

## Аномальные магнитные свойства твердых растворов $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$ при низких температурах

© А.В. Бродовой, В.А. Бродовой, Л.М. Кнорозок, В.Г. Колесниченко, С.П. Колесник

Институт проблем материаловедения,  
252680 Киев, Украина

(Получена 8 июля 1996 г. Принята к печати 18 марта 1997 г.)

В работе исследована магнитная восприимчивость твердых растворов  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$ . Установлено, что для состава  $x = 0.05$  при понижении температуры наблюдается десятикратное аномальное увеличение диамагнетизма, что можно объяснить возникновением металлических сверхпроводящих модификаций в объеме кристалла.

Известно, что ряд атомарных полупроводников и некоторых полупроводниковых соединений претерпевают под действием гидростатического давления фазовый переход в металлическое состояние. Образовавшиеся металлические фазы, как правило, являются сверхпроводящими.

Согласно [1], антимонид индия обладает несколькими полиморфными металлическими модификациями, а в работе [2] установлено, что при всестороннем давлении, близком к 23 Кбар и комнатной температуре, полупроводниковое соединение InSb испытывает переход диэлектрик–металл, что позволяет получить металлическое состояние при достаточно низких температурах путем постепенного уменьшения давления. Измерения электрического сопротивления показали, что металлическое состояние InSb является сверхпроводящим с температурой перехода в пределах  $2.1 \div 5.1$  К [3]. Известно также, что переход в металлическое состояние при гидростатическом давлении сопровождается изменением объема и параметров решетки кристалла. Сильное локальное искажение решетки кристалла, аналогичное воздействию высокого давления, можно получить при образовании системы твердых растворов на основе полупроводниковых соединений с различными атомными и ионными радиусами взаимодействующих элементов. Это позволяет высказать предположение о возможности образования металлического состояния в кристаллах InSb при сложном их легировании.

В настоящей работе проведено исследование магнитной восприимчивости (МВ) монокристаллов твердых растворов (ТР)  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  в диапазоне температур  $4.2 \div 300$  К и магнитных полей  $H \approx 0.1 \div 5$  кЭ. Образцы ТР были получены направленной кристаллизацией расплава InSb с добавлением Cd и Te. Суммарная концентрация примесей изменялась от  $1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  ( $x = 0.001$ ) до  $7.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  ( $x = 0.05$ ). Синтез осуществлялся в кварцевых ампулах, вакуумированных до давления  $10^{-3}$  Па. Расплав гомогенизировался при температуре  $1100^\circ\text{C}$  в течение 100 ч. Полученные слитки дополнительно подвергались гомогенизирующему отжигу при  $500^\circ\text{C}$  в течение  $100 \div 150$  ч. Равновесие считалось достигнутым, после того как микроструктура и микротвердость переставали изменяться и были одинаковы по всему слитку. Все образцы были *n*-типа. Гомогенность и

химический состав слитков контролировались методами оже-спектроскопии, рентгеноструктурного и химического анализов.

Измерения МВ выполнялись относительным методом Фарадея с помощью электронных микровесов с автоматической компенсацией по методике, описанной в работе [4]. МВ всех исследованных образцов при  $H = 4$  кЭ диамагнитна с восприимчивостью  $\chi = -(1-3.5) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$  и практически не зависит от температуры в интервале  $77 \div 300$  К (рис. 1).

Известно, что МВ кристаллов, не имеющих собственного магнитного момента, представляет собой сумму вкладов МВ кристаллической решетки и паулиевского парамагнетизма электронов. МВ электронов и ее зависимость от концентрации и состава ТР детально рассмотрены в работе [5] на основе теории Звадского [6]. Результаты расчетов МВ электронов  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  для составов в пределах  $0 \leq N_{\text{SdTe}} \leq 5$  мол% дали значение восприимчивости порядка  $10^{-9} \text{ см}^3/\text{г}$ , что на 2 порядка

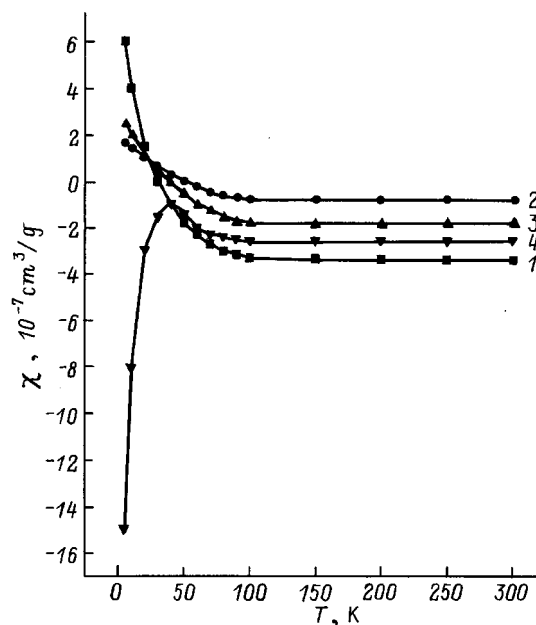
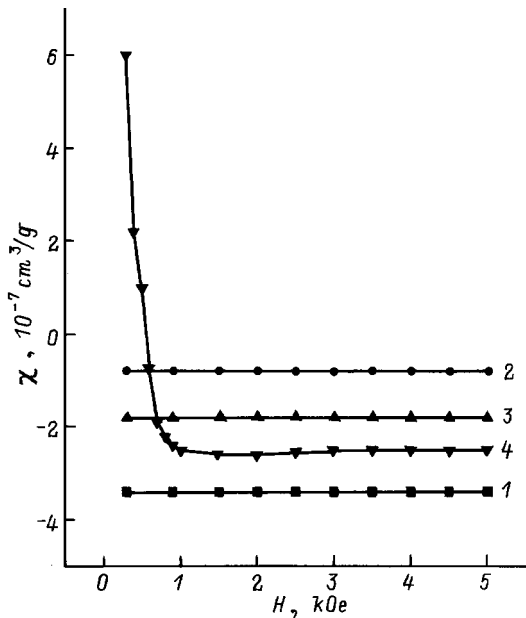


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости кристаллов твердых растворов  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  для значений  $x$ : 1 — 0.001, 2 — 0.01, 3 — 0.02, 4 — 0.05.



**Рис. 2.** Полевые зависимости магнитной восприимчивости кристаллов твердых растворов  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  при  $T = 300 \text{ K}$  для значений  $x$ : 1 — 0.001, 2 — 0.01, 3 — 0.02, 4 — 0.05.

меньше экспериментально наблюдаемого значение  $\chi$ . Это дает основание предположить, что основную роль в МВ  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  играет решеточная составляющая  $\chi$ .

При понижении температуры  $T < 77 \text{ K}$  для ТР с  $x = 0.001, 0.01, 0.02$  наблюдается увеличение парамагнетизма МВ, что, по-видимому, связано с парамагнетизмом дефектов кристаллической решетки, который был обнаружен в узкощелевых полупроводниках при исследовании электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в области температур менее  $20 \text{ K}$  [7].

На рис. 2 представлена типичная зависимость  $\chi$  от магнитного поля  $H$  для монокристаллов  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$ . Как видно из рисунка, для состава  $x = 0.05$  в области малых значений  $H$  магнитная восприимчивость резко возрастает, переходя из диамагнитного в парамагнитное состояние, что характерно для веществ, обладающих магнитным порядком. Можно предположить, что ответственными за полевую зависимость МВ в исследованных кристаллах являются нарушенные области, которые образуются вокруг скоплений примесных атомов. По-видимому, нарушенные области создаются при остывании кристалла, в результате больших упругих напряжений, возникающих из-за различия коэффициентов термического расширения у основного вещества и примесного скопления. Как показали результаты рентгеноструктурного анализа, для ТР  $(\text{InSb})_{0.95}(\text{CdTe})_{0.05}$  наблюдается максимальное сжатие решетки InSb, достигающее  $6.2 \cdot 10^{-2} \%$  по отношению к решетке чистого InSb, что, по-видимому,

приводит к возникновению металлических модификаций в объеме кристалла [2].

Измерения при  $78 \text{ K}$  показали, что характер зависимости  $\chi(H)$  не изменяется, а только незначительно (порядка  $5 \div 10\%$ ) увеличивается парамагнетизм исследованных образцов. На температурной зависимости МВ  $(\text{InSb})_{0.95}(\text{CdTe})_{0.05}$  (рис. 1, кривая 4) в области  $T = 4.2 \div 30 \text{ K}$  обнаружено десятикратное аномальное увеличение диамагнетизма, что, по-видимому, связано с появлением сверхпроводимости металлической модификации, образовавшейся в результате локальных деформаций решетки при легировании. Результаты измерений МВ хорошо коррелируют с исследованиями ЭПР, выполненными при  $T \leq 77 \text{ K}$ . В процессе исследования сверхпроводимости методом ЭПР выяснилась одна уникальная возможность этого метода, которая получила название СВЧ-диагностика [8,9]. Речь идет о нерезонансном отклике сверхпроводника на сверхвысоких частотах (СВЧ), зависящем от внешнего магнитного поля, который с высокой чувствительностью фиксируется с помощью спектрометра ЭПР. Такой отклик наблюдается лишь при переходе образца в сверхпроводящее состояние.

Для исследований ЭПР использовался радиоспектрометр SE/X-2544 "Radiopan" трехсантиметрового диапазона, специально оборудованный для измерений вблизи нулевых магнитных полей в широком интервале температур [10]. В кристаллах  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  ( $x = 0.001, 0.01, 0.02$ ) сигнал микроволнового поглощения вблизи  $H = 0$  обнаружен не был, в то время как для состава  $x = 0.05$  при  $T < 77 \text{ K}$  появляется "гистерезисный" сигнал микроволнового отклика, наблюдавшийся ранее в материалах с высокотемпературной сверхпроводимостью [10].

Таким образом, в настоящей работе показано, что в твердом растворе  $(\text{InSb})_{0.95}(\text{CdTe})_{0.05}$  в результате локальной деформации решетки образуются металлические фазы, что приводит к изменению знака МВ с отрицательного на положительный в области слабых магнитных полей, причем при гелиевых температурах эти фазы, по-видимому являются сверхпроводящими.

## Список литературы

- [1] M.D. Banus, M.S. Lavin. J. Appl. Phys., **40**, 409 (1969).
- [2] A. Jayaraman, R.C. Newton, G.C. Kennedy. Nature., **191**, 1288 (1961).
- [3] H.E. Bommel, A.J. Darnell, W.F. Libby, B.R. Tittman. Science., **139**, 1301 (1963).
- [4] G.V. Lashkarev, D.F. Migley, A.D. Shevchenko, K.D. Tovstyuk. Phys. St. Sol. (b), **63**, 663 (1974).
- [5] А.В. Бродовой, В.А. Бродовой, Н.Г. Вялый, Л.М. Кнорозок, А.Л. Мирец. Науч. зап. Нежинск. пед. ин-та. Сер. физ.-мат. наук, **14**, 73 (1994).
- [6] W. Zawadski. Phys. St. Sol. (b), **3**, 1421 (1963).
- [7] Ю.А. Браташевский, В.Д. Прозоровский, Ю.О. Харионовский. ФНТ, **3**, 120 (1977).

- [8] Д.Л. Лыфарь, Д.П. Моисеев, А.А. Мотуз. ФНТ, **13**, 876 (1987).
- [9] А.А. Бугай, Б.М. Булах, И.М. Зарицкий. В сб.: *Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости* (Свердловск, 1987) ч. 1, с. 213.
- [10] И.М. Зарицкий, А.А. Кончиц, С.П. Колесник. Препринт № 4-91, Ин-т полупроводников (Киев, 1991).

*Редактор Т.А. Полянская*

### **Abnormal magnetic properties of $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$ solid solutions at low temperatures**

A.V. Brodovoi, V.A. Brodovoi, V.G. Kolesnichenko,  
L.M. Knorosok, S.P. Kolesnik

Institute for Material Science,  
252680 Kiev, Ukraine

**Abstract** In the present paper the magnetic susceptibility of  $(\text{InSb})_{1-x}(\text{CdTe})_x$  solid solutions has been investigated. We have established that the ten-fold abnormal diamagnetism increase is observed for a composition  $x = 0.05$  when test temperature falls. This phenomenon can be explained in terms of the emergence of metal superconductive modifications in the bulk of the crystal.