

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. ф.-м. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,
С. М. МАТВИЕНКО, Ю. Р. КОГУТ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
15.06 2004 г.

Оппоненты к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК
(ЮГПУ им. К. Д. Ушинского, г. Одесса),
А. И. КОНДРИК (Харьковский физ.-техн. ин-т)

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Si-Ge

На основе сильнолегированных нитевидных кристаллов Si-Ge создан датчик для измерения криогенных температур, работоспособный в условиях магнитных полей.

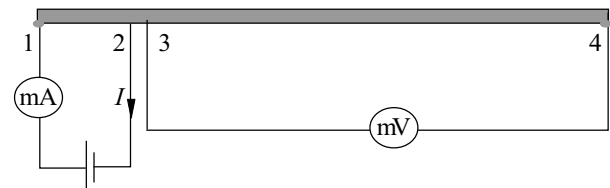
Исследование эффекта Зеебека в сильнолегированных кристаллах при низких температурах представляет интерес как с физической точки зрения (изучение таких явлений как прыжковая проводимость, фононное увлечение носителей заряда [1, 2]), так и с прикладной (например, для создания сенсоров температуры [3]). В [4] исследовалось поведение термоэдс в сильнолегированных нитевидных кристаллах (НК) Si-Ge в температурном интервале 4,2—300 К под воздействием одноосной деформации. Однако основное внимание в этой работе уделялось изучению природы деформационно-стимулированных эффектов в НК твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,01...0,05$).

В настоящей работе проведены исследования терморезистивных и термоэлектрических характеристик нитевидных кристаллов твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,01...0,05$) в температурном интервале 4,2—200 К с целью создания сенсоров криогенных температур на их основе, работоспособных в условиях действия магнитных полей.

Нитевидные кристаллы твердого раствора SiGe выращивали методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием золота как инициатора роста. Температура зоны источника составляла 1250°C, зоны роста — 900°C. Состав твердого раствора $Si_{1-x}Ge_x$ определялся методом микрозондового анализа. Кристаллы имели диаметр 40—50 мкм и длину 10—12 мм.

Полученные НК с платиновыми контактами приклеивали с помощью клея ВЛ-931 на подложки с отличным от Si-Ge температурным коэффициентом расширения (ТКР), после чего охлаждали до криогенных температур. За счет различия ТКР подложки и кристаллов возникала их деформация. Степень деформации (ϵ) зависела от материала подложек и изменялась от $-4,3 \cdot 10^{-3}$ до $1,4 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.

Коэффициент Зеебека измерялся по четырехконтактной схеме (рис. 1) в температурном интервале 4,2—200 К. При этом контакты 1 и 2 использовали как ветвь разогрева (терморезистивную ветвь), создающую градиент температуры между контактами 3



и 4, на которых измерялась термоэдс (термоэлектрическая ветвь). Расстояние между контактами 2 и 3 не превышало 200 мкм, между 3 и 4 — около 10 мм. Температуру горячего конца определяли по сопротивлению терморезистивной ветви.

Проведена серия измерений на кристаллах твердого раствора SiGe с концентрацией примеси бора, обеспечивающей близость к переходу "металл—изолятор" с диэлектрической стороны перехода.

На рис. 2 представлены температурные зависимости сопротивления кристаллов с удельным сопротивлением $\rho=0,016$ Ом·см на различных подложках. Из рисунка видно, что сопротивление НК, деформированного сжатием до уровня $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ отн. ед., изменяется приблизительно на три порядка в интервале температур 4,5—50 К. Кроме того, в этой области температур наблюдается зависимость $R(T)$, близкая к линейной.

Для недеформированных НК с низким уровнем легирования ($\rho=0,025$ Ом·см) наблюдалось такое же резкое изменение сопротивления, однако степень нелинейности зависимости $R(T)$ была значительно больше.

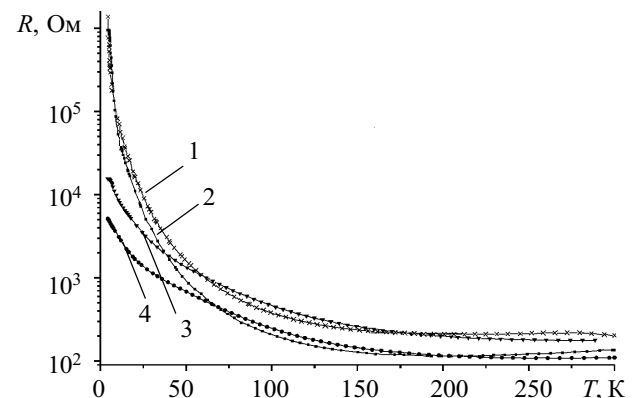


Рис. 2. Температурные зависимости сопротивления НК Si-Ge ($\rho=0,016$ Ом·см) на различных подложках:
1 — Al, $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$; 2 — Cu, $\epsilon=-3,8 \cdot 10^{-3}$; 3 — кварц, $\epsilon=+4,7 \cdot 10^{-4}$;
4 — без подложки, $\epsilon=0$

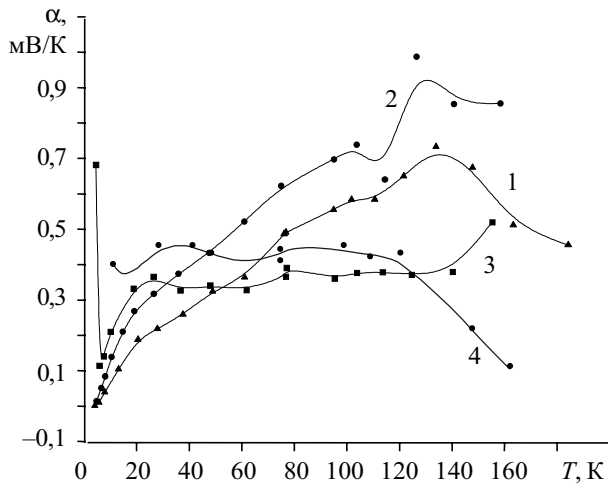


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента Зеебека НК Si-Ge на различных подложках:

1 — без подложки, $\epsilon=0$; 2 — кварц, $\epsilon=+4,7 \cdot 10^{-4}$; 3 — Cu, $\epsilon=3,8 \cdot 10^{-3}$; 4 — Al, $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$ (1—3 — $\rho=0,016$, $x=0,03$; 4 — $\rho=0,025$, $x=0,05$)

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициента Зеебека α для различных образцов НК. Как видно из рисунка, деформация растяжения (кривая 2) несущественно влияет на температурный ход коэффициента Зеебека. В то же время деформация сжатия (кривая 3) приводит к принципиальному изменению характера зависимости $\alpha(T)$ — появляется температурный интервал (20—100 К), в котором значение α достаточно стабильно.

С физической точки зрения наличие максимума α на температурной зависимости в недеформированных образцах объясняется эффектом фононного увлечения носителей заряда. Деформация растяжения несколько увеличивает этот эффект, что приводит к возрастанию абсолютной величины максимума α . Деформация сжатия, по-видимому, способствует подавлению эффекта фононного увлечения, что может быть следствием изменения фононного спектра деформированного кристалла.

Из представленных в таблице сравнительных термометрических характеристик НК Si-Ge видны преимущества использования деформированных кристаллов по сравнению с недеформированными: существенно расширяется диапазон рабочих температур и повышается температурная чувствительность терморезистора.

Образцы	Температурный интервал, К	Температурный коэффициент сопротивления, %/К	Температурная чувствительность при $T=7$ К, Ом/К
Недеформированный	4,2...10	13...16	300
Деформированный, $\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.	4,2...50	6...16	12500

С целью оптимизации параметров датчика (повышения чувствительности, расширения области рабочих температур) были проведены измерения температурного хода коэффициента Зеебека для образцов различного состава ($x=0,01...0,05$) и разной степени сжатия ($\epsilon = -3,8 \cdot 10^{-3}...-4,3 \cdot 10^{-3}$). Установлено, что твердые растворы $Si_{1-x}Ge_x$ имеющие состав $x=0,03...0,05$, наиболее чувствительны к деформации, т. к. их коэффициент тензочувствительности максимален.

Практически для всех исследованных образцов получена удовлетворительная стабильность коэффици-

ента Зеебека в температурном интервале 20—100 К. Однако максимальная величина $\alpha = 0,47 \pm 0,02$ мВ/К получена для образцов, имеющих состав $x=0,05$ ($\rho=0,025$ Ом·см) при уровне деформации $\epsilon=-4,3 \cdot 10^{-3}$ на подложке из Al (кривая 4 на рис. 3).

Таким образом, установлено, что деформация существенно влияет на термометрические характеристики кристаллов. Анализ полученных результатов позволяет говорить о том, что специально деформированные НК Si-Ge могут быть эффективно использованы в датчиках для измерения криогенных температур. Причем использование НК состава $x=0,03$ ($\rho=0,16$ Ом·см) обеспечивает наилучшие параметры терморезистивной ветви, а состава $x=0,05$ ($\rho=0,025$ Ом·см) — термоэлектрической. Поскольку, по мнению авторов, для предлагаемого датчика более важными являются термоэлектрические характеристики, в качестве термочувствительного элемента был применен кристалл с $x=0,05$.

Датчик представляет собой НК $Si_{1-x}Ge_x$ диаметром 40 мкм с четырьмя платиновыми выводами диаметром 30 мкм (см. рис. 1), приклеенный с помощью клея ВЛ-931 на алюминиевую подложку. Между контактами 1 и 2 измеряется сопротивление терморезистивной ветви и по термометрическим характеристикам (рис. 2) определяется абсолютная температура горячего конца (в диапазоне 4,2—120 К). Между контактами 3 и 4 измеряется термо-эдс, которая позволяет определить разность температур между горячим и холодным концами кристалла. Диапазон рабочих температур термоэлемента (а соответственно, и самого датчика) 20—120 К. Точность измерения абсолютной температуры составляет 0,2 К, разности температур — 0,1 К. Инерционность датчика при измерении температуры составляла не более 60 мс.

Так как длина терморезистивной ветви составляет 200—300 мкм, а диаметр кристалла 40 мкм, то предложенный датчик может служить термозондом для исследования распределения температуры на поверхности материалов.

Исследования также показали, что магнитное поле (вплоть до полей с магнитной индукцией 14 Тл) практически не влияет на величину и характер температурной зависимости коэффициента Зеебека и сопротивления кристаллов.

Таким образом, полученные результаты показали, что деформированные сжатием нитевидные кристаллы твердых растворов $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0,05$) можно успешно использовать в датчиках для измерения криогенных температур, работоспособных в условиях действия сильных магнитных полей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев А. Г., Забродский А. Г., Звягин И. П., Егоров С. В. Термоэдс нейтронно-легированного Ge:Ga в области прыжковой проводимости // ФТП.— 1997.— Т. 31, № 10.— С. 1174—1179.
2. Лончаков А. Т., Цидилковский А. М., Матвеев Г. А. Термо-эдс n-Ge вблизи перехода металл-диэлектрик // ФТП.— 1988.— Т. 22, № 5.— С. 839—842.
3. Van Herwaarden A. W., Sarro P. M. Thermal sensors based on the Seebeck effect // Sensors and Actuators.— 1986.— Vol. 10.— P. 321.
4. Дружинін А. О., Островський І. П., Лях Н. С., Матвієнко С. М. Деформаційно-стимульовані ефекти у ниткоподібних кристалах твердого розчину Ge-Si // Вісник НУ "Львівська політехніка". Сер. "Електроніка".— 2003.— № 482.— С. 105—111.