

Влияние Se на гальваномагнитные эффекты в полумагнитных полупроводниках $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$

© В.А. Кульбачинский, И.А. Чурилов, П.Д. Марьянчук, Р.А. Лунин

Московский государственный университет им М.В.Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 17 февраля 1997 г. Принята к печати 28 мая 1997 г.)

В работе исследованы гальваномагнитные свойства монокристаллов полумагнитного полупроводника $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ ($0.01 < y < 0.1$, $x = 0.05, 0.14$) в интервале температур $300 \div 4.2$ К. Особенности зависимостей коэффициента Холла R_H от температуры и сложное поведение R_H в магнитном поле объясняются количественно существованием трех групп носителей тока (электроны и два типа дырок), для которых получены температурные зависимости концентрации и подвижностей. Наблюдается переход от p -типа проводимости к n -типу с увеличением содержания Se, и одновременно отрицательное магнитосопротивление сменяется положительным.

1. Введение

Полумагнитные полупроводники или разбавленные магнитные полупроводники представляют собой твердые растворы, в которых одна из компонент замещается на атом переходного элемента (М) с нескомпенсированным магнитным моментом. Среди соединений $A_{1-x}^{II}M_xB^{VI}$ полумагнитные полупроводники типа $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ относительно хорошо изучены [1–3]. Установлено, что $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ имеет p -тип проводимости [4], а $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ имеет n -тип проводимости [5]. Тип проводимости связан с возникающими в кристаллах заряженными дефектами: вакансии в подрешетке ртути являются акцепторами в $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, атомы ртути в междоузлиях и вакансии в подрешетке селена являются донорами в $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$. Представляло интерес исследовать полумагнитные полупроводники $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}_y\text{Te}_{1-y}$. Можно предположить, что при изменении концентрации Se произойдет своеобразная компенсация различных дефектов, что дает возможность регулировать тип проводимости и концентрацию носителей тока в четверном соединении. Гальваномагнитные свойства $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}_y\text{Te}_{1-y}$ в зависимости от содержания Mn изучались ранее в работах [6–8], кроме этого исследовались переходы в состояние спинового стекла [7,8].

В настоящей работе исследуются гальваномагнитные свойства (в интервале температур $300 \div 4.2$ К) монокристаллов твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ с $x = 0.05, 0.14$ при изменении содержания селена от $y = 0.01$ до $y = 0.10$.

2. Образцы

Монокристаллы $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ выращивались методом Бриджмена из химически чистых компонент. Из слитков электроэрозионным методом вырезались образцы с характерными размерами $0.6 \times 0.6 \times 5$ мм³. Содержание Mn уточнялось с помощью рентгеновского

микронзонда и по измерениям абсолютной величины магнитной восприимчивости при комнатной температуре. Оба метода дали одинаковые результаты в пределах ошибки измерений. Содержание Se в образцах указано по этим данным. Рентгеновским и микронзондовым анализами, а также магнитными измерениями установлено отсутствие в образцах включений других фаз и их гомогенность. Однородность образцов контролировалась также по измерениям коэффициента Холла R_H по длине образца. Разница значений R_H не превышала нескольких процентов.

Электрические измерения проводились на свежепротравленных образцах на постоянном токе четырехконтактным методом. Исследовались образцы $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ с $x = 0.05, 0.14$ и $y = 0.01, 0.05, 0.075, 0.10$. Некоторые параметры исследованных монокристаллов при $T = 4.2$ К приведены в таблице.

Известно, что на электрические и гальваномагнитные свойства полупроводниковых твердых растворов на основе HgTe существенное влияние оказывает приповерхностная область [9]. С целью исключения этого эффекта образцы непосредственно перед измерением протравливались. Специальные исследования показали, что выдержка протравленных образцов на воздухе в течение нескольких дней не изменяет их электрофизических свойств, в частности, сложное поведение коэффициента Холла в магнитном поле при разных температурах, т.е. приповерхностная область не влияет на полученные результаты.

3. Результаты измерений гальваномагнитных коэффициентов и их обсуждение

При понижении температуры сопротивление всех образцов возрастает, показывая активационное поведение с энергией активации около 30 мэВ при температурах выше 100 К. В образцах с минимальным содержанием Se при температурах ниже $T = 30$ К проявляет-

Параметры исследованных образцов $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ при 4.2 К

№ образца	Содержание		$n, 10^{14} \text{ см}^{-3}$	$\mu_e, 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$p_1, 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p1}, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$p_2, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\mu_{p2}, \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
	Mn, x	Se, y						
1	0.14	0.01	0.3	-6.0	2.7	820	9.0	3000
2	0.14	0.05	0.003	-6.0	0.9	130	0.46	4800
3	0.14	0.075	2.5	-3.0	7.8	850	25.0	5300
4	0.14	0.10	1.1	-1.2	42	60	0.52	4100
5	0.05	0.01	5.3	-1.5	2.8	715	7.2	2000
6	0.05	0.10	72.0	-0.56	8.2	80	4.8	5700

Примечание. n, p_1, p_2 — концентрации электронов и 2-х сортов дырок соответственно; $\mu_e, \mu_{p1}, \mu_{p2}$ — подвижности электронов и дырок.

ся отрицательное магнитосопротивление тем больше, чем ниже температура. При увеличении содержания Se отрицательное магнитосопротивление уменьшается и при содержании Se $y = 0.10$ даже при температурах жидкого гелия магнитосопротивление становится положительным. На рис. 1 приведена зависимость магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0 = [\rho(B) - \rho(0)]/\rho(0)$ от магнитного поля B для пяти образцов. Отрицательное магнитосопротивление в больших магнитных полях можно объяснить увеличением проводимости по примесной зоне, характерной для $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [1–3], в связи с перекрытием волновых функций акцепторов в магнитном поле — так называемым магнитным вскипанием дырок [10–14]. С увеличением содержания Se роль проводимости по акцепторной примесной зоне уменьшается, образцы даже изменяют тип проводимости от p - к n -типу, поэтому отрицательное магнитосопротивление сменяется положительным.

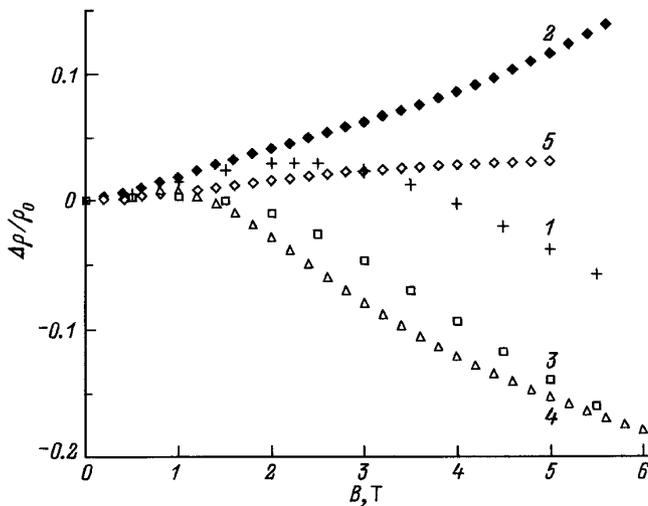


Рис. 1. Зависимости магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ от магнитного поля B при $T = 4.2$ К для образцов $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ с различным составом: 1 — $x = 0.05, y = 0.01$; 2 — $x = 0.05, y = 0.1$; 3 — $x = 0.14, y = 0.01$; 4 — $x = 0.14, y = 0.075$; 5 — $x = 0.14, y = 0.10$.

3.1. Определение подвижностей различных групп носителей тока по эффекту Холла

Наиболее сложно поведение коэффициента Холла R_H при разных температурах в зависимости от магнитного поля. У образца $\text{Hg}_{0.86}\text{Mn}_{0.14}\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ с прямой запрещенной зоной при 4.2 К коэффициент Холла положительный ($R_H > 0$). При увеличении температуры знак R_H в слабых полях изменяется на отрицательный. Увеличение концентрации Se приводит к росту электронной концентрации и к смене знака коэффициента Холла в слабых магнитных полях. Этот эффект проявляется сильнее у бесщелевых образцов. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости R_H от магнитного поля при разных температурах для образцов $\text{Hg}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ с $y = 0.01$ и 0.10.

Количественно удалось удовлетворительно описать приведенные на рис. 2 зависимости $R_H(B)$ лишь при

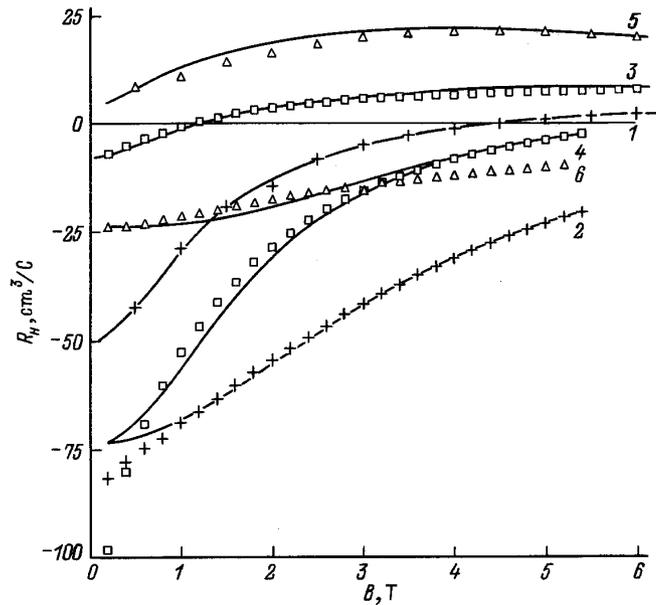


Рис. 2. Зависимости коэффициента Холла R_H от магнитного поля B для образцов $\text{Hg}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ при $y = 0.01$ (кривые 1, 3, 5) и $y = 0.1$ (кривые 2, 4, 6). $T, \text{ К}$: 1 — 81, 2 — 95, 3 — 36, 4 — 4.2.

учете трех групп носителей (электроны и два типа дырок) с различными концентрациями и подвижностями. Дырочная проводимость осуществляется как по валентной зоне (1-й сорт зонных или собственных дырок), так и по примесной акцепторной зоне (2-й сорт дырок) [7,8]. Коэффициент Холла зависит от магнитного поля (при холл-факторе для всех групп, равном 1) следующим образом:

$$R_H(B) = N / (A^2 + N^2 B^2), \quad (1)$$

где введены следующие обозначения:

$$N = en\mu_e^2 / (1 + \mu_e^2 B^2) + ep_1\mu_{p1}^2 / (1 + \mu_{p1}^2 B^2) + ep_2\mu_{p2}^2 / (1 + \mu_{p2}^2 B^2), \quad (2)$$

$$A = en\mu_e / (1 + \mu_e^2 B^2) + ep_1\mu_{p1} / (1 + \mu_{p1}^2 B^2) + ep_2\mu_{p2} / (1 + \mu_{p2}^2 B^2). \quad (3)$$

На рис. 2 линиями проведены рассчитанные зависимости $R_H(B)$ при учете указанных трех групп носителей. В таблице приведены концентрации и подвижности электронов и дырок при температуре 4.2 К, полученные из подгонки зависимостей $R_H(B)$. Наиболее высокие значения подвижности электронов μ_e , что обычно для $Hg_{1-x}Mn_xTe$. Характерной особенностью является рост концентрации электронов с увеличением содержания Se в образцах вплоть до смены типа проводимости с p на n (образцы с $x = 0.05$). С понижением температуры подвижности всех трех групп носителей заряда растут.

3.2. Определение подвижностей различных групп носителей тока по зависимости положительного магнитосопротивления от магнитного поля

Для нахождения подвижностей различных групп носителей тока в исследуемых образцах нами также был использован классический эффект магнитосопротивления. В работе [15] предложен метод, который преобразует зависимости сопротивления от магнитного поля в так называемый "спектр подвижности" — зависимость проводимости от величины подвижности. В этом методе предполагается, что концентрация носителей тока n является непрерывной функцией их подвижности $n(\mu)$, так что поперечные по магнитному полю компоненты тензора проводимости могут быть записаны в виде интегралов, суммирующих вклады в проводимость от каждой группы носителей:

$$\sigma_{xx}(B) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\mu)d\mu}{1 + (\mu B)^2}, \quad \sigma_{xy}(B) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\mu)\mu B d\mu}{1 + (\mu B)^2}, \quad (4)$$

где $s(\mu)d\mu = en(\mu)d\mu$ — вклад в проводимость при $B = 0$ от носителей, имеющих подвижность от μ до

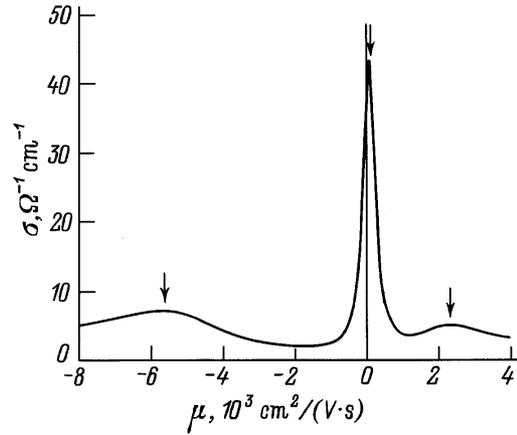


Рис. 3. Спектр подвижности при температуре 79 К для образца $Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.90}Se_{0.10}$. Три максимума (отмечены стрелками) соответствуют трем группам носителей тока (для электронов подвижность отрицательна).

$\mu + d\mu$; электроны имеют отрицательную подвижность, а дырки — положительную. В случае, когда имеются носители тока типа N с дискретными концентрациями n_i и подвижностями μ_i ($i = 1 \dots N$), в спектре подвижности появляются N пиков, центры которых находятся при значениях μ_i , а амплитуды равны $en_i\mu_i$. На рис. 3 приведен спектр подвижности для образца $Hg_{0.86}Mn_{0.14}Te_{0.9}Se_{0.1}$ при температуре 79 К. На этом рисунке видно, что существуют 3 группы носителей тока с разной подвижностью: 2 группы дырок и электроны. Значения подвижностей, полученные из аналогичных спектров для других образцов, хорошо совпадают с рассчитанными по магнитополевым зависимостям коэффициента Холла.

4. Заключение

Таким образом, в полумагнитном полупроводнике $Hg_{1-x}Mn_xTe_{1-y}Se_y$ гальваномагнитные эффекты, в частности инверсия знака коэффициента Холла при увеличении температуры и его сложное поведение в магнитном поле, определяются как электронами, так и двумя группами дырок. При увеличении содержания Se концентрация электронов возрастает и тип проводимости меняется от p - к n -типу.

Список литературы

- [1] J.K. Furdyna. J. Appl. Phys., **64**, R29 91988).
- [2] N.B. Brandt, V.V. Moshchalkov. Adv. Phys., **33**, 194 (1984).
- [3] И.И. Ляпилин, И.М. Цидильковский. УФН, **146**, 35 (1985).
- [4] Н.Б. Брандт, В.В. Мошchalkov, А.О. Орлов, Л. Скрбек, И.М. Цидильковский, С.М. Чудинов. ЖЭТФ, **84**, 1059 (1983).
- [5] Ж.Т. Исмаилов, В.А. Кульбачинский, С.М. Чудинов, Н.П. Гавалешко, П.Д. Марьянчук. ФТП, **22**, 375 (1988).

- [6] К.Р. Крылов, Н.К. Леринман, А.И. Пономарев, Л.Д. Сибирзянов, Н.Г. Шелушина, Н.П. Гавалешко, П.Д. Марьянчук. ФТП, **28**, 1382 (1994).
- [7] В.А. Кульбачинский, П.Д. Марьянчук, И.А. Чурилов. ФТП, **29**, 2007 (1995).
- [8] V.A. Kulbachinskii, P.D. Maryanchuk, I.A. Churilov, M. Inoue, M. Sasaki, H. Negishi, Y. Hara. *Semicond. Sci. Technol.*, **10**, 463 (1995).
- [9] I. Ivanov-Omskii, N.N. Berchenko, A.I. Elizarov. *Phys. St. Sol. (a)*, **103**, 11 (1987).
- [10] J. Mycielski. *Recent Development in Condensed Matter Physics*, ed. by J.T. DeVreese (Plenum, New York, 1981) v. 1, p. 725.
- [11] L.R. Gawron, J. Trylski. *Lecture Notes in Physics 152, Physics of Narrow Gap Semiconductors, Proceedings of the Lintz Conference 1981*, ed. by E. Gornik, H. Heinrich, L. Palmethofer (Berlin, Springer, 1982) p. 294.
- [12] A. Mycielski, J. Mycielski. *J. Phys. Soc. Jap., Suppl. A*, **49**, 807 (1989).
- [13] W.B. Johnson, J.R. Anderson, D.R. Stone. *Phys. Rev. B*, **29**, 6679 (1984).
- [14] A.B. Davydov, B.B. Ponikarov, I.M. Tsidilkovskii. *Phys. St. Sol. (b)*, **101**, 127 (1980).
- [15] W.A. Beck, J.R. Anderson. *J. Appl. Phys.*, **62**, 541 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

The influence of Se on galvanomagnetic properties of diluted magnetic semiconductors $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$

V.A. Kulbachinskii, I.A. Churilov, P.D. Maryanchuk, R.A. Lunin

Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract Galvanomagnetic properties of single crystals of a diluted magnetic semiconductor $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ $0.01 < y < 0.1$ with $x = 0.05$ and 0.14 have been investigated in the temperature range 300–4.2 K. The peculiarity of the Hall coefficient R_H and a complicated behaviour of R_H in magnetic field was quantitatively explained by the existence of three groups of carriers in $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$: electrons and two types of holes with different mobilities, for which temperature dependencies of concentration and mobility were obtained. The transition from p -type to n -type conductivity was observed with increasing of Se content, alongside with a simultaneous change of magnetoresistance from the negative to positive.