

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

ЭЛЕКТРОННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕСИ ИНДИЯ  
В УЗКОЩЕЛЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$ ,  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ 

Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, А. Л. Мирец, Г. А. Зыков

Институт проблем материаловедения Академии наук Украины, 252180, Киев, Украина  
(Получено 15.10.1991. Принято к печати 13.03.1992)

Особенности зонной структуры узкощелевых твердых растворов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  и  $Cd_xHg_{1-x}Te$  обуславливают их применение в полупроводниковой фотоэлектронике и лазерной технике в инфракрасном диапазоне спектра. Управление их характеристиками связано с введением в них электрически активных примесей. Так, нетривиальные результаты были получены при изучении сплавов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , легированных In [1], выявившие возможности их практического использования.

В настоящей работе изучено влияние индия на магнитную восприимчивость (МВ) твердых растворов поликристаллов  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$  и монокристаллов  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ . Параметры исследованных образцов приведены в табл. 1, 2.

Исследования МВ проводились в интервале температур 4.2—300 К по методу Фарадея с помощью электронных микровесов с автоматической компенсацией по методике, описанной в [2].

Обычно в полупроводниках In выступает в качестве гетеровалентной примеси (валентность +3), замещая катион в решетке. В  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  индий является донором ( $In^{2+}$ ), и после ионизации превратится в  $In^{3+}$ . Однако известен ряд соединений [1], где In является одновалентным, поэтому возможно образование иона  $In^{1+}$ , акцептора. Таким образом, In в  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  может находиться в трех зарядовых состояниях:  $In^{1+}$ ,  $In^{2+}$ ,  $In^{3+}$ , при этом состояние  $In^{2+}$  является нейтральным по отношению к катионной подрешетке, а два других — заряженными.

Согласно [1], состояние  $In^{2+}$  оказывается энергетически невыгодным. Происходит реакция  $2In^{2+} \rightarrow In^{3+}$  и  $In^{1+}$ .

В рассматриваемой модели In одновременно должен присутствовать в двух зарядовых состояниях:  $In^{1+}$  и  $In^{3+}$ , но не в состоянии  $In^{2+}$ . В состоянии  $In^{2+}$  на примеси находится один электрон, не участвующий в химической связи, и неспаренный спин которого должен давать парамагнитный вклад в МВ, существенно зависящий от температуры ( $\chi \sim 1/T$ ).

МВ всех кристаллов  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te(In)$  диамагнитна (рис. 1). При увеличении концентрации легирующей примеси индия МВ уменьшается по абсолютной величине, хотя концентрация электронов в образцах также уменьшается. Для нелегированных кристаллов  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$  мы наблюдаем другую зависимость [3]: с уменьшением концентрации носителей тока диамагнитная МВ возрастает.

Таким образом, в образцах  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te(In)$  существует добавочный парамагнетизм, который не зависит от температуры и увеличивается с ростом концентрации In. Мы считаем, что это — поляризационный парамагнетизм Ван-Флека, который в сильной степени чувствителен к изменениям симметрии электронных оболочек и обусловлен заряженными центрами  $In^{1+}$  и  $In^{3+}$ .

№ образца	Концентрация электронов при 77 К, $10^{17} \text{ см}^{-3}$	Содержание индия по данным химического анализа, ат%
1	6.38	—
2	1.64	0.2
3	1.42	0.3
4	1.26	1.0
5	0.80	2.0

Таблица 2

Параметры исследованных образцов  $n$ - $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ , легированных индием

№ образца	Концентрация электронов при 77 К, $10^{18} \text{ см}^{-3}$	Концентрация In при 4.2 К по данным МВ, $10^{17} \text{ см}^{-3}$	Концентрация In по данным масс-спектрометрии, отн. ед.
6	9.38	4.4	3
7	11.3	75	5
8	13.8	190	15

Для всех исследованных образцов  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te(In)$  на температурной зависимости МВ при  $T < 30$  К наблюдается рост парамагнетизма в низкотемпературную область, что, по-видимому, связано с локализацией электрона на уровне вакансии Те. Согласно [4], для состава  $x = 0.18$  и концентраций электронов  $n = 1.5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  уровни вакансий Те расположены в запрещенной зоне на расстоянии  $\sim 20$  мэВ относительно края зоны проводимости.

На рис. 2 представлены зависимости МВ другого класса узкощелевых [5] полупроводников  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te(In)$ . Здесь, в отличие от  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te(In)$  при понижении температуры восприимчивость становится парамагнитной.

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

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

где  $\chi_A$  — МВ нелегированных кристаллов  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ ,  $\chi_{In}$  — МВ парамагнитных ионов индия.

Расчет  $\chi_A$  проводился по формулам, предложенным в [3], с использованием параметров зонного спектра  $Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te$ , приведенных в [6]. Значение  $\chi_A$ , по нашим оценкам, составляет  $1.5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$ .

Как отмечено выше, парамагнитными центрами являются неионизированные ионы  $In^{2+}$ . Их концентрацию при фиксированной температуре можно оценить по формуле

$$N_{In} = \chi_{In} 3\rho k T \mu_{эф}^{-2},$$

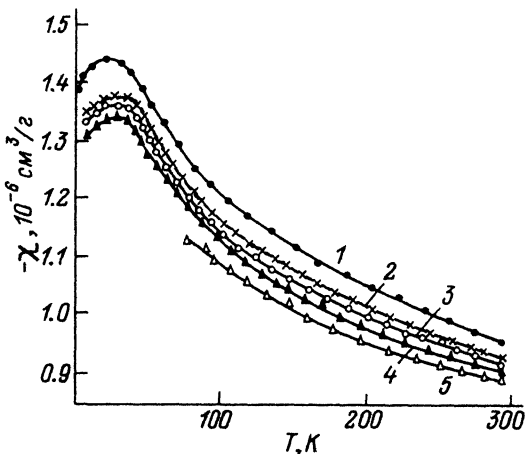


Рис. 1. Температурные зависимости МВ образцов  $Pb_{0.82}Sn_{0.18}Te$ , легированных индием. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

Рис. 2. Температурные зависимости МВ монокристаллов  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}(\text{In})$ . Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

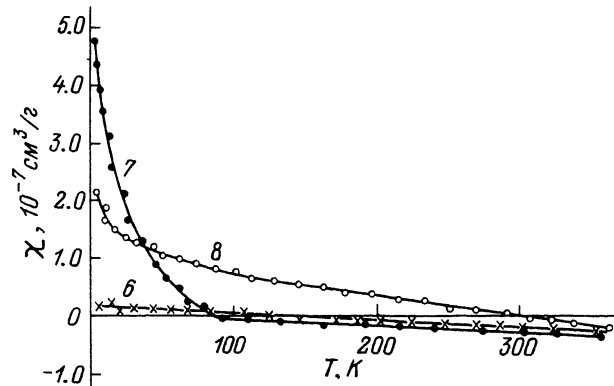
где  $\mu_{\text{эфф}}^2 = g^2 S(S+1)$  — эффективный магнитный момент,  $S = 1/2$  — спин,  $g = 2$  —  $g$  — фактор,  $\rho$  — плотность.

Значения  $N_{\text{In}}$  при  $T = 4.2$  К для всех исследованных образцов приведены в табл. 1, 2.

Нами проведен локальный микроанализ серии образцов  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$  с помощью двухканального лазерного масс-спектрометра, позволяющего осуществлять одновременно анализ на элементный состав и газосодержание с точностью  $\sim 10^{-4}$  ат%.

При этом установлена корреляция между величиной ориентационного парамагнетизма  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$  и содержанием индия в образцах. Так, образец с наибольшей концентрацией индия обнаруживает максимальное абсолютное значение МВ (см. табл. 2).

Таким образом, показано, что In в  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$  проявляет магнитные свойства в отличие от  $\text{Pb}_{0.82}\text{Sn}_{0.18}\text{Te}(\text{In})$ . Основной причиной неустойчивости иона  $\text{In}^{2+}$  в  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  является то, что ионы  $\text{In}^{3+}$  и  $\text{In}^{1+}$  заряжены относительно катионной подрешетки, и их энергия понижается за счет поляризации окружающей среды, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon_0 = 600$  при  $T = 300$  К) [6]. Для  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$   $\epsilon_0 = 18.5$  при 300 К [6], и парамагнитное состояние  $\text{In}^{2+}$  является устойчивым, что и подтверждается низкотемпературными измерениями МВ. Следует отметить, что температурный ход МВ парамагнитных ионов индия в  $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$  не подчиняется закону Кюри. Это может быть вызвано тем, что их концентрация изменяется с температурой. Такая ситуация может возникнуть, когда энергетический уровень индия близок к уровню Ферми, что может обуславливать захват или ионизацию электрона с  $\text{In}^{2+}$ , превращая его в немагнитное состояние.



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Б. Я. Мойжес, И. А. Драбкин. Проблемы современной физики, 128. Л. (1980).
- [2] G. V. Lashkarev, D. F. Migley, A. D. Shevchenko, K. D. Tovstyuk. Phys. St. Sol. (b), 63, 663 (1974).
- [3] Л. А. Фальковский, А. В. Бродовой, Г. В. Лашкарев. ЖЭТФ, 80, 334 (1981).
- [4] Ф. Ф. Сизов, В. Б. Орлецкий, М. В. Радченко. ФТП, 14, 2117 (1980).
- [5] Г. В. Лашкарев, А. В. Бродовой, М. В. Радченко, А. Л. Мирец, Е. С. Паренская, М. С. Никитин, Ю. И. Растегин, С. П. Колесник. ФТП, 26, 1768 (1992).
- [6] А. В. Любченко, Е. А. Сальков, Ф. Ф. Сизов. Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники, 254. Киев (1984).

Редактор: В. В. Чалдышев