

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВОВ Bi — 12 ат. % Sb

Сплавы на основе висмута и сурьмы относятся к низкотемпературным термоэлектрическим материалам, которые характеризуются высокими значениями термоэлектрических параметров, определяемых свойствами переноса (удельным электросопротивлением, дифференциальной термо-э. д. с. и теплопроводностью) [1]. С целью поиска наилучшего состава термоэлектрических материалов, а также условий их работы исследуются и тройные сплавы Bi—Sb—Te, Bi—Sb—Pb, Bi—Sb—Sn [2—5]. При изготовлении и обработке таких материалов возникают дефекты кристаллического строения, вызывающие изменение кинетических свойств. Однако влияние несовершенств кристаллической решетки на свойства этих веществ изучено недостаточно.

В данной работе исследуется воздействие пластической деформации на удельное электросопротивление  $\rho$  и дифференциальную термо-э. д. с.  $\alpha$ , определяющие термоэлектрический коэффициент мощности  $Y = \frac{\alpha^2}{\rho}$ , сплавов Bi—12 ат. % Sb, Bi—12 ат. % Sb—0,05 ат. % Te и Bi—12 ат. % Sb—0,5 ат. % Pb.

Сплавы указанных составов приготавливались в вакууме порядка 1 Па, а затем образцы отливались в графитовую изложницу. Последующей механической обработкой им придавалась форма параллелепипеда ( $1,6 \times 3,2 \times 20$  мм<sup>3</sup>), затем их отжигали в вакууме в течение 10 ч при 230 °С. Температурные зависимости указанных свойств измерялись в интервале 77—300 К компенсационным методом с помощью потенциометра Р363-2. Пластическая деформация осуществлялась односторонним сжатием при комнатной температуре.

На рис. 1 показаны зависимости удельного электросопротивления и дифференциальной термо-э. д. с. сплава Bi—12 ат. % Sb от степени пластической деформации  $\epsilon$  при комнатной температуре. Коэффициент анизотропии удельного электросопротивления и дифференциальной термо-э. д. с. этого сплава близок к единице [6], поэтому увеличение  $\rho$  и  $|\alpha|$  обусловлено рассеянием носителей тока на дефектах кристаллической решетки, вводимых пластической деформацией. На этом же рисунке показана деформационная зависимость отношения  $Y_g/Y_0$  ( $Y_0$ ,  $Y_g$  — термоэлектрический коэффициент мощности до и после деформации). Термоэлектрический коэффициент мощности сплава Bi—12 ат. % Sb уменьшается с ростом  $\epsilon$ .

Поскольку в сплаве Bi—12 ат. % Sb носителями тока являются электроны и дырки, удельное электросопротивление и дифференциальная термо-э.д.с. выражаются следующим образом [7]:  $\rho = \frac{1}{\sigma_n + \sigma_p}$ ,  $\alpha = \frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\sigma_n + \sigma_p}$ , где  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$  — проводимости электронов и дырок;  $\alpha_n$ ,  $\alpha_p$  — парциальные термо-э. д. с. электронов и дырок, имеющие противоположные знаки. Вклады от рассеяния электронов и дырок на дефектах кристаллической решетки в изменение удельного электросопротивления

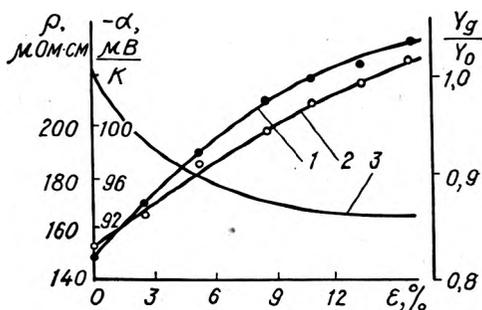


Рис. 1. Зависимость  $\rho$  (1),  $\alpha$  (2) и  $Y_g/Y_0$  (3) от степени деформации при комнатной температуре сплава Bi—12 ат. % Sb

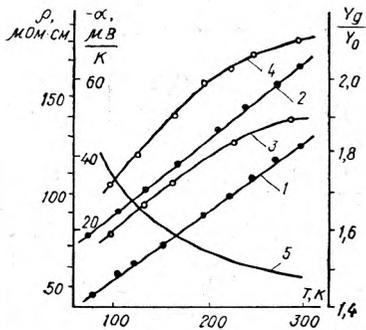


Рис. 2. Температурные зависимости  $\rho$  (1, 2),  $\alpha$  (3, 4) и  $Y_g/Y_0$  (5) сплава Bi — 12 ат. % Sb — 0,05 ат. % Te до деформации (1, 3) и после деформации на  $\epsilon = 16\%$  (2, 4)

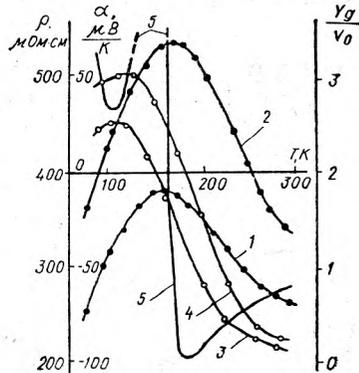


Рис. 3. Температурные зависимости  $\rho$  (1, 2),  $\alpha$  (3, 4) и  $Y_g/Y_0$  (5) сплава Bi — 12 ат. % Sb — 0,5 ат. % Pb до деформации (1, 3) и после деформации на  $\epsilon = 14\%$  (2, 4)

суммируются, а в изменение дифференциальной термо-э. д. с. частично компенсируют друг друга. В связи с этим более значительное увеличение удельного электросопротивления, чем дифференциальной термо-э. д. с. обуславливает уменьшение термоэлектрического коэффициента мощности. При температурах ниже комнатной  $Y$  уменьшается при деформировании еще в большей мере.

Совершенно по-иному влияет пластическая деформация на термоэлектрическую эффективность сплава Bi — 12 ат. % Sb, легированного теллуром или свинцом. Легирование приводит к тому, что ниже некоторой температуры процессы переноса определяются только электронами в случае Te или дырками в случае Pb. На рис. 2 представлены температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho(T)$  и дифференциальной термо-э. д. с.  $\alpha(T)$  сплава Bi — 12 ат. % Sb — 0,05 ат. % Te до и после деформации на  $\epsilon = 16\%$ . В таком сплаве процессы переноса определяются практически только электронами [8]. Во всем температурном интервале наблюдается увеличение  $\rho$  и  $|\alpha|$  при пластической деформации. Изменение удельного электросопротивления и дифференциальной термо-э. д. с. этого сплава при пластической деформации обусловлено, так же как и в ранее исследованном сплаве Bi—Te [9], рассеянием электронов на дефектах кристаллической решетки, образующихся при деформировании. Как показал расчет, термоэлектрический коэффициент мощности деформированного сплава выше недеформированного при всех температурах. Весьма важным представляется тот факт, что с понижением температуры деформационный рост  $Y$  увеличивается.

На рис. 3 изображена зависимость удельного электросопротивления и дифференциальной термо-э. д. с. сплава Bi — 12 ат. % Sb — 0,5 ат. % Pb до и после деформации на  $\epsilon = 14\%$ . Этот материал характерен тем, что в области температур, близких к 77 К, процессы переноса в нем определяются только дырками. Однако при более высоких температурах наблюдается термическое возбуждение электронов из валентной зоны в зону проводимости [10]. Появление более подвижных электронов вызывает уменьшение удельного электросопротивления и даже инверсию знака дифференциальной термо-э. д. с. с повышением температуры. Деформирование этого сплава приводит к увеличению  $\rho$  во всем интервале температур, а кривая зависимости  $\alpha(T)$  сдвигается вверх, в результате расширяется область температур с положительной дифференциальной термо-э. д. с. Кроме того, и это наиболее интересно, в области низких температур наблюдается увеличение  $\alpha$ . Именно в этой низкотемпературной области, где процессы переноса определяются в основ-

ном дырками, термоэлектрический коэффициент мощности при деформировании увеличивается, в то время как при высоких температурах он уменьшается.

Таким образом, пластическая деформация вызывает увеличение термоэлектрического коэффициента мощности сплавов  $Bi-12 \text{ ат. } \% Sb$ , легированных теллуром или свинцом, если процессы переноса в них определяются преимущественно электронами или дырками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания.— М., 1968.
2. Земсков В. С. и др.— Докл. АН СССР, 1975, т. 222, с. 316.
3. Иванов Г. А. и др.— В сб.: Полуметаллы и сегнетоэлектрики.— Л., 1977, с. 84.
4. Аопо Т.— J. of Appl. Physics, 1978, v. 17, p. 843.
5. Иванов Г. А., Панарин А. Ф.— В сб.: Полуметаллы и сегнетоэлектрики.— Л., 1977, с. 88.
6. Иванов Г. А., Яковлева Т. А.— В сб.: Исследование сложных полупроводников.— Кишинев, 1970, с. 97.
7. Стыльбанс Л. С. Физика полупроводников.— М., 1967.
8. Грабов В. М. и др.— В сб.: Исследование сложных полупроводников.— Кишинев, 1970, с. 61.
9. Прокошин В. И., Шепелевич В. Г.— Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, мат., физ., мех., 1975, № 3, с. 56.
10. Шейнфельд В. Л.— В сб.: Низкотемпературные термоэлектрические материалы.— Кишинев, 1970, с. 110.

Поступила в редакцию  
08.01.80.

Кафедра физики твердого тела

УДК 621.317.08

В. И. ЕМЕЛЬЯНЕНКОВ

### О НИНИУСНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ СИГНАЛОВ

Удобные соотношения, описывающие нониусное преобразование, получаются на основе анализа двухрастрового сопряжения, первый растр которого представлен полосами, ограниченными параллельными прямыми  $Y'_1$  и  $Y''_1$ , расположенными под углом  $\varphi < 90^\circ$  к оси  $X$  (см. рисунок), а второй — полосами, которые ограничены прямыми  $Y'_2$  и  $Y''_2$ .

Пересекаясь с осью  $X$ , полосы первого растра образуют первую последовательность отрезков, границы которых совпадают с точками пересечения прямых  $Y'_1$  и  $Y''_1$  с осью  $X$  и определяются соотношениями:

$$x'_{n_1} = \frac{c_1}{\sin \varphi} + \frac{n_1 T}{\sin \varphi}, \quad (1)$$

$$x''_{n_1} = \frac{c_1 + \Delta c_1}{\sin \varphi} + \frac{n_1 T}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где  $c_1$  — расстояние до ближней к началу координат полосы;  $T$  — расстояние между полосами;  $\Delta c_1$  — ширина полос;  $n_1 = 0, 1, 2, \dots$  порядковые номера полос.

Аналогичным образом полосы второго растра образуют вторую последовательность отрезков оси  $X$ , координаты границ которых описываются соотношениями:

$$x'_{n_2} = c_2 + n_2 T, \quad (3)$$

$$x''_{n_2} = c_2 + \Delta c_2 + n_2 T, \quad (4)$$

где  $c_2$  — расстояние до ближайшей полосы,  $\Delta c_2$  — ширина полос,  $n_2 = 0, 1, 2, \dots$  порядковые номера полос.

Полученные последовательности отрезков моделируют импульсные последовательности. При этом равенства

$$\Delta x_{n_1} = x''_{n_1} - x'_{n_1}, \quad (5)$$