}_{0.6})_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}$  указывает также и наблюдаемое в этом кристалле ОМС при 4.2 К (рис. 4). В образцах 1-3, в которых не наблюдаются аномалии  $R$  и  $\rho$ , ОМС отсутствует.

В работе [14] авторы предлагают для описания ОМС следующее полуэмпирическое соотношение:

$$\Delta \rho / \rho = -B_1^2 \ln(1 + B_2^2 H^2), \quad (2)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  включают в себя физические характеристики обменного взаимодействия. В частности, коэффициент  $B_2$  определяется выражением

$$B_2^2 = [1 + 4\pi^2 S^2 (2J \rho_F / g)^4] g^2 \mu_B^2 / (kT)^2. \quad (3)$$

Здесь  $J$  — энергия обменного взаимодействия,  $\rho_F$  — плотность состояний на уровне Ферми, величины  $S$  и  $g$  — спин и фактор Ланде локализованного магнитного момента.

Сопоставление (2), (3) с экспериментальными данными позволяет вычислить коэффициент  $B_2$  с целью определения  $J$ . По нашим оценкам, энергия обменного взаимодействия  $J \sim 2$  эВ.

По методу, предложенному Хеджкоком [15], из величины ОМС мы определили, что для кристалла 4 при 4.2 К величина эффективного магнитного момента составляет  $\sim 1300 \mu_B$ . Возникновение гигантских магнитных моментов в узкощелевом полупроводнике  $Pb_{1-y}Sn_yTe$  с примесью 10 ат% Mn, по-видимому, связано с процессами ферромагнитного упорядочения.

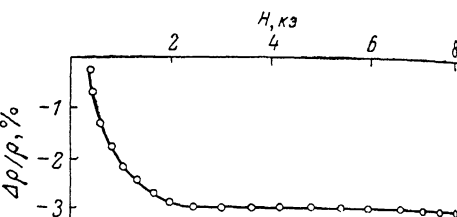
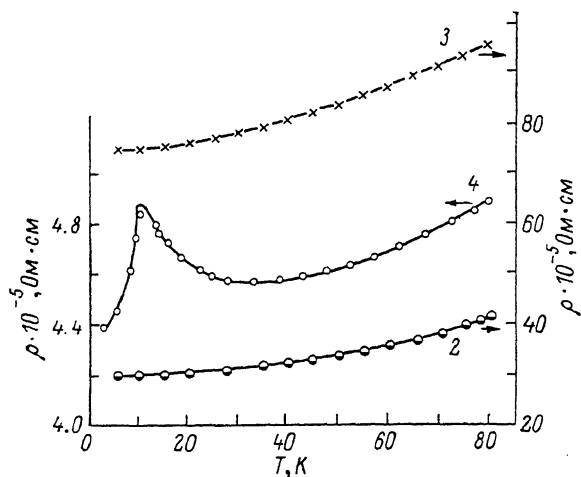


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\rho/\rho=f(H)$  для образца 4 при  $T=4.2$  К.

Рис. 3. Типичные температурные зависимости  $\rho$ .

Таким образом, из проведенных исследований МВ твердого раствора  $Pb_{1-y}Sn_yTe-MnTe$  следует, что между ионами  $Mn^{2+}$  существует обменное взаимодействие. Знак этого взаимодействия определяется концентрацией магнитной примеси Mn и концентрацией НТ. Кроме того, в  $Pb_{1-y}Sn_yTe$  с содержанием Mn  $\sim 10$  ат% и концентрацией НТ  $\sim 6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  обнаружены скачок магнитной восприимчивости, наличие аномального коэффициента Холла, пик удельного сопротивления и отрицательное магнитосопротивление, которые связаны с переходом системы локализованных спинов в упорядоченное состояние с энергией обменного взаимодействия  $\sim 2$  эВ.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Фальковский Л. А., Бродовой А. В., Лашкарев Г. В. Магнитная восприимчивость узкощелевых полупроводников. — ЖЭТФ, 1981, т. 80, в. 1, с. 334—348.
- [2] Лашкарев Г. В., Кикодзе Р. О., Радченко М. В., Слынько Е. И., Марчук И. З. Магнито-электроактивные состояния марганца в узкощелевом полупроводнике  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  ( $0.18 \leq x \leq 0.23$ ). — ФТП, 1979, т. 13, в. 8, с. 1549—1555.
- [3] Лашкарев Г. В., Радченко М. В., Сизов Ф. Ф., Слынько Е. И., Тетеркин В. В. Энергетическое состояние примеси марганца и ее влияние на кинетические, оптические и магнитные свойства узкощелевых твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ . — УФЖ, 1981, т. 26, в. 7, с. 1173—1176.
- [4] Lashkarev G. V., Migley D. F., Shevchenko A. D., Tovstyuk K. D. — Phys. St. Sol. (b), 1974, v. 63, № 2, p. 663—668.
- [5] Равич Ю. М., Ефимова Б. А., Смирнов И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., 1968. 383 с.
- [6] Brumage W., Jarger C., Lin C. — Phys. Rev., 1964, v. 133, № 3A, p. A765—A767.
- [7] Ванярко В. Г., Шавишвили Т. М., Черчерников В. И., Новоселова А. В., Зломанов В. П. Магнитные свойства твердых растворов  $Pb_{1-x}Mn_xSe$  и  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ . — Изв. АН СССР, Неорг. матер., 1970, т. 6, в. 12, с. 2132—2135.
- [8] Андриянов Д. Г., Гимельфарб Ф. А., Кушнир П. И., Лопатинский И. Е., Пашковский М. В., Савельев А. С., Фистуль В. И. Магнитные свойства твердых растворов в системе  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ . — ФТП, 1976, т. 10, в. 1, с. 111—115.
- [9] Андриянов Д. Г., Павлов Н. М., Савельев А. С., Фистуль В. И., Цискаришвили Г. П. Дальнействующая обменная связь между ионами  $Mn^{2+}$  в  $Pb_{1-x}Mn_xTe$ . — ФТП, 1980, т. 14, в. 6, с. 1202—1211.
- [10] Lara S., Xavier R., Taft C. — J. Phys. Chem. Sol., 1977, v. 38, № 7, p. 795—799.

- [11] Каган Ю. М., Максимов Л. А. К теории аномального эффекта Холла в ферромагнетиках. — ФТТ, 1965, т. 7, в. 2, с. 530—538.
- [12] Escorne M., Mauger A. — Sol. St. Commun., 1979, v. 31, № 11, p. 893—895.
- [13] Дейбук В. Г., Мельничук С. В., Ницович В. М. Низкотемпературные особенности кинетических коэффициентов узкощелевых полупроводников, легированных магнитными примесями. — УФЖ, 1983, т. 28, № 1, с. 94—97.
- [14] Khosla R. P., Fischer J. R. — Phys. Rev. B, 1970, v. 2, № 10, p. 4084—4097.
- [15] Hedgcock F. T. — Canad. J. Phys., 1967, v. 45, № 4, p. 1473—1480.

Институт проблем материаловедения АН УССР  
Киев

Получена 21.12.1983  
Принята к печати 30.03.1984