

О стабилизации уровня Ферми в сплавах на основе теллурида свинца, легированных галлием

© Е.П. Скипетров[¶], Е.А. Зверева, Л.А. Скипетрова, О.С. Волкова, Е.И. Слынько*

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

* Институт проблем материаловедения Национальной академии наук Украины, Черновицкое отделение,
274001 Черновцы, Украина

(Получена 19 марта 2001 г. Принята к печати 19 апреля 2001 г.)

Исследовано влияние легирования галлием и облучения быстрыми электронами на гальваномагнитные эффекты в n - $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ ($0.04 \lesssim x \lesssim 0.06$). Обнаружены переходы к металлическому типу проводимости как при увеличении содержания примеси, так и под действием облучения. Сделан вывод об отсутствии стабилизации уровня Ферми уровнем примеси и показано, что легирование галлием и электронное облучение являются эффективными взаимодополняющими средствами управления электрофизическими параметрами сплавов.

В настоящее время одним из важнейших свойств полупроводников $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, легированных примесями с переменной валентностью, считается стабилизация уровня Ферми глубоким уровнем примеси [1–3]. Наиболее ярко этот эффект проявляется в сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, легированных In, в которых введение других примесей, собственных или радиационных дефектов не влияет на положение уровня Ферми и электрофизические свойства сплавов до тех пор, пока их концентрация не превышает концентрацию In [1,2,4].

Примесь галлия, возможно, является исключением из общего правила.

Во-первых, установлено, что концентрация носителей заряда в $\text{PbTe}(\text{Ga})$ аномальным образом зависит от содержания примеси [5–8]. Сначала при введении галлия наблюдается уменьшение концентрации дырок. Затем в достаточно узкой (по концентрации Ga) области концентрация носителей заряда близка к собственной, а уровень Ферми оказывается стабилизированным глубоким примесным уровнем $E_{\text{Ga}1}$, расположенным в запрещенной зоне [2]. Однако при дальнейшем увеличении содержания Ga происходит p – n -конверсия, концентрация электронов увеличивается и, по-видимому, стремится к насыщению.

Во-вторых, электронное облучение сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{Ga})$ ($x = 0, 0.19, 0.23$) потоком Φ приводит к p – n -конверсии и монотонному увеличению концентрации электронов n с аномально высокой скоростью ($dn/d\Phi \approx 4 \text{ см}^{-1}$) [9,10], примерно на порядок превышающей значения, характерные для нелегированных полупроводников $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ [11].

Указанные аномалии, возможно, связаны с существованием второго глубокого уровня E_{Ga} , индуцированного примесью галлия, расположенного в зоне проводимости теллурида свинца [12]. В сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ по мере увеличения концентрации германия этот уровень приближается к дну зоны проводимости и при $x \gtrsim 0.03$ вы-

ходит в запрещенную зону. Поэтому можно ожидать, что увеличение содержания галлия и электронное облучение будут слабо влиять на электрофизические параметры кристаллов в результате стабилизации уровня Ферми глубоким уровнем E_{Ga} . Для проверки этого предположения в настоящей работе исследованы гальваномагнитные эффекты в сплавах $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ ($x = 0.04, 0.06$), в которых глубокие уровни галлия расположены в запрещенной зоне, при вариации концентрации галлия и потока электронного облучения.

Монокристаллические образцы n - $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ (с концентрацией галлия $C_{\text{Ga}} \approx 1.5$ – 3 мол%), исследованные в настоящей работе, были синтезированы сублимацией из паровой фазы. Содержание германия в образцах контролировалось методом рентгеновской дифрактометрии, а концентрация примеси определялась по загрузке галлия в шихту с учетом распределения примеси по длине слитка. Часть образцов облучалась при комнатной температуре на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-6 (энергия электронов $E = 6$ МэВ, $d\Phi/dt \approx 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $\Phi \lesssim 2.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$). До облучения и при нескольких потоках облучения у каждого образца исследовались температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла (магнитное поле $B \lesssim 0.1$ Тл, диапазон температур $4.2 \leq T \lesssim 300$ К). Основные параметры образцов при $T = 4.2$ К приведены в таблице.

Исследование гальваномагнитных эффектов показало, что электрофизические свойства сплавов сильно зависят как от концентрации галлия, так и от потока электронного облучения. Образцы с низким содержанием легирующей примеси оказались достаточно высокоомными. Температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_H имеют полупроводниковый характер (рис. 1, 2, кривые 1) с отчетливым активационным участком примесной проводимости, указывающим на существование глубокого, индуцированного галлием, уровня E_{Ga} в запрещенной зоне сплавов [12]. При самых низких температурах ($T < 20$ К) удельное сопротивление выходит на насыщение, холловская подвижность

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

Параметры исследованных образцов $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}\langle\text{Ga}\rangle$ при $T = 4.2\text{ К}$ до и после облучения быстрыми электронами

Образец	x	Концентрация примеси C_{Ga} , мол%	Поток облучения Φ , 10^{16} см^{-2}	Удельное сопротивление ρ , Ом·см	Концентрация электронов n , см^{-3}	Подвижность μ_{H} , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
Ge-4-7	0.04	1.5	0	$9.1 \cdot 10^2$	$< 3 \cdot 10^{14}$	< 1
			1.2	$4.8 \cdot 10^{-1}$	$2.1 \cdot 10^{16}$	$6.2 \cdot 10^2$
			2.4	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$9.3 \cdot 10^{16}$	$4.5 \cdot 10^3$
Ge-4-7'	0.04	1.5	0	2.5	$1.4 \cdot 10^{15}$	$< 2 \cdot 10^3$
Ge-4-9	0.04	2	0	$9.9 \cdot 10^{-1}$	$1.6 \cdot 10^{16}$	$4.0 \cdot 10^2$
			1.2	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{17}$	$1.4 \cdot 10^5$
Ge-4-3	0.04	3	0	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$6.8 \cdot 10^{17}$	$4.4 \cdot 10^2$
			1.2	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{18}$	$6.5 \cdot 10^2$
Ge-6-2	0.06	1.5	0	4.8	$< 10^{13}$	$< 4 \cdot 10^3$
Ge-6-4	0.06	1.5	0	$3.4 \cdot 10$	$< 4 \cdot 10^{11}$	$< 3 \cdot 10^3$
			1.2	4.6	$< 2 \cdot 10^{15}$	$< 5 \cdot 10$

носителей заряда быстро падает, а сигнал с холловских контактов исчезает (рис. 1, 2, кривые 1). Такое поведение связано, очевидно, со сменой основного механизма проводимости, которым при низких температурах могут быть проводимость по примесному уровню E_{Ga} или поверхностная проводимость.

С ростом содержания галлия в сплавах ρ и абсолютная величина R_{H} при низких температурах уменьшаются более чем на 3 порядка, активационный характер их температурных зависимостей постепенно меняется на

металлический (рис. 1, 2, кривые 2–4). Концентрация свободных электронов, рассчитанная по величине коэффициента Холла, увеличивается и достигает значения $n \approx 7 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Очевидно, что такой характер изменения электрофизических параметров при увеличении содержания легирующей примеси свидетельствует о переходе образцов из диэлектрического в металлическое состояние с зонной проводимостью электронного типа в качестве основного механизма проводимости во всем исследованном температурном интервале.

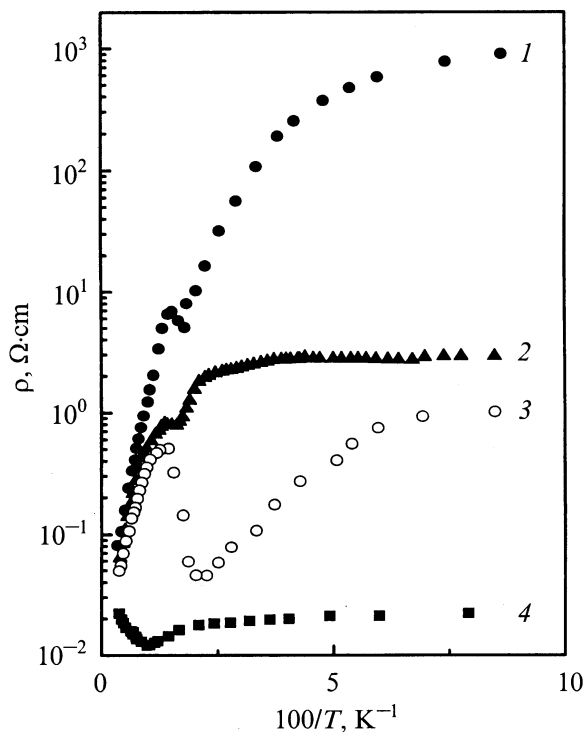


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления в сплаве $\text{Pb}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}\text{Te}\langle\text{Ga}\rangle$ при изменении содержания галлия в образцах C_{Ga} , мол%: 1, 2 — 1.5, 3 — 2, 4 — 3.

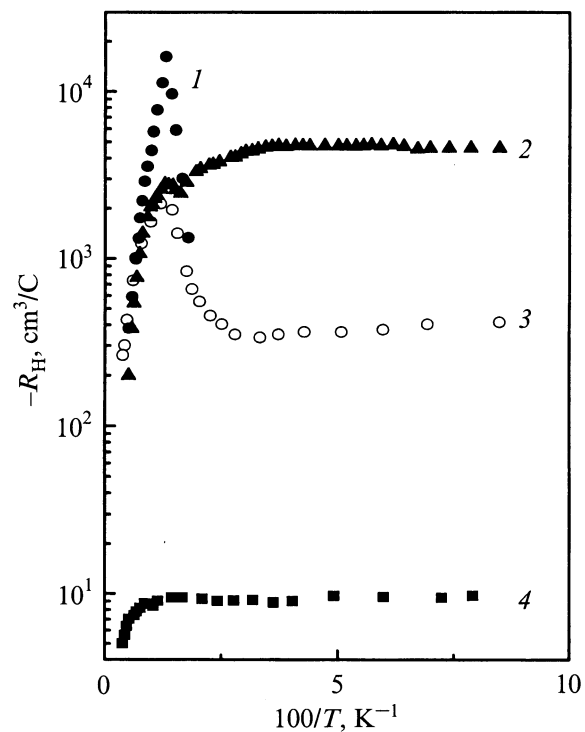


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла в сплаве $\text{Pb}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}\text{Te}\langle\text{Ga}\rangle$ при изменении содержания галлия в образцах. Цифры у кривых обозначают то же, что и на рис. 1.

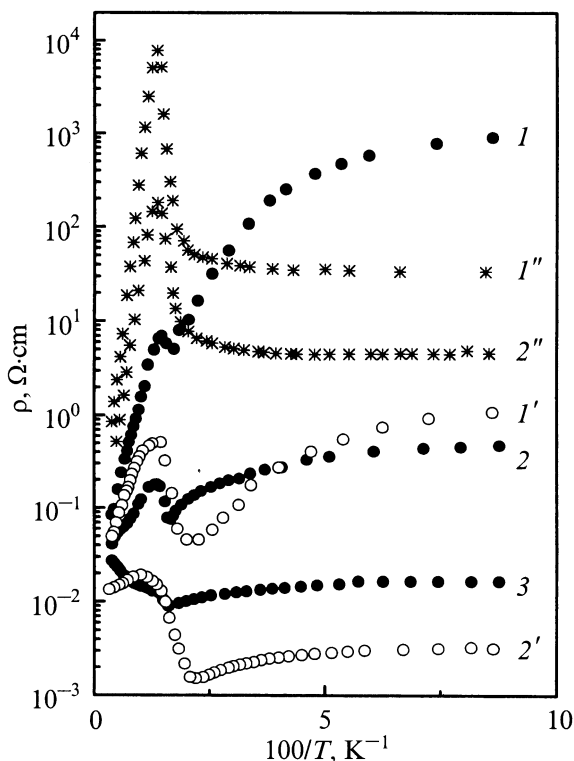


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления в облученных электронами сплавах $Pb_{1-x}Ge_xTe(Ga)$ при вариации потока облучения. 1–3 — образец Ge-4-7 ($C_{Ga} = 1.5$ мол%); 1', 2' — образец Ge-4-9 ($C_{Ga} = 2$ мол%); 1'', 2'' — образец Ge-6-4 ($C_{Ga} = 1.5$ мол%). $\Phi, \text{см}^{-2}$: 1, 1' — 0; 2, 2', 2'' — $1.2 \cdot 10^{16}$; 3 — $2.4 \cdot 10^{16}$.

Электронное облучение исследованных сплавов приводит к таким же изменениям характера температурных зависимостей удельного сопротивления и коэффициента Холла, что и рост содержания легирующей примеси (рис. 3). Хорошо видно, что с ростом потока облучения происходит переход к металлическому типу проводимости. Можно предположить, что так же, как и в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(Ga)$ [10], облучение приводит к генерации радиационных дефектов преимущественно донорного типа и возникновению соответствующего резонансного уровня донорного типа E_d в зоне проводимости. Тогда при облучении электроны с уровня E_d сначала заполняют свободные состояния на примесном уровне E_{Ga} , затем происходит переход диэлектрик–металл, уровень Ферми поднимается в зону проводимости, а концентрация электронов может увеличиваться вплоть до стабилизации уровня Ферми донорным уровнем E_d .

Необходимо, однако, отметить, что, как и в сплавах $Pb_{1-x}Sn_xTe(Ga)$, скорость изменения концентрации электронов при облучении оказалась аномально высокой. Оценки показывают, что она составляет величину $dn/d\Phi = 5\text{--}6 \text{см}^{-1}$, что трудно объяснить, учитывая лишь возникновение резонансного радиационного уровня E_d . В качестве дополнительного механизма, от-

ветственного за высокую скорость дефектообразования, может, по-видимому, выступать повышение однородности распределения галлия в решетке и увеличение концентрации электрически активных атомов примеси под действием облучения [10].

Характер изменения электрофизических параметров исследованных сплавов позволяет сделать вывод об отсутствии стабилизации уровня Ферми уровнем галлия E_{Ga} . Увеличение концентрации галлия и концентрации радиационных дефектов приводит к переходу уровня Ферми в зону проводимости и монотонному увеличению концентрации электронов. Легирование галлием и электронное облучение являются эффективными взаимодополняющими средствами управления электрофизическими свойствами сплавов $Pb_{1-x}Ge_xTe$, позволяя осуществлять тонкую подстройку положения уровня Ферми, а также добиваться более однородного распределения примеси по объему образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Научной программы "Университеты России" и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 00-15-96784, 01-02-17446).

Список литературы

- [1] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145**, 51 (1985).
- [2] В.А. Akimov, A.V. Dmitriev, D.R. Khokhlov, L.I. Ryabova. Phys. St. Sol. (a), **137**, 9 (1993).
- [3] W. Dobrowolski. Proc. 9th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors, ed. by N. Puhlmann, H.-U. Muller, M. von Ortenberg (Berlin, Germany, 2000) p. 39.
- [4] Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова, А.Г. Хорош. ФТП, **28**, 815 (1994).
- [5] Г.С. Бушмарина, Б.Ф. Грузинов, И.А. Драбкин, Е.Я. Лев, И.В. Нельсон. ФТП, **11**, 1874 (1977).
- [6] Г.С. Бушмарина, Б.Ф. Грузинов, Т.Т. Дедегкаев, И.А. Драбкин, Т.Б. Жукова, Е.Я. Лев. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **16**, 2136 (1980).
- [7] Ф.Ф. Сизов, С.В. Пляцко, В.М. Лакеев. ФТП, **19**, 592 (1985).
- [8] Z. Feit, D. Eger, Z. Zemel. Phys. Rev. B, **31**, 3903 (1985).
- [9] Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова, Д.В. Пелехов, Л.И. Рябова, В.И. Сидоров. ФТП, **28**, 1626 (1994).
- [10] Е.П. Скипетров. ФТП, **29**, 1416 (1995).
- [11] Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров. ФНТ, **22**, 870 (1996).
- [12] Е.П. Скипетров, Е.А. Зверева, В.В. Белоусов, Л.А. Скипетрова, Е.И. Слынько. ФТП, **34**, 932 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

On Fermi level pinning in the alloys based on the lead telluride doped with gallium

E.P. Skipetrov, E.A. Zvereva, L.A. Skipetrova,
O.S. Volkova, E.I. Slyn'ko*

Low Temperature Physics Department,
Faculty of Physics, Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

* Institute of Material Science Problems,
Chernovtsy Department,
274001 Chernovtsy, Ukraine

Abstract Effect of doping with gallium and fast electron irradiation on the galvanomagnetic properties of $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}\langle\text{Ga}\rangle$ ($0.04 \lesssim x \lesssim 0.06$) alloys was investigated. The transitions to the metal-type conductivity were obtained both by increasing the impurity content and under the electron irradiation. The conclusion has been drawn that Fermi level pinning by the impurity level does not take place while the doping with gallium as well as the electron irradiation may serve as effective mutually complementary tools for modifying of electrical properties of alloys.