

Глубокий уровень галлия в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe$

© Е.П. Скипетров[¶], Е.А. Зверева, В.В. Белоусов, Л.А. Скипетрова, Е.И. Слынько*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Физический факультет),
119899 Москва, Россия

*Институт проблем материаловедения Национальной академии наук Украины (Черновицкое отделение),
2740001 Черновцы, Украина

(Получена 1 февраля 2000 г. Принята к печати 14 февраля 2000 г.)

Исследованы гальваномагнитные свойства сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ ($0.04 \leq x \leq 0.08$), легированных галлием. Показано, что введение галлия индуцирует появление в запрещенной зоне сплавов глубокого примесного уровня, энергетическое положение которого зависит от содержания германия в сплаве. Предложена модель, предполагающая, что легирование галлием приводит к появлению двух различных уровней дефектов в энергетическом спектре сплавов.

Известно, что легирование теллурида свинца галлием приводит к появлению ряда необычных свойств, важнейшими из которых являются стабилизация уровня Ферми в запрещенной зоне и явление замороженной фотопроводимости при низких температурах [1]. Значительную часть экспериментальных результатов удается объяснить, предполагая, что введение галлия приводит к возникновению в запрещенной зоне $PbTe$ глубокого уровня ян-теллеровского типа, расположенного примерно на 70 мэВ ниже дна зоны проводимости. В то же время есть экспериментальные данные, указывающие на возможность существования мелкого метастабильного уровня, индуцированного галлием, под дном зоны проводимости [2], а также резонансного примесного уровня в зоне проводимости [3,4].

Ситуация становится еще более неясной, когда речь идет об энергетическом спектре легированных галлием сплавов на основе теллурида свинца. Небольшое количество разрозненных данных, имеющих в литературе [5–8], не дает, в частности, представления о наличии примесного уровня (или уровней) в энергетическом спектре сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe(Ga)$, $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ и тем более о том, как изменяется положение этого уровня при изменении состава сплава. Поэтому основной задачей настоящей работы являлось исследование гальваномагнитных эффектов в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ с различным содержанием германия с целью обнаружения индуцированных примесью глубоких уровней дефектов и построения энергетического спектра носителей заряда в легированных галлием сплавах.

Монокристаллические образцы $Pb_{1-x}Ge_xTe$ ($0.04 \leq x \leq 0.08$), легированные галлием ($C_{Ga} \approx 1.5\text{--}3 \text{ ат\%}$), которые исследовались в настоящей работе, были синтезированы сублимацией из паровой фазы. Содержание германия в легированных образцах контролировалось методом рентгеновской дифрактометрии, а концентрация примеси — по загрузке галлия в шихту с учетом распределения примеси по длине слитка. У всех образцов исследованы температурные зависи-

мости удельного сопротивления и коэффициента Холла ($B \leq 0.1 \text{ Тл}$) в диапазоне температур $4.2 \leq T \leq 300 \text{ К}$.

Типичные темновые температурные зависимости удельного сопротивления исследованных образцов с различным содержанием германия показаны на рис. 1. Очевидно, можно выделить две основные особенности: высокотемпературный активационный участок примесной проводимости, указывающий на существование глубокого примесного уровня галлия в запрещенной зоне сплавов, и аномально резкое уменьшение сопротивления при понижении температуры, связанное, по-видимому, с низкотемпературным переходом сплавов в ромбоэдрическую фазу, типичным для нелегированных сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ [8,9].

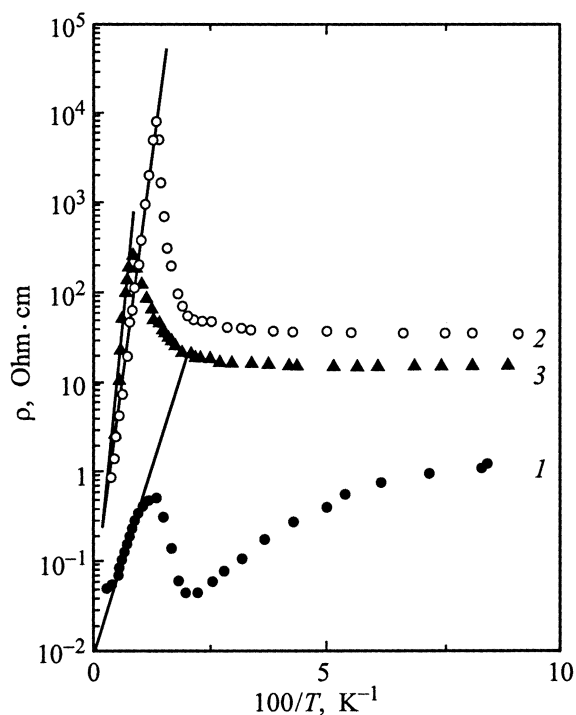


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ с различным содержанием германия, x : 1 — 0.04, 2 — 0.06, 3 — 0.08.

[¶] Факс: (095) 9328876
E-mail: skip@mig.phys.msu.ru

Аномальный максимум на зависимостях $\rho(1/T)$ монотонно смещается в сторону высоких температур при увеличении содержания германия в сплаве со скоростью, примерно соответствующей известной из литературных данных зависимости температуры фазового перехода T_c от содержания германия x в нелегированных сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe$ [9,10]. Однако величина T_c , определенная по положению максимума, отличается почти на 80 К от известных из литературы значений температуры фазового перехода в нелегированных сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe$. Ранее было установлено [10], что при легировании сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ ($x = 0.05$) индием понижение температуры фазового перехода достигало 50 К при введении 2.5 ат% примеси. Поэтому вполне возможно, что так же, как и в сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe$, легированных индием, существенное понижение температуры фазового перехода связано с появлением хаотически замороженных поляризованных дефектов, обладающих случайно ориентированными дипольными моментами, роль которых могут играть атомы галлия или комплексы с их участием [10,11]. Считается, что, благодаря поляризации ими некоторого объема кристалла, эти дефекты могут ослаблять молекулярное поле и понижать температуру фазового перехода.

По наклону активационных участков на зависимостях $\rho(1/T)$, используя выражение $\rho \approx \exp(\Delta E_{Ga}/kT)$, в исследованных сплавах определена энергия активации примесного уровня галлия. Результаты расчета представ-

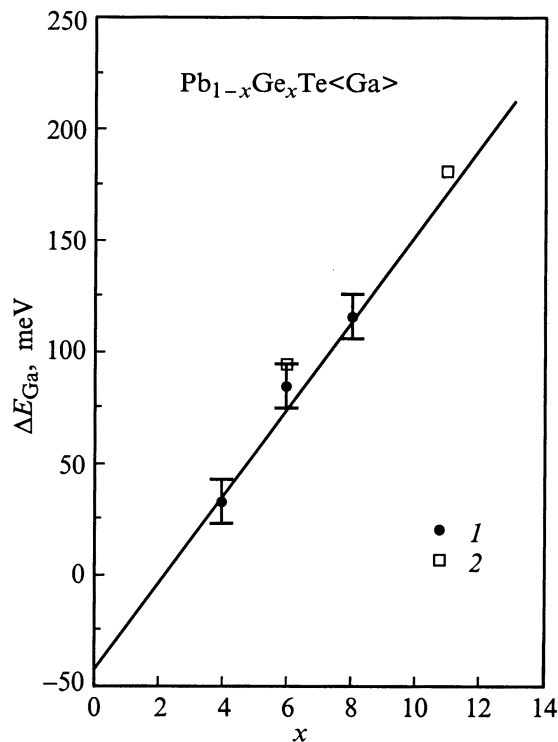


Рис. 2. Зависимость энергии активации примесного уровня галлия в $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ от содержания германия в сплаве: 1 — наши данные, 2 — расчет по данным [8].

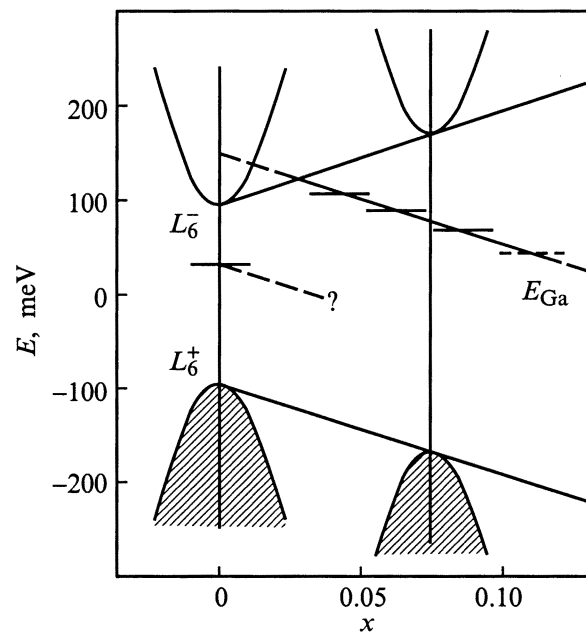


Рис. 3. Диаграмма перестройки энергетического спектра носителей заряда в кубической фазе $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ при изменении содержания германия в сплавах.

лены символами 1 на рис. 2 (символы 2 рассчитаны по зависимостям $\rho(1/T)$, полученным ранее в работе [8]). Установлено, что величина энергии активации линейно возрастает с ростом содержания германия в сплавах, а скорость изменения энергии активации практически совпадает со скоростью увеличения ширины запрещенной зоны в сплавах [12]: $d\Delta E_{Ga}/dx \approx 20$ мэВ/ат%.

Полученные результаты позволяют нам предложить модель перестройки энергетического спектра сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ при изменении состава сплава (рис. 3). Согласно этой модели, легирование галлием приводит к формированию в запрещенной зоне исследованных сплавов глубокого примесного уровня галлия, который движется практически линейно относительно дна зоны проводимости L_6^- при увеличении содержания германия в сплаве: $E_{Ga} - L_6^- \approx (45 - 1980x)$ мэВ. Экстраполяция зависимости $\Delta E_{Ga}(x)$ к значению $x = 0$ показывает (см. рис. 2), что в $PbTe(Ga)$ этот уровень должен быть резонансным и располагаться приблизительно на 45 мэВ выше дна зоны проводимости. Это обстоятельство позволяет предположить, что легирование теллурида свинца и сплавов на его основе галлием должно приводить к появлению в энергетическом спектре двух различных уровней дефектов. В теллуриде свинца это известный ранее глубокий уровень, расположенный на 70 мэВ ниже дна зоны проводимости [1], и резонансный уровень в зоне проводимости. Подобная ситуация реализуется, по-видимому, и в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe$, легированных другой примесью с переменной валентностью — гадолинием [13].

Необходимо отметить, что приведенная на рис. 3 диаграмма получена на основании расчетов энергии активации глубокого уровня по температурным зависимостям удельного сопротивления в кубической фазе исследованных сплавов. Поэтому в области низких температур для сплавов с содержанием германия $x > 0.01$ эта диаграмма может считаться виртуальной, так как при низких температурах ($T < T_c$) кубическая структура не реализуется. Тем не менее для PbTe и сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ с содержанием германия $x < 0.01$, имеющих кубическую решетку во всем исследованном температурном интервале, приведенная энергетическая диаграмма вполне реальна. Поэтому вывод о существовании индуцированного галлием резонансного уровня в зоне проводимости этих материалов, с нашей точки зрения, не вызывает сомнений.

В заключение отметим, что, согласно диаграмме, представленной на рис. 3, энергетическое положение уровня галлия относительно потолка валентной зоны остается практически неизменным. К сожалению, надежность этого утверждения непосредственно связана с точностью экспериментального определения скорости изменения ширины запрещенной зоны при изменении концентрации германия в сплавах. Но данные для кубической фазы сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$ практически отсутствуют и при построении энергетической диаграммы мы вынуждены были использовать среднюю для этих сплавов величину dE_g/dx в ромбоэдрической фазе [12].

Список литературы

- [1] В.А. Акимов, А.В. Дмитриев, Д.Р. Хохлов, Л.И. Рябова. Phys. St. Sol. (a), **137**, 9 (1993).
- [2] А.И. Белогорокхов, И.И. Иванчик, Д.Р. Хохлов, С. Пономарев. Brazil. J. Phys., **26**, 308 (1996).
- [3] Г.С. Бумарина, Б.Ф. Грузинов, Т.Т. Дедегкаев, И.А. Драбкин, Т.Б. Жукова, Е.Я. Лев. Неорг. матер., **16**, 2136 (1980).
- [4] Z. Feit, D. Eger, A. Zemel. Phys. Rev. B, **31**, 3903 (1985).
- [5] Г.С. Бушмарина, Б.Ф. Грузинов, И.А. Драбкин, Е.Я. Лев, И.В. Нельсон. ФТП, **11**, 1874 (1977).
- [6] Б.А. Акимов, Н.Б. Брандт, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов, С.М. Чудинов, О.Б. Яценко. Письма ЖЭТФ, **31**, 304 (1980).
- [7] А.А. Аверкин, Г.С. Бушмарина, И.А. Драбкин, Ю.З. Санфиоров. ФТП, **15**, 197 (1981).
- [8] Б.А. Акимов, А.В. Албул, И.И. Иванчик, Л.И. Рябова, Е.И. Слынько, Д.Р. Хохлов. ФТП, **27**, 351 (1993).
- [9] S. Такаока, К. Мурасе. Phys. Rev. B, **20**, 2823 (1979).
- [10] А.И. Лебедев, Х.А. Абдуллин. ФТП, **18**, 624 (1984).
- [11] А.П. Леванюк, В.В. Осипов, А.С. Сигов, А.А. Собянин. ЖЭТФ, **76**, 345 (1979).
- [12] G.A. Antcliffe, R.A. Chapman. Appl. Phys. Lett., **26**, 576 (1975).
- [13] T. Story, M. Gorska, A. Lusakowski, M. Arciszewska, W. Dobrowolski, E. Grodzicka, Z. Golacki, R.R. Galazka. Phys. Rev. Lett., **77**, 3447 (1996).

Редактор Т.А. Полянская

Gallium-induced deep level in $Pb_{1-x}Ge_xTe$ alloys

E.P. Skipetrov, E.A. Zvereva, V.V. Belousov,
L.A. Skipetrova, E.I. Slyn'ko*

M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

*Institute of Material Science Problems,
Ukrainian National Academy of Sciences
274001 Chernovtsy, the Ukraine

Abstract Galvanomagnetic properties of gallium-doped $Pb_{1-x}Ge_xTe$ ($0.04 \leq x \leq 0.08$) alloys have been investigated. It is shown that gallium doping induces a deep impurity level in the forbidden band, the energy position of which depends on the germanium content in the alloy. A model has been proposed assuming that the doping with gallium leads to occurrence of two different defect levels in the energy spectrum of the alloys.