

АНТИФЕРРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЗОНЫ ПРОВОДИМОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМИ МАГНИТНЫМИ МОМЕНТАМИ В $Pb_{1-x}Mn_xTe$

М.П.Бойко, А.В.Никорич, М.Э.Герреро (М.Е.Guerrero)

*Институт прикладной физики АН Молдовы
270028, Кишинев*

Поступила в редакцию 20 ноября 1991 г.

Обнаружены кондовские аномалии кинетических характеристик при $T < 50$ К в $Pb_{1-x}Mn_xTe < In >$ n -типа. Варьирование концентрации носителей ИК-подсветкой позволило исключить возможное влияние зонного рельефа и отнести наблюдавшиеся аномалии к антиферромагнитному характеру взаимодействия электронов зоны проводимости с локальными магнитными моментами.

Антиферромагнитный характер Mn-Mn-взаимодействия в полумагнитных полупроводниках $A_{1-x}Mn_xB^6$ в настоящее время надежно установлен в экспериментах по измерению магнитной восприимчивости¹, исследованию перехода в фазу спинового стекла² и др. Основной вклад в Mn-Mn-взаимодействие вносит сверхобмен через анионы, то есть с участием валентных оболочек халькогена. Кинетические характеристики зависят в первую очередь от взаимодействия другого типа, а именно, от взаимодействия носителей с локализованными d -электронами марганца. Константы такого взаимодействия, например, для теллурида свинца, легированного марганцем³⁻⁴, имеют разный знак для носителей валентной зоны и зоны проводимости: $J_v < 0$, $J_c > 0$. Различие в знаках J_v и J_c должно приводить к качественно отличающимся кинетическим характеристикам электронов и дырок. В частности, при $J > 0$ при низких температурах могут проявляться процессы рассеяния носителей на локальных магнитных моментах с переворотом спина⁵. Однако, низкотемпературные измерения явлений переноса проведены на образцах p -типа^{2,6}, либо n -типа с малой концентрацией марганца⁷. Целью данной работы было исследование рассеяния носителей в $Pb_{1-x}Mn_xTe$ n -типа с большим содержанием марганца.

В температурном интервале (4,2-100)К и в магнитных полях до 6 Тл измерены гальваномагнитные характеристики полумагнитных полупроводников $Pb_{0,95}Mn_{0,05}Te - 0,5$ ат.%In. Монокристаллические слитки были получены методом Бриджмена. Концентрация марганца контролировалась методом переменного-токовой полярографии. Образцы вырезались и травились стандартным способом. Геометрические размеры: $0,5 \times 0,5 \times 5$ мм. Было измерено 4 образца, вырезанных из центральных частей двух слитков. Так как электрофизические свойства всех образцов оказались очень близкими, ниже приводятся данные для одного из них. Состав сплава в соответствии с⁸ выбран таким образом, чтобы стабилизированный индием уровень Ферми находился при низких температурах у дна зоны проводимости. Введение индия в качестве легирующей примеси позволяет не только снизить концентрацию электронов, но и изменять ее внешней инфракрасной подсветкой. В качестве ИК источника использовался угольный резистор, расположенный на расстоянии 5 см над образцом и разогреваемый электрическим током до 30-70 К. Максимальные значения концентрации неравновесных фотоэлектронов для различных образцов данного сплава составляли $n = (4 - 7) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

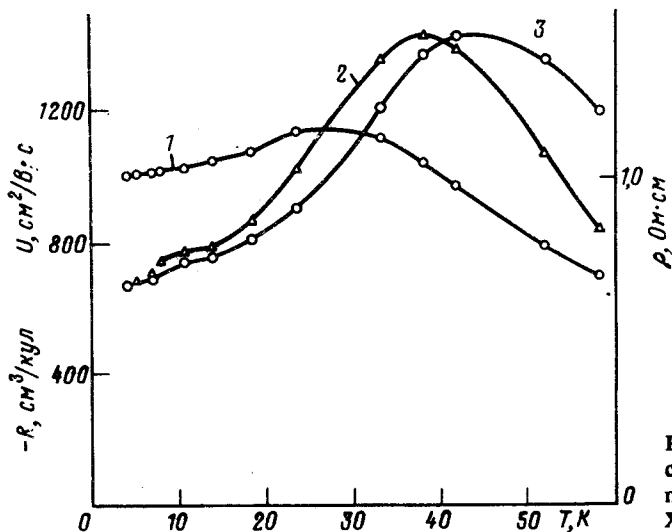


Рис. 1. Температурные зависимости: 1 - удельного сопротивления, 2 - коэффициента Холла, 3 - подвижности. Образец $\text{Pb}_{0,95}\text{Mn}_{0,05}\text{Te} - 0,5 \text{ ат.}\% \text{In}$

На рис.1 приведены температурные зависимости удельного сопротивления, коэффициента Холла и подвижности. Немонотонные зависимости $\rho(T)$ и $R(T)$ связаны со смещением стабилизированного уровня Ферми в запрещенную зону при повышении температуры. Аналогичные зависимости $R(T)$ измерены ранее в $\text{PbTe} < \text{In} >^9$, где минимум концентрации наблюдался при $T \sim 300 \text{ K}$. Новым результатом является немонотонная зависимость подвижности U от температуры. $U(T)$ проходит через максимум при $T = 40 \text{ K}$ и затем убывает при понижении температуры. Необычный вид имеют полевые зависимости холловского напряжения при низких температурах (рис.2). Экспериментальное значение холловского напряжения состоит из двух слагаемых: $V_x = V_1 + V_2$. Здесь V_1 - обычное холловское напряжение, линейно зависящее от напряженности магнитного поля, V_2 - дополнительное. В слабых полях $V_2 \sim H$ и насыщается при увеличении H . Отношение $R^* = [R(0) - R]/R$ (где $R(0)$ - экспериментальное значение холловской постоянной при $H = 0$, R - обычная холловская константа, $R = 1/en$, определенная из наклона dV_x/dH в поле 6 Тл) характеризует относительную величину дополнительного холловского вклада. Из температурной зависимости $R^*(T)$, представленной на рис.3, следует, что дополнительный холловский вклад проявляется в той же области температур, где имеется аномальная зависимость $U(T)$.

Полученные характеристики $U(T)$ и $V_x(T, H)$ имеют типичный кондовский вид. Положительное значение dU/dT есть аналог хорошо изученного эффекта увеличения сопротивления при понижении температуры в металлических сплавах с разбавленными магнитными моментами и объясняется соответствующим ростом интенсивности рассеяния с переворотом спина. Возникновение дополнительного холловского вклада при низких температурах в разбавленных сплавах связано с проявлением несимметричного рассеяния на локальных магнитных моментах в магнитном поле¹⁰. Следует отметить, что особенности холловских характеристик металлических сплавов менее изучены. Для интересующих нас в данном случае слабовыврожденных систем с разбавленными магнитными моментами детальный анализ полевых и температурных зависимостей коэффициента Холла еще не проведен. Тем не менее, для качественной иллюстрации наблюдавшихся в данной работе

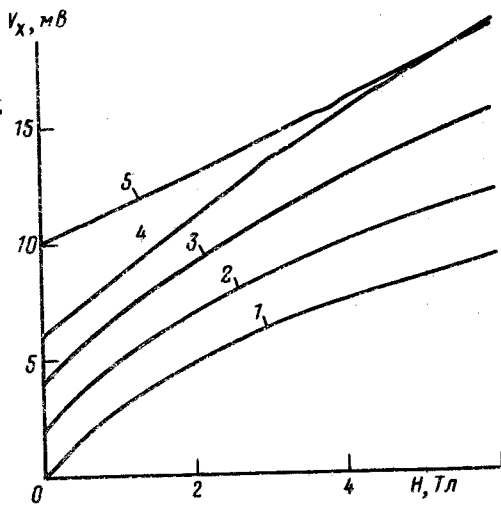


Рис.2

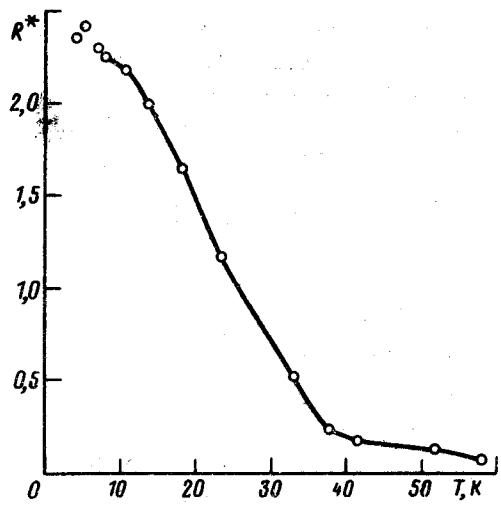


Рис.3

Рис. 2. Полевые зависимости холловского напряжения образца $\text{Pb}_{0,95}\text{Mn}_{0,05}\text{Te} - 0,5 \text{ ат.}\% \text{In}$. Ток образца равен 1 мА. 1 - $T = 4,2$; 2 - $T = 10,7$; 3 - $T = 23,4$; 4 - $T = 33,0$; 5 - $T = 51,9$ К. Кривые 2-5 сдвинуты по оси y на 2, 4, 6 и 10 мВ соответственно
Рис.3. Температурная зависимость R^* образца $\text{Pb}_{0,95}\text{Mn}_{0,05}\text{Te} - 0,5 \text{ ат.}\% \text{In}$

особенностей $V_x(H, T)$ воспользуемся результатами работы ¹⁰. Коэффициент Холла при $H \rightarrow 0$ представлен в виде:

$$R(0) = (1/en)(1 - \alpha), \quad (1)$$

где α есть сложная функция обменной спин-спиновой константы J , обменной спин-орбитальной константы λ , концентрации локальных магнитных моментов C_i , фермиевской энергии E_f , спина примеси S , температуры и ряда других параметров.

$$\alpha \sim \frac{C_i \lambda}{kT E_f^2} S(S+1) \Phi(J, S), \quad (2)$$

В сильных полях при не слишком больших значениях λ константа Холла стремится к своему нормальному значению. Учитывая, что в обозначениях ¹⁰ $R^* = \alpha$, можно считать, что соотношения (1,2) качественно отражают особенности холловских характеристик в $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Еще раз подчеркнем, что речь идет лишь о качественном соответствии, которое все же позволяет сделать вывод о проявлении несимметричного рассеяния на локальных магнитных моментах атомов марганца при низких температурах. В частности, как следует из (2), R^* должно уменьшаться при увеличении концентрации носителей. Внешняя ИК подсветка, как указывалось, позволяла менять концентрацию носителей. При увеличении концентрации до $n = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ R^* уменьшается до значения 0,7 при $T = 4,2$ К. Достаточно большие значения R^* при $n > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ позволили исключить из рассмотрения в качестве возможной причины аномалий $U(T)$, $V_x(H, T)$ локализацию носителей из-за флуктуаций зонного рельефа. Об этом же свидетельствует сохранение знака dU/dT при ИК подсветке. Более того, при увеличении концентрации неравновесных фотоэлектронов при $T < 20$ К наблюдается увеличение удельного сопротивления при понижении температуры, что связано с ослаблением зависимости $R(T)$.

Измеренные в данной работе низкотемпературные кинетические характеристики n - $\text{Pb}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ свидетельствуют о принципиальном различии транспортных свойств сплавов n - и p -типов. Причиной этого, как указывалось выше, является различие в знаках обменных констант для электронов и дырок. Отметим, что константы J_v и J_c имеют разные знаки и в сплавах $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. Так что в образцах n -типа возможно проявление аномалий, подобных наблюдавшимся в данной работе.

-
1. M.Gorska and J.R.Anderson, Phys. Rev. B 38, 9120 (1988).
 2. M.Escorne, A.Mauger, J.L.Tholence and R.Triboulet, Phys. Rev. B 29, 6306 (1984).
 3. И.И.Засавицкий, Л.Ковальчик, Б.Н.Мацонашвили, А.В.Сазонов, ФТП 22, 2118 (1988).
 4. H.Pascher, P.Rothlein, G.Bauer and M.von Ortenberg, Phys. Rev. B 40, 10469 (1989).
 5. А.А.Абрикосов, Основы теории металлов. М.: Наука, 1987.
 6. G.Toth, J.Y.Leloup and H.Rodot, Phys. Rev. B 1, 4573 (1970).
 7. Г.В.Лашкарев, Р.О.Кикодзе, М.В.Радченко, Е.И.Сльнько, И.З.Марчук, ФТП 13, 1548 (1979).
 8. Б.А.Акимов, А.В.Никорич, Л.И.Рябова, Н.А.Широкова, ФТП 23, 1019 (1989).
 9. А.А.Аверкин, В.И.Кайданов, Р.Б.Мельник, ФТП 5, 91 (1971).
 10. B.Giovannini, J. Low Temp. Phys. 11, 489 (1973).