

УДК 531.7

© В. В. Каминский, А. А. Молодых, Н. Н. Степанов,
С. М. Соловьев, Н. М. Володин, В. А. Иванов

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗО- И БАРОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ СУЛЬФИДА САМАРИЯ

В работе описаны особенности свойств полупроводниковых тензо- и барорезисторов на основе сульфида самария (SmS), учет которых необходим при прочностных испытаниях и конструировании датчиков различных механических величин на их основе. Изложены особенности монтажа тензорезисторов. Приведены температурные зависимости сопротивления, коэффициентов тензо- и барочувствительности. Описаны возможности регулировки параметров тонкопленочных тензорезисторов с применением фазового перехода полупроводник—металл.

Кл. сл.: тензодатчик, тензорезистор, барорезистор, полупроводник, моносουλфид самария, тонкие пленки

ВВЕДЕНИЕ

Тензо- и барорезисторы являются одними из наиболее широко применяемых на практике приборов для проведения прочностных исследований материалов и конструкций. Наибольшей чувствительностью к деформации и давлениям обладают полупроводниковые тензорезисторы. Из них оптимальными, на наш взгляд, являются полупроводниковые тензорезисторы на основе сульфида самария (SmS), поскольку они превосходят все остальные по чувствительности, линейности характеристик, радиационной стойкости, а также обладают высокой термостойкостью ($T_{пл.} \sim 2300^\circ\text{C}$). Дополнительным преимуществом тензорезисторов на основе SmS являются изотропность тензорезистивного эффекта, наличие контролируемого фазового перехода полупроводник—металл, большая концентрация свободных носителей заряда и технологически удобная величина температурного коэффициента линейного расширения ($12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, практически как у стали). Перечисленные особенности свойств открывают новые специфические возможности при применении данных тензорезисторов. Их описанию и посвящена настоящая работа.

КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ SmS

Особенности применения полупроводниковых тонкопленочных тензорезисторов на основе SmS рассмотрим на примере одной из их разновидностей — тензорезистора типа П1. На его основе изготавливаются датчики всевозможных механических величин — давления, силы, веса, деформа-

ции, момента, перемещения, ускорения, вибрации и др. — путем наклеивания тензорезистора П1 на упругие элементы этих датчиков (мембраны, балки, опоры и т. п.). Датчики на основе тензорезисторов П1 могут быть также сформированы (наклеены) непосредственно на эксплуатируемом или исследуемом объекте, например на различных несущих конструкциях для контроля степени их загрузки, на креплении режущего инструмента для контроля усилий при обработке материалов, на корпусах и оболочках объектов, подвергающихся околосредоточенным нагрузкам в процессе эксплуатации и пр.

Конструкция тензорезистора П1 представлена на рис. 1. Здесь 1 — поликристаллический слой SmS размером $0.4 \times 0.6 \text{ мм}$ (тензочувствительная область); 2 — контакты из алюминия и никеля размерами $0.8 \times 0.8 \text{ мм}$ (выводы тензорезистора);

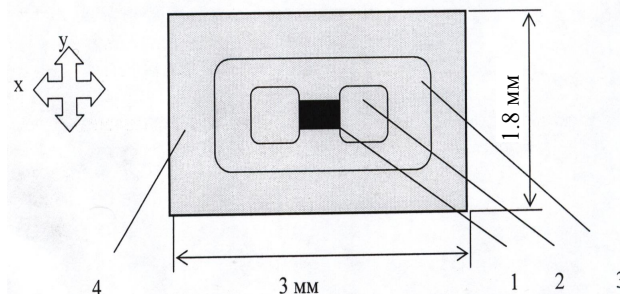


Рис. 1. Конструкция тензорезистора типа П1.
1 — поликристаллический слой SmS; 2 — контакты (выводы тензорезистора); 3 — слой моноксида кремния; 4 — подложка

3 — слой монооксида кремния толщиной 3÷5 мкм для обеспечения изоляции датчика от подложки;
4 — подложка из константановой фольги толщиной 3 мкм.

Тензорезистор имеет одинаковую чувствительность как по оси X, так и по оси Y.

Основные параметры тензорезистора:

Температура эксплуатации, °C	... ± 120
Электрическое сопротивление, ^{*)} R, Ом	... 100–50 000
Температурный коэффициент сопротивления ²⁾ (ТКС), $\alpha = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T}$, 1/°C	... 0–0.004
Коэффициент тензочувствительности, ^{*)} $K = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon}$, ($\varepsilon = \Delta l/l$ — относительная деформация)	... 15–90
Поперечная тензочувствительность относительно продольной, %	... 100
Эффективный коэффициент тензочувствительности ^{*)}	... до 180

ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА ТЕНЗОРЕЗИСТОРА

Поскольку тензорезистор П1 имеет одинаковую чувствительность как по оси X, так и по оси Y, величина $K_{эфф.}$ зависит от формы упругого элемента и места расположения на нем тензорезистора (см. рис. 2). При наклейке на балку, ленту, опору (рис. 2, а) $K_{эфф.} = K = 15\div90$; при размещении тензорезистора на консольной балке вблизи места заделки (рис. 2, б) $K_{эфф.} = 1.3 K = 20\div120$; при размещении в центре мембраны (рис. 2, в) $K_{эфф.} = 2 K = 30\div180$.

Наклейку тензорезисторов П1 производят по той же методике и с помощью тех же клеев, которые применяются в общей тензометрии, использующей обычные металлические тензорезисторы, например клей Z70 фирмы НВМ, эпоксидный компаунд ЭД-20 и др. Необходимым условием является максимальная жесткость клея. Припайку выводов к тензорезистору желательно выполнить после его наклейки. Следует отметить, что наклейку тензорезисторов на основе SmS можно осуществлять и на изогнутые поверхности с радиусом кривизны ~10 мм.

^{*)} В указанных пределах может быть реализовано любое заданное значение параметра.

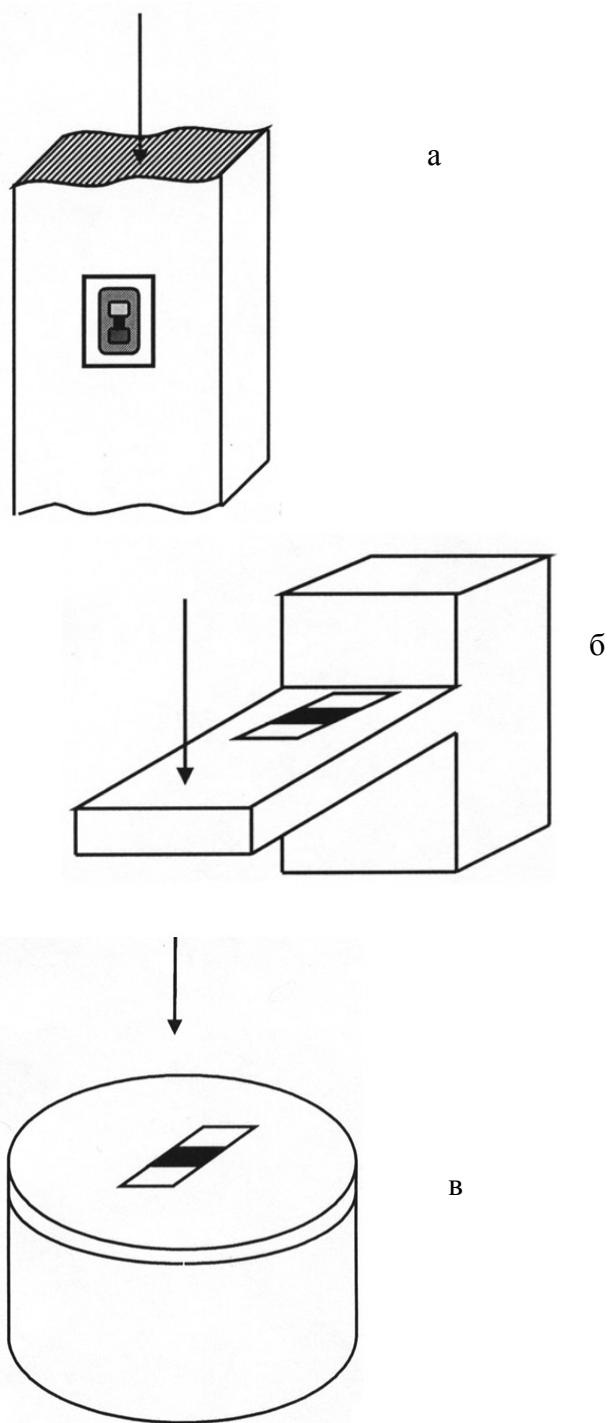


Рис. 2. Различные варианты монтажа тензорезистора П1 на упругих элементах.
Форма упругого элемента: а — балка, лента, опора; б — консоль; в — мембрана

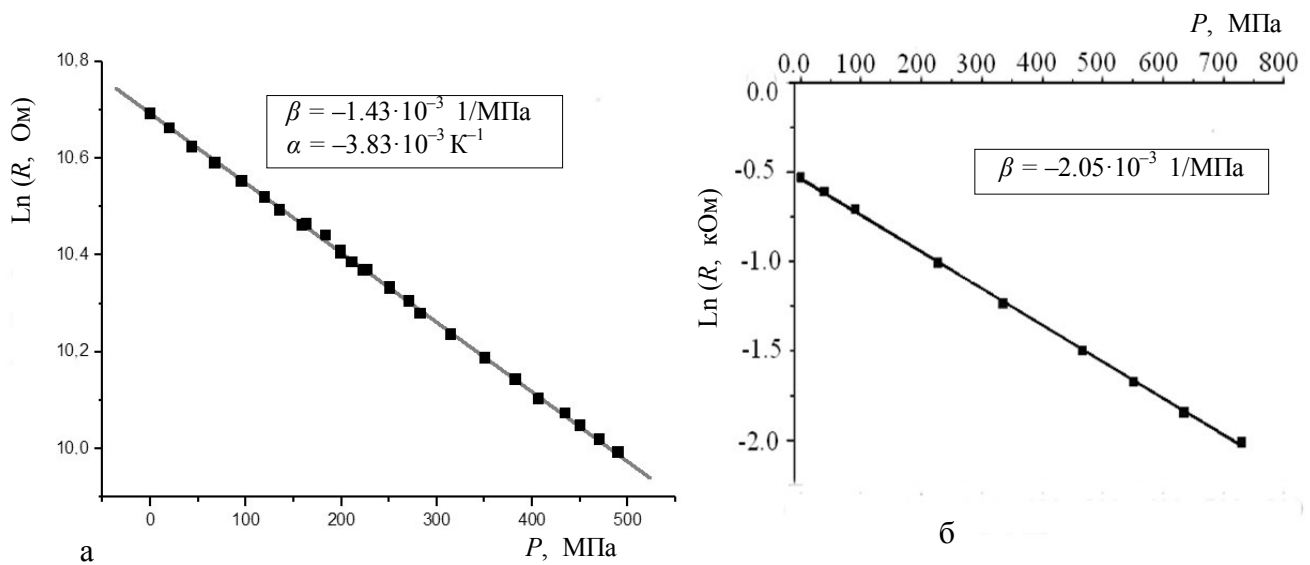


Рис. 3. Калибровочная характеристика тензорезистора на основе SmS (тип П1), работающего в режиме барорезистора, при $T = 300$ К (а) и барическая зависимость логарифма электросопротивления тонкопленочного барорезистора на основе SmS на стеклянной подложке (б)

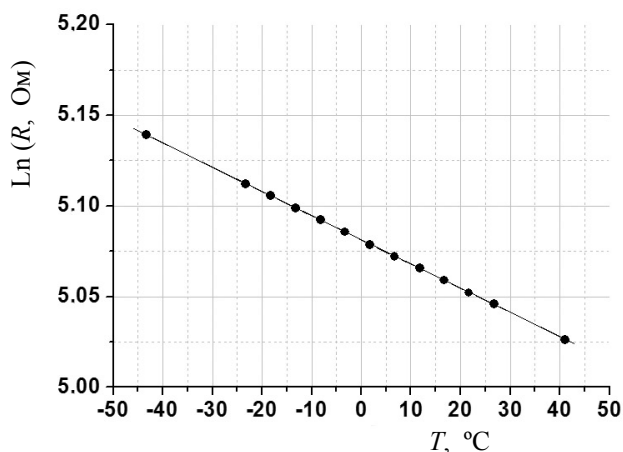


Рис. 4. Температурная зависимость электросопротивления тонкопленочного барорезистора на основе SmS.

$R = 156 \text{ Ом}$ при $T = 25 ^\circ\text{C}$, $\alpha = 1.36 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$

Эти же резисторы могут быть использованы в режиме барорезисторов для измерения импульсного и гидростатического давлений в диапазоне $1 \div 2 \cdot 10^3$ МПа в газообразных, жидких, сыпучих и пластичных средах при температурах от -270 до $+230$ °C (см. рис. 3, а). Такие барорезисторы имеют чувствительность к давлению (барический ко-

эффициент сопротивления, БКС) $\beta = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta P} =$

$= (1 \div 3) \cdot 10^{-3} \text{ 1/МПа}$, быстродействие 1 мкс, размеры от $1 \times 0.5 \times 0.1$ мм.

Существующая технология позволяет наносить тензорезисторы типа П1 и на стеклянные подложки. Это позволяет использовать их для измерения локальных всесторонних давлений в бетонах, грунтах и горных породах, а также при проведении низкотемпературных натурных испытаний в исследованиях прочности оболочек. В последнем случае измеряется давление, создаваемое замерзшей водой в замкнутых объемах [1]. Применялись такие барорезисторы и как датчики напряженного состояния в композитных материалах и пластиках [2]. На рис. 3, б, приведена барическая зависимость логарифма электросопротивления барорезистора на стеклянной подложке, а на рис. 4 — его температурная зависимость. Обращает на себя внимание высокая степень линейности изменения логарифма электросопротивления при изменении давления и вариации температуры в климатическом интервале (см. рис. 3, 4). Физической причиной такого поведения электросопротивления датчиков при изменении температуры и давления является активационный характер электропереноса в SmS, при котором в результате изменения давления или температуры в материале заметно меняется только концентрация свободных носителей тока (электронов проводимости), в то время как их подвижность остается практически постоянной [3, 4]. Линейность логарифмических зависимостей электросопротивления барорезисторов от давления и температуры существенно упрощает вычисление давления и повышает надежность результата.

Чувствительность электросопротивления тензо- и барорезисторов к всестороннему сжатию зависит не только от технологии выращивания чувствительного слоя SmS-датчика, но и в большой степени от материала подложки, на которой он сформирован. Действительно, чем выше сжимаемость подложки по координатам плоскости пленки, тем выше объемная сжимаемость пленки $\Delta V / V$. Изменение удельного объема пленки является линейной функцией всестороннего сжатия P и в нашем случае может быть описано следующей формулой:

$$\Delta V / V = -\frac{P}{E_s^j} \cdot \left\{ \frac{E_s^j}{E_{\text{SmS}}^j} + 2[1 - (\nu_{\text{SmS}} + 2 \cdot \nu_s)] \right\},$$

где E_s^j , ν_s , E_{SmS}^j , ν_{SmS} — модули Юнга и коэффициенты Пуассона подложки и пленки SmS соответственно. Как показано в [5], изменение логарифма электросопротивления SmS пропорционально изменению объема образца, т. е. величине $\Delta V / V$, что и объясняет зависимость величины БКС от материала подложки.

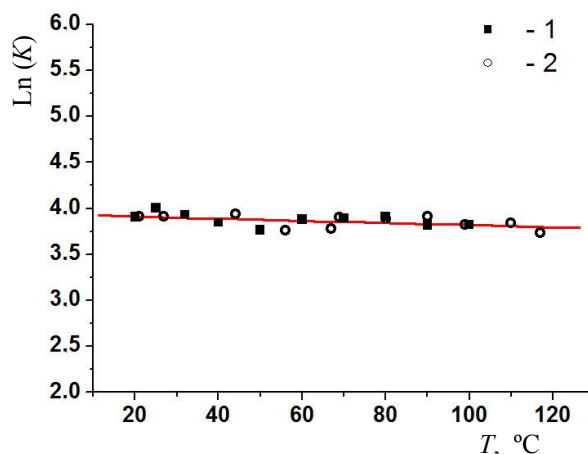


Рис. 5. Температурные зависимости коэффициента тензочувствительности тонкопленочного тензорезистора на основе SmS с $K = 50$, снятые в двух циклах. 1 — первый цикл, $\gamma_1 = -1.22 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$; 2 — второй цикл, $\gamma_2 = -1.16 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$

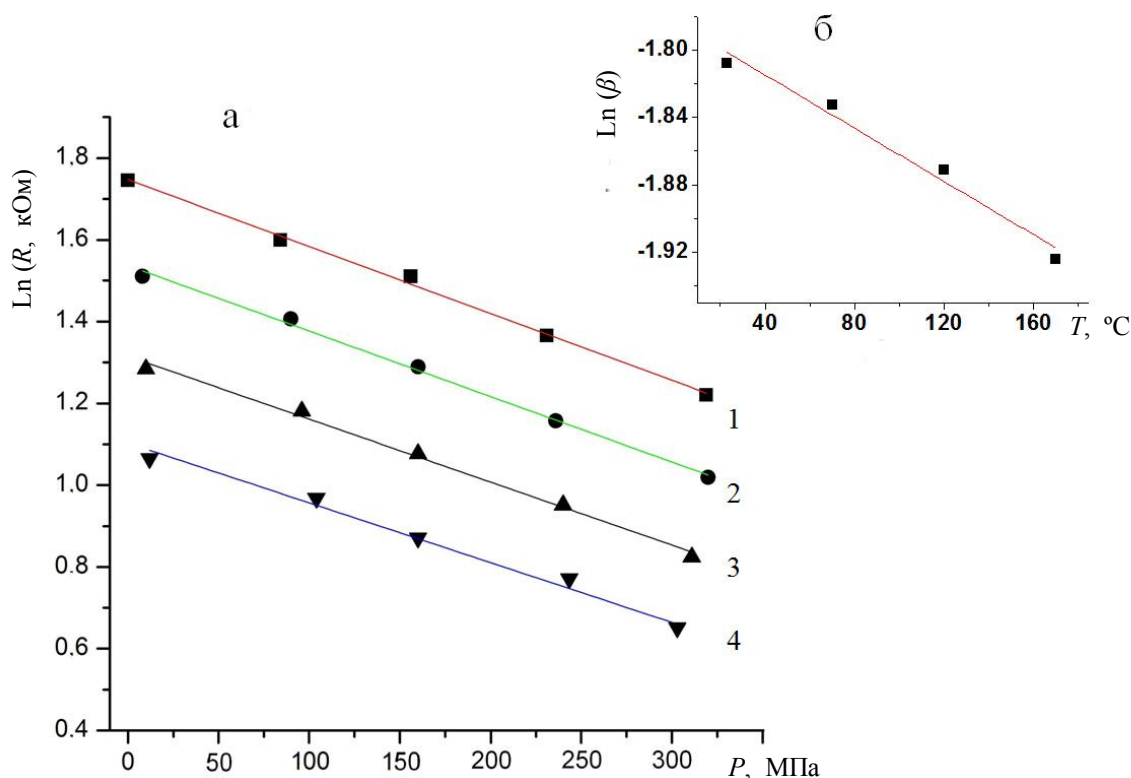


Рис. 6. Зависимости электросопротивления барорезистора от давления при различных температурах (а) и температурная зависимость барического коэффициента сопротивления (б). 1 — $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = -1.64 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МПа}$; 2 — $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = -1.60 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МПа}$; 3 — $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = -1.54 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МПа}$; 4 — $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, $\beta = -1.46 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МПа}$

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕНЗО- И БАРОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Было исследовано поведение главного параметра тензорезистора — коэффициента тензочувствительности при повышенных температурах. Полученные результаты для двух циклов измерения — до 100 °С и 120 °С — представлены на рис. 5. Значения температурного коэффициента тензочувствительности $\gamma = \Delta K / (K \cdot \Delta T)$ составили $-1.22 \cdot 10^{-3}$ и $-1.16 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$. Эта сравнительно небольшая разница в величинах объясняется не различием в температурных диапазонах измерения, а погрешностью самих измерений.

Таким образом, можно считать, что при повышении температуры мы имеем некоторое снижение коэффициента тензочувствительности тензорезисторов на основе SmS. Для данного тензорезистора $\gamma \sim -1.2 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$.

Было исследовано также поведение БКС тонкопленочных барорезисторов на основе SmS на стеклянной подложке при повышенных температурах. На рис. 6, а, представлены барические зависимости электросопротивления таких резисторов, снятые при различных температурах. Наблюдается некоторое снижение БКС с температурой (рис. 6, б). При этом температурный коэффициент чувствительности, полученный из рис. 6, б, составляет около $-7 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$.

На рис. 7 продемонстрированы возможности барорезисторов на основе SmS по предельным рабочим температурам. Измерялись величины БКС на двух барорезисторах при комнатной и предельно высокой температурах. Измерения проводились в автономных поршневых камерах высокого давления в среде термостойчивой и химически инертной полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 [6, 7]. В результате проведенных экспериментов установлена работоспособность барорезисторов до $T = 225$ °С. Эта величина определяется не температурной или химической стабильностью пленки SmS, а лишь температурой плавления припоя токовыводов, и поэтому может быть существенно увеличена при необходимости — согласно нашим экспериментальным данным, вплоть до 400 °С.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ SmS

Известен фазовый переход полупроводник—металл, который происходит в приповерхностном слое образцов SmS при их полировке. При полировке тонких пленок SmS происходит существенное изменение их электрических свойств.

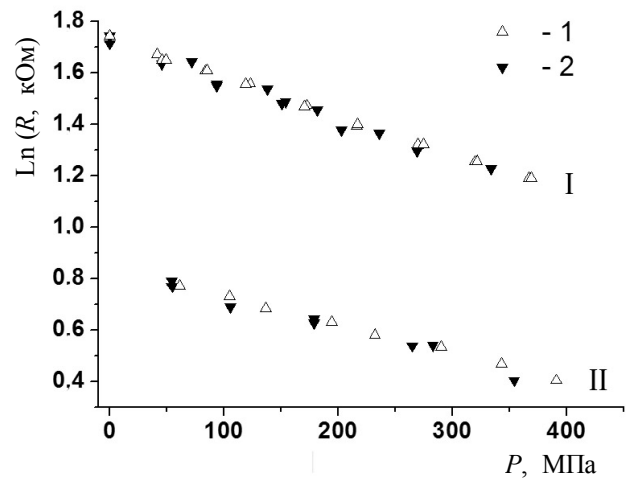


Рис. 7. Барические зависимости электросопротивления двух барорезисторов (1 и 2) на основе SmS при комнатной (I, $T = 19\text{--}24$ °С) и предельно высокой (II, $T = 220\text{--}225$ °С) рабочих температурах. $\beta_1 = -1.45 \cdot 10^{-3}$ 1/МПа при $T = 24$ °С; $\beta_1 = -1.16 \times 10^{-3}$ 1/МПа при $T = 220\text{--}225$ °С; $\beta_2 = -1.49 \times 10^{-3}$ 1/МПа при $T = 19$ °С; $\beta_2 = -1.16 \cdot 10^{-3}$ 1/МПа при $T = 220\text{--}225$ °С

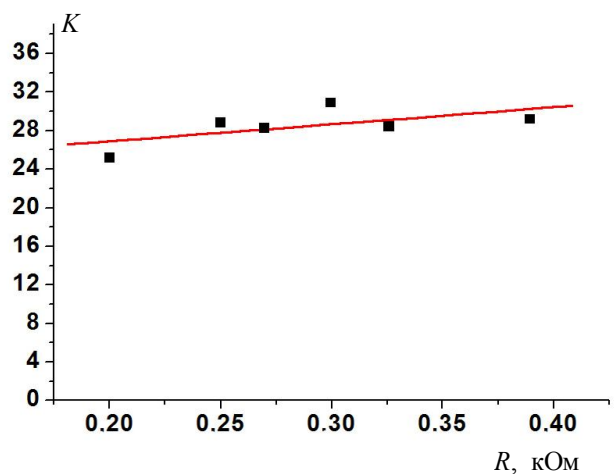


Рис. 8. Зависимость коэффициента тензочувствительности тензорезистора на основе SmS от величины электросопротивления при полировке

Это может быть использовано на практике для регулировки электросопротивления, коэффициента тензочувствительности и температурного коэффициента сопротивления тензо- и барорезисторов. Такая технологическая операция полезна для уменьшения разброса параметров в партии готовых резисторов, а также для балансировки тензорезисторных мостов датчиков механических величин на основе SmS [8, 9].

Проводились эксперименты по определению предельной температуры, до которой возможно применение тензорезисторов, электросопротивление которых откорректировано с помощью фазового перехода полупроводник—металл в приповерхностном слое. На основании результатов экспериментов можно сделать вывод, что откорректированные таким образом тензорезисторы работоспособны до температур не менее 160 °С. При этом сохраняется стабильность их параметров, электросопротивления и ТКС. Помимо этого, была проверена стабильность отрегулированных таким образом тензорезисторов по их коэффициенту тензочувствительности. Эксперимент проводился на тонкопленочных тензорезисторах на стеклянной подложке с толщиной слоя SmS ~ 0.5 мкм. Электросопротивление тензорезистора ступенчато уменьшалось с помощью полировки, и после каждого шага проводилось измерение коэффициента тензочувствительности. На рис. 8 представлена зависимость коэффициента тензочувствительности от электросопротивления тензорезистора при его уменьшении полировкой. Из рис. 8 следует, что при уменьшении сопротивления тензорезистора полировкой, мы имеем лишь некоторое незначительное уменьшение коэффициента тензочувствительности ($\Delta K / \Delta R = 1.77 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}$, или $(\Delta K / K) / (\Delta R / R) \approx 0.25$).

ВЫВОДЫ

Таким образом, с помощью тензо- и барорезисторов на основе SmS могут решаться практически любые задачи, связанные с исследованиями прочности, разрушения материалов и конструкций, конструированием датчиков всевозможных механических величин. Как показывают наши экспериментальные результаты, интервал рабочих температур таких резисторов от -120 до +225 °С, а рабочих давлений — до $2 \cdot 10^{-3}$ МПа. При применении резисторов на основе SmS необходимо учитывать описанные выше особенности их свойств и поведения параметров.

Работа выполнена при поддержке ООО "Эс эм Эс тензо" (Санкт-Петербург).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Большев К.Н., Алексеев А.А., Каминский В.В., Степанов Н.Н. Методика исследования

ветвления трещины при низкотемпературных натурных исследованиях // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 2. С. 57–62.

2. Каминский В.В., Васильев Л.Н., Дубровин П.В., Соловьев С.М., Шнейцман В.В. Датчики внутренних напряжений пластмассовых, композитных и бетонных конструкций на основе сульфида самария // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 7–9.
3. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Васильев Л.Н., Харченко Ю.Н., Смирнов И.А. Влияние давления на подвижность носителей тока в SmS // ФТТ. 1985. Т. 27, № 1. С. 77–82.
4. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Молодых А.А. Исследование температурных зависимостей электросопротивления монокристаллов SmS при различных давлениях // ФТТ. 2010. Т. 52, № 7. С. 1269–1270.
5. Каминский В.В., Рябов А.В., Степанов Н.Н. Влияние упругих деформаций на концентрацию носителей тока в моносulfиде самария // ФТТ. 1981. Т. 23, № 6. С. 1805–1807.
6. Ицкевич Е.С. Камеры высокого давления для исследования свойств твердых тел // ПТЭ. 1999, № 3. С. 6–18.
7. Циок О.Б., Хвостанцев Л.Г. Фазовые переходы в церии при высоких давлениях до 15 ГПа и высоких температурах // ЖЭТФ. 2001. Т. 6, № 12. С. 1438–1444.
8. Володин Н.М., Каминский В.В. Способ подгонки сопротивлений тензорезисторного моста. А. с. № 1225325, 07.03.1984.
9. Володин Н.М., Каминский В.В. Способ подгонки номинального сопротивления полупроводникового резистора. А. с. № 1311357, 25.04.1985.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург (Каминский В.В., Молодых А.А., Степанов Н.Н., Соловьев С.М.)

НПО им. С.А. Лавочкина, г. Москва (Володин Н.М.)

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск (Иванов В.А.)

Контакты: Степанов Николай Николаевич, stnick@hotmail.ru

Материал поступил в редакцию 22.12.2010.

THE APPLICATION PECULIARITIES OF SEMI-CONDUCTING RESISTIVE-STRAIN SENSORS AND BARORESISTORS ON THE BASIS OF SAMARIUM SULPHIDE

**V. V. Kaminsky¹, A. A. Molodykh¹, N. N. Stepanov¹,
S. M. Soloviev¹, N. M. Volodin², V. A. Ivanov³**

¹*Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, Saint-Petersburg*

²*SIC of S.A. Lavochkin, Moscow*

³*Institute of Physical-Technical Problems of the North Siberian Branch of RAS, Yakutsk*

In this paper the characteristics peculiarities of semi-conducting resistive-strain sensors and baroresistors on the basis of samarium sulphide (SmS) baroresistors are described. These features should be taken into account when used during strength researches and constructing sensors of different mechanical values on its basis. The temperature dependences of resistance, the factors of the strain-sensitivity and baro-sensitivity are given. The possibilities of adjusting of parameters for thin films resistive-strain sensors with using of semiconductor-metal phase transition are described.

Keywords: strain gauge, resistance strain gauge, pressure resistor, semiconductor, samarium monosulphide, thin films