

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК In НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ

© С.А.Немов, С.Ф.Мусихин, В.И.Прошин

Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 22 мая 1995 г. Принята к печати 31 мая 1995 г.)

Исследованы электропроводность, коэффициенты Холла и термоэдс в диапазоне температур (77–400) К в тонких пленках твердых растворов  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  ( $x = 0-0.2$ ). Пленки толщиной (200–1200) Å получены методом лазерного напыления на слюдяных подложках и имеют холловские концентрации дырок  $p = (2 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{21}) \text{ см}^{-3}$  и подвижность  $R\sigma = (1-30) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , удельное сопротивление в диапазоне  $\rho = (2.5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}) \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Все эти параметры слабо зависят от температуры. На изотермах зависимости термоэдс от концентрации дырок обнаружен характерный минимум вблизи  $p \simeq 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , свидетельствующий о сложном строении валентной зоны твердого раствора.

Исследованные пленки получены методом импульсного лазерного напыления [1,2] из шихты  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  (объемные поликристаллы) на слюдяные подложки, имели толщины  $d \approx (200-1200) \text{ Å}$ .

Были исследованы основные кинетические коэффициенты: удельной электропроводности  $\sigma$ , Холла  $R$  и термоэдс  $S$  в диапазоне температур (77–400) К. Все пленки обладали дырочной проводимостью (причем знаки коэффициентов  $R$  и  $S$  совпадали), имели холловские концентрации дырок  $p \approx (2 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{21}) \text{ см}^{-3}$ . Концентрация дырок определялась из данных по эффекту Холла при комнатной температуре по формуле  $p = (eR)^{-1}$ .

По данным оже-спектроскопии [2] пленки твердых растворов  $(\text{Sn}_{1-z}\text{Ge}_z)_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ , полученные методом лазерного напыления, характеризуются неоднородным распределением компонентов по толщине, в особенности, примеси In. Однако сравнительный анализ кинетических коэффициентов в пленках и объемных образцах, выполненный в работах [1–3], показал, что состав шихты в целом удовлетворительно сохраняется и в составе пленок — при изготовлении сильно легированных полупроводников  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  с помощью лазерной технологии.

Электrofизические параметры исследованных тонких пленок  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  при комнатной температуре

№ пленки	Содержание In в шихте $x$ , ат%	Толщина $d$ , Å	$p$ , $10^{20}\text{см}^{-3}$	$R\sigma$ , $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\rho$ , $10^{-4}\text{Ом}\cdot\text{см}$
62	5	200	28	1	2.5
75	10	500	2.3	34	8
87	16	450	2.3	17	16
120	16	1200	6.7	3	29
66	20	200	5.4	16	7

*Примечание.* Толщина пленок  $d$  оценивалась по времени полного стравливания слоя пучком ионов аргона [2,3].

Как и в других исследованных ранее [1-3] пленках твердых растворов  $(\text{Sn}_{1-z}\text{Ge}_z)_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ , коэффициент Холла имеет слабую температурную зависимость. Величина коэффициента Холла отражает полную концентрацию дырок в валентной зоне пленок твердых растворов  $(\text{Sn}_{1-z}\text{Ge}_z)\text{Te}:\text{In}$  [3].

Основные электрофизические параметры исследованных пленок приведены в таблице. Как видно из данных, приведенных в ней, варьируя содержание In в шихте твердого раствора, с помощью лазерной технологии удается в значительных пределах изменять концентрацию дырок и положение уровня Ферми в валентной зоне в тонких пленках  $\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$ . Сопоставление кинетических коэффициентов  $R$ ,  $S$ ,  $\sigma$  в наших пленках с данными для объемных поликристаллов близкого состава, изготовленных металлокерамическим методом [4], обнаруживает близость численных значений этих параметров. Это свидетельствует об удовлетворительном согласии составов шихты и пленки.

Для полученных методом лазерного напыления пленок твердого раствора  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  характерны низкие холловские подвижности  $R\sigma \approx (1-30)\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  и удельное сопротивление  $\rho \approx (2.5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3})\text{Ом}\cdot\text{см}$ , слабо зависящее от температуры (рис. 1). Наблюдаемые особенности в зависимостях  $R\sigma$  и  $\rho$  от температуры, по-видимому, связаны с большим вкладом рассеяния дырок на примесях (на атомах In) и на собственных точечных дефектах, создающих высокие концентрации дырок в материалах на основе SnTe. Учитывая тот факт, что пленки являются тонкими, можно полагать, что существенную роль играет и поверхностное рассеяние. Кроме того, возможно снижение подвижности дырок за счет их резонансного рассеяния в полосу квазилокальных примесных состояний In (подобно тому, что наблюдалось в SnTe:In [5]). Оценки величины подвижности при резонансном рассеянии по формуле Брейта-Вигнера [6] дают значения  $(R\sigma)_{\text{res}} \approx (1-10)\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , близкие к экспериментальным.

Наиболее интересными представляются данные по термоэдс. Как видно из рис. 2, изотермы зависимости коэффициента термоэдс от концентрации дырок (при всех температурах) имеют ярко выраженную особенность вблизи  $p \approx 7 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$ . Появление подобных аномалий в термоэдс обычно связано с прохождением уровня Ферми  $\varepsilon_F$  через критическую точку в спектре плотности состояний.

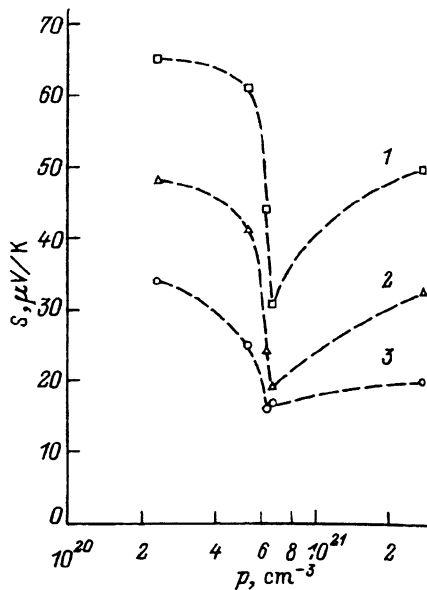
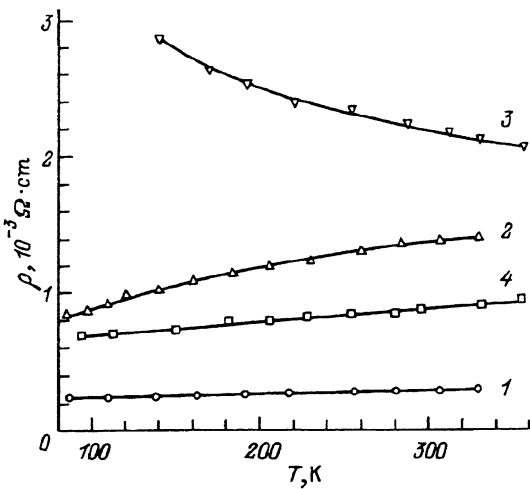


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho$  в пленках  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  с составом  $x$ : 1 — 0.05, 2 — 0.10, 3 — 0.16, 4 — 0.20.

Рис. 2. Зависимости коэффициента термоэдс  $S$ , в пленках  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  от концентрации дырок  $p$  при  $T, \text{K}$ : 1 — 300, 2 — 200, 3 — 120.

К сожалению, в литературе отсутствуют деталильные расчеты зонной структуры твердых растворов  $\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$ . Однако на сложное строение валентной зоны этих растворов указывают экспериментальные данные [3], а также результаты экспериментальных исследований и расчетов зонной структуры  $\text{SnTe}$  [7]. Согласно [7], в зонном спектре дырок в  $\text{SnTe}$  в рассматриваемом диапазоне энергий (вблизи холловской концентрации дырок  $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) расположен дополнительный экстремум в точке  $\Delta$  зоны Бриллюэна. Поэтому естественно связать наблюдаемую особенность в зависимости  $S(p)$  с вхождением уровня Ферми в этот экстремум валентной зоны. Оценка энергии Ферми, соответствующей краю дополнительного экстремума, с использованием зонных параметров  $\text{SnTe}$  [7] дает величину  $\epsilon_F \approx 0.25 \text{ эВ}$  (относительно вершины основного экстремума).

Таким образом, развиваемый метод дискретного лазерного напыления пленок сильно легированных полупроводников группы  $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$  позволяет удовлетворительно воспроизводить состав и электрофизические свойства объемных образцов. Выполненные исследования кинетических явлений в пленках  $\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}:\text{In}$  свидетельствуют о существовании дополнительного экстремума (по-видимому, в точке  $\Delta$  зоны Бриллюэна) в валентной зоне твердого раствора, край которого соответствует холловской концентрации дырок  $p \approx 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и энергии Ферми  $\epsilon_F \approx 0.25 \text{ эВ}$ .

Авторы благодарны А.А.Соколову за участие в экспериментальных исследованиях.

- [1] С.Ф. Мусихин, С.А. Немов, В.И. Прошин, И.Е. Семин, Д.В. Шамшур, А.В. Березин, С.Д. Имамкулиев. ФТП, **27**, 513 (1993).
- [2] Д.И. Попов, С.Ф. Мусихин, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Т.Л. Макарова, В.Н. Светлов. ФТТ, **37**, 194 (1995).
- [3] С.А. Немов, С.Ф. Мусихин, Д.И. Попов, В.И. Прошин, Д.В. Шамшур. ФТТ, **37**, 167 (1995).
- [4] S.A. Nemov, R.V. Parfeniev, D.I. Popov, D.V. Shamshur. J. Alloys and Compounds, **219**, 310 (1995).
- [5] Г.С. Бушмарина, И.А. Драбкин, В.В. Компаниец, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, М.А. Шахов. ФТТ, **28**, 1094 (1986).
- [6] В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич. ФТП, **26**, 201 (1992).
- [7] Г.С. Бушмарина, И.А. Драбкин, М.А. Квантов, О.Е. Квятковский. ФТТ, **32**, 2869 (1990).

Редактор Т.А. Полянская

## In doping influence on electrophysical properties of $\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}\text{Te}$ thin films fabricated by laser evaporation

*S.A.Nemov, S.F.Musikhin, V.I.Proshin*

St.Petersburg State Technical University,  
195251 St.Petersburg, Russian

The conductivity, Hall and Seebeck coefficients have been investigated in  $(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  ( $x = 0-0.2$ ) solid solution thin films at the temperature (77-400) K. Films were prepared by the pulse laser evaporation method on mica substrates and had the thickness of (200-1200) Å, the hole density  $p \simeq (2 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{21}) \text{cm}^{-3}$ . The Hall mobility  $R\sigma \simeq (1-30) \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  and the resistivity  $\rho \simeq (2.5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}) \Omega \cdot \text{cm}$ . These quantities depend on temperature weakly. A characteristic minimum of the Seebeck coefficient dependence on the hole density at  $p \simeq 7 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$  has been discovered. This is an indication that the solid solution valence band has a complicated structure.