

- [1] Н. В. Аргинская, О. А. Матвеев. ФТП, 21, 542 (1987).
 [2] Н. В. Аргинская, О. А. Матвеев, А. В. Никитин, В. А. Сладкова. ФТП, 21, 676 (1987).
 [3] Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. М. (1985).
 [4] Г. Е. Пикус. Основы теории полупроводниковых приборов. М. (1965).
 [5] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах. М. (1973).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 6, 1993

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Pb_{1-x}Mn_xTe$

Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, А. Л. Мирец, В. П. Зломанов,
 О. И. Малеванная

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Академии наук Украины,
 252680, Киев, Украина

(Получено 29 декабря 1992 г. Принято к печати 26 января 1993 г.)

Легирование полупроводников переходными металлами представляет научный и практический интерес в связи с возможностью получения магниточувствительного, в том числе магнитоупорядоченного состояния кристалла для управления свойствами полупроводников при помощи магнитного поля.

В качестве объекта исследования выбран узкощелевой полупроводник $PbTe$, зонный спектр которого достаточно хорошо изучен [1]. Поэтому оказалось возможным сравнение свойств полупроводника с магнитной примесью и без нее. В настоящей работе исследованы образцы $Pb_{1-x}Mn_xTe$ ($0.024 \leq x < 0.18$).

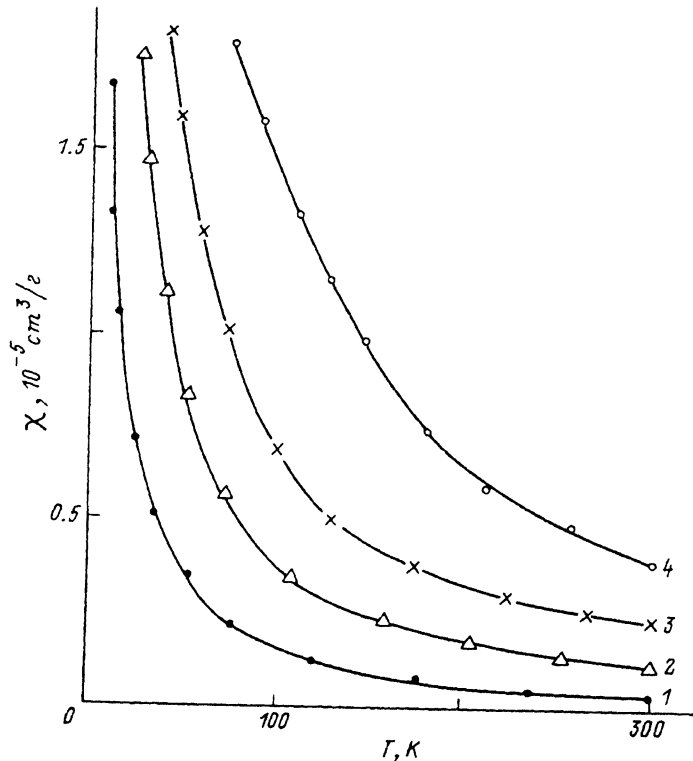
Монокристаллы твердого раствора $Pb_{1-x}Mn_xTe$ выращивали направленной кристаллизацией расплава в вакуумированных кварцевых ампулах. Исходную шихту готовили из Pb , Te и $MnTe$. Содержание марганца в кристаллах определяли с помощью атомно-адсорбционного анализа и по концентрационной зависимости параметра элементарной ячейки. Состав исследуемых образцов и результаты гальваномагнитных измерений приведены в таблице. Их однородность специально проверялась путем измерений магнитной восприимчивости (МВ) на образцах, вырезанных из различных участков шайбы $\varnothing 10$ мм; результаты совпадали в пределах погрешности эксперимента.

Наиболее полные данные о характере обменных взаимодействий могут быть получены путем исследований в области низких температур. Поэтому измерения магнитной восприимчивости проводились в диапазоне $4.2 \div 400$ К относительным методом Фарадея с помощью электронных микровесов с автоматической компенсацией по методике, описанной в [2].

На рисунке приведены температурные зависимости МВ серии образцов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ с различным содержанием Mn . Видно, что МВ содержит парамагнитный вклад, возрастающий при понижении температуры и увеличении количества Mn в твердом растворе.

Анализ экспериментальных данных по МВ проводился в предположении — аддитивности отдельных вкладов:

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



Температурная зависимость магнитной восприимчивости монокристаллов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ с различным содержанием марганца. Номера у кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

где χ_A — МВ кристаллической решетки $Pb_{1-x}Mn_xTe$, представляющая собой сумму вкладов диамагнетизма ионного состава, парамагнетизма Паули и поляризационного парамагнетизма Ван-Флека; χ_{Mn} — МВ примесных ионов Mn. Из зависимости $\chi = f(1/T)$ экстраполяцией к $T \rightarrow \infty$ была определена МВ кристаллической решетки $Pb_{1-x}Mn_xTe$. Для всех измеренных образцов χ_A диамагнитна и имеет совпадающие значения: $\chi_A = -2.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$.

В работах [3, 4] рассчитана МВ PbTe в предположении законов дисперсии Кейна и Диммока. Значение насыщения МВ при увеличении температуры образцов с малыми концентрациями электронов считалась соответствующим МВ кристаллической решетки и имело величину $\chi_{lat} = -3.2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$. Таким образом, диамагнетизм кристаллической решетки $Pb_{1-x}Mn_xTe$ имеет меньшую величину по сравнению с χ_{lat} PbTe. Это может быть связано с большей шириной запрещенной зоны и высокой концентрацией дырок $p \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в исследованных образцах по сравнению с PbTe, изученном в работах [3, 4] ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Кроме того, близость значений χ_{lat} для образцов с различным содержанием марганца свидетельствует о малом вкладе парамагнетизма Ван-Флека, связанного с искажением решетки PbTe при образовании твердого раствора.

Определенное значение χ_{lat} позволило выделить парамагнитную часть МВ χ_{Mn} , связанную с магнитной примесью. Парамагнитная восприимчивость исследованных образцов подчиняется закону Кюри $\chi_{Mn} = C/T$. Это можно объяснить равенством нулю орбитального момента иона марганца Mn^{2+} (s -состояние) и отсутствием обменного взаимодействия между магнитными центрами.

Концентрация парамагнитных ионов Mn^{2+} определялась с помощью соотношения

$$N_{Mn} (\text{см}^{-3}) = 4.8 \cdot 10^{24} \frac{\chi_{Mn} \rho T}{P_{\text{eff}}^2}$$

Здесь χ_{Mn} , P_{eff} — удельная парамагнитная восприимчивость, $\text{см}^3/\text{г}$, и магнитный момент ионов Mn^{2+} . При этом $P_{\text{eff}}^2 = \mu_B^2 g^2 S(S+1)$, μ_B — магнетон Бора, $S = 5/2$ — спин, $g = 2$ — фактор Ланде иона Mn^{2+} , T — температура, $^\circ\text{К}$, ρ — плотность, $\text{г}/\text{см}^3$. Вычисленные концентрации марганца приведены в таблице.

Параметры исследованных образцов $Pb_{1-x}Mn_xTe$ p -типа

№ образца	Состав x	N_{Mn} , 10^{21}см^{-3}	ρ , 10^{18}см^{-3}	μ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
1	0.024	1.02	2.0	3270
2	0.050	2.8	2.4	1200
3	0.088	5.3	4.3	307
4	0.182	8.8	4.0	218

Проводилась также оценка среднего расстояния между ионами Mn^{2+} . Даже при концентрации примеси $N_{Mn} \sim 5 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ среднее расстояние между ионами при условии равномерного распределения марганца в решетке составляет $\sim 20 \text{Å}$. Поскольку период решетки $a \sim 6 \text{Å}$, ионы марганца находятся на расстоянии 3—4 периодов решетки. Как следует из эксперимента, обменного взаимодействия между магнитными ионами не возникает. Это свидетельствует о том, что прямой обмен между Mn^{2+} в твердых растворах $Pb_{1-x}Mn_xTe$ несуществен. Магнитоупорядоченное состояние в монокристаллах $Pb_{1-x}Mn_xTe$ ($0.024 \leq x \leq 0.18$) может быть получено только при больших концентрациях носителей тока ($p > 10^{20} \text{см}^{-3}$) [5, 6], ибо косвенный обмен в исследованных образцах при концентрациях $p \sim 10^{18} \text{см}^{-3}$ является неэффективным.

Отметим, что концентрация парамагнитных ионов Mn^{2+} , определенная из МВ, в 4 раза меньше, чем следует из данных химического анализа. Это может быть связано с образованием микровключений антиферромагнитной фазы $MnTe$ с температурой Нееля $\sim 307 \text{К}$, которая не проявляется в измерениях МВ на фоне большого парамагнетизма изолированных ионов марганца.

В работах [7—9] при исследовании МВ ряда соединений $A^{IV}B^{VI}$, легированных марганцем, на зависимостях $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$ наблюдались изломы, которые были объяснены существованием в кристаллах магнитных кластеров, состоящих из двух (трех) ионов Mn^{2+} , взаимодействие между которыми носит антиферромагнитный характер. В наших экспериментах мы не наблюдали отклонений от линейности на зависимостях $\chi_{Mn}^{-1} = f(T)$. По нашему мнению, появление изломов связано со сложностью определения МВ кристаллической решетки и дальнейшего выделения χ_{Mn} из экспериментально измеряемой восприимчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ю. И. Равич, Б. А. Ефимов, И. А. Смирнов. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. М. (1968).
- [2] G. V. Lashkarev, D. F. Migley, A. D. Shevchenko. Phys. St. Sol. (b), 63, 663 (1974).
- [3] N. J. Akimenko, P. M. Starik, K. D. Tovstyuk. St. Sol. (b), 23, 93 (1967).
- [4] А. В. Бродовой, Г. В. Лашкарев. Магнитная восприимчивость $PbTe$. М. (1983). № P-8887/83.
- [5] А. В. Бродовой, Г. В. Лашкарев, М. В. Радченко, Е. И. Слынько, К. Д. Товстюк. ФТП, 18, 1547 (1984).
- [6] T. Story, G. Karczewski, R. Galazka. Semicond. Sci. a. Techn. 5, 138 (1990).

- [7] Д. Г. Андрианов, Н. М. Павлов, А. С. Савельев, В. И. Фистуль. ФТП, 14, 1202 (1980).
- [8] Д. Г. Андрианов, Ф. А. Гимельфарб, П. И. Кушнир, И. Е. Лопатинский, М. В. Пашковский, А. С. Савельев, В. И. Фистуль. ФТП, 10, 111 (1976).
- [9] Д. Г. Андрианов, С. А. Белоконов, В. М. Лашенков, А. С. Савельев, В. И. Фистуль, Г. П. Цискаришвили. ФТП, 12, 2224 (1978).

Редактор Т. А. Полянская
