

УДК 531.7.681.2

© Н. Н. Степанов, В. В. Каминский, А. А. Молодых

ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК SmS

В работе предложен способ определения коэффициента K тензочувствительности тензодатчиков на основе поликристаллических пленок моносulfида самария (SmS) без потери ими эксплуатационных свойств. Выведено соотношение между коэффициентом тензочувствительности K и барическим коэффициентом сопротивления B в условиях гидростатического сжатия (режим барорезистора). Показано, что соотношение между K и B определяется только упругими константами поликристаллического тензочувствительного слоя SmS и подложки, на которую он нанесен.

Кл. сл.: тензодатчик, тензорезистор, барорезистор, моносulfид самария, коэффициент тензочувствительности, барический коэффициент сопротивления, тонкие пленки

ВВЕДЕНИЕ

Основным параметром тензорезистора является его коэффициент тензочувствительности $K = \Delta R / (R \cdot \varepsilon)$, где R , ΔR и ε — электросопротивление, приращение электросопротивления и деформация датчика соответственно [1]. Для измерения этого параметра тензорезистор должен быть наклеен на балку с помощью достаточно жесткого связующего. Изгиб балки задает деформацию тензорезистора, приводящую к изменению его электросопротивления. Обе эти величины измеряются, и их соотношение определяет величину K . После проведения такого тестового испытания тензорезистор безвозвратно выходит из строя. Это создает проблемы в процессе разработки новых тензорезисторов, т. к. отсутствует возможность измерения каких-либо других параметров после калибровки. Помимо этого, в процессе промышленного производства резистивных полупроводниковых тензодатчиков некоторая их часть, представляющая случайную выборку из партии готовых изделий, изымается для проведения тестовых испытаний с целью определения средней по партии величины коэффициента тензочувствительности [1]. Поскольку повторное использование прошедших тестирование датчиков исключено, себестоимость единицы продукции увеличивается.

В производстве тонкопленочных тензорезисторов на основе полупроводниковых пленок SmS таких экономических потерь можно избежать, если полностью изменить процесс тестирования датчиков, сведя его к определению величины барического коэффициента сопротивления $B = \partial \ln R / \partial P$

(P — давление) в гидростатической и химически инертной по отношению к материалу пленки среде, и уже далее путем перерасчета величины указанного параметра получать искомое значение K . Это принципиально возможно, поскольку в датчиках на основе SmS изменение удельной электропроводности обусловлено изменением удельного объема тензочувствительного слоя под действием деформации [2].

В настоящей работе приведен вывод соотношения между коэффициентом тензочувствительности K и барическим коэффициентом электросопротивления B для тонкопленочных тензо- и барорезисторов на основе SmS.

ВЫВОД СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ K И B

Коэффициент тензочувствительности $K = \Delta R / (R \cdot \varepsilon) = (\Delta R / R) / (\Delta l / l)$; $\varepsilon = \Delta l / l = \frac{P_{\perp}}{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}}$; $R = \rho l / S$, где l — длина тензочувствительного слоя датчика (пленка SmS); S — площадь поперечного сечения пленки; $E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}$ — модуль Юнга подложки; P_{\perp} — напряжение растяжения (сжатия) датчика, приложенное вдоль направления l ; ρ — удельное электросопротивление тензочувствительного слоя [1]. Путем несложных преобразований, учитывая различие упругих свойств материалов пленки SmS и подложки, получаем:

$$K = 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \pm E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} \cdot \frac{\partial \rho}{\rho \cdot \partial P_{\perp}} =$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \mp E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} \cdot \frac{\partial \sigma}{\sigma \cdot \partial P_{\perp}} = \\
 &= 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \mp E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} \cdot \frac{\partial n}{n \cdot \partial P_{\perp}}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где \bar{v}_{SmS} — коэффициент Пуассона поликристаллической пленки SmS; $v_{\text{подл.}}$ — коэффициент Пуассона подложки; σ — удельная электропроводность пленки SmS и n — концентрация свободных носителей заряда (электронов проводимости) в ней. Замена σ на n допустима, поскольку подвижность электронов проводимости под давлением в SmS меняется слабо [3].

Согласно общепринятой модели электропереноса в SmS [4], электроны активируются в зону проводимости с различных донорных уровней, включая 4f-уровни, имеющих различные деформационные потенциалы Ξ_i , где i — номер уровня. Парциальные концентрации электронов, активированных с этих донорных уровней, определяются величинами их деформационных потенциалов и сжимаемостью воспринимающей напряжения структуры.

Для одноосного сжатия (растяжения) относительное изменение объема:

$$\frac{\Delta V}{V} = \mp \varepsilon_{ii} = \mp \frac{P_{\perp}}{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}} \cdot [1 - (\bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}})], \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$ и по повторяющимся индексам предполагается суммирование. Сжимаемость в этом случае будет определяться выражением

$$\beta_{\perp} = \frac{\partial V}{V \cdot \partial P_{\perp}} = \frac{1}{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}} \cdot [1 - (\bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}})]. \quad (3)$$

Логарифмическую производную концентрации свободных носителей тока по давлению $\frac{\partial n}{n \cdot \partial P_{\perp}}$

можно записать аналогично [5], обобщив приведенную там формулу на случай счетного числа m донорных уровней с деформационными потенциалами Ξ_i и вырождением $j(i)$. Тогда для коэффициента тензочувствительности K получаем выражение

$$\begin{aligned}
 K &= 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \mp \\
 &\mp \frac{\Theta_{1/2}(\mu^*)}{kT \cdot F_{1/2}(\mu^*)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_i} \mathcal{G}_i^j \Xi_i}{(n + \zeta)} \cdot \beta_{\perp} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \mp \\
 &\mp \frac{1}{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}} \cdot \frac{\Theta_{1/2}(\mu^*)}{kT \cdot F_{1/2}(\mu^*)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_i} \mathcal{G}_i^j}{(n + \zeta)} \times \\
 &\times [1 - (\bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}})], \quad (4)
 \end{aligned}$$

где

$$\mathcal{G}_i^j = \left. \frac{\partial N_i(\mu^*, E_i^j)}{\partial E_i^j} \right|_{\mu^* = \text{const}}; \quad \zeta_i^j = \left. \frac{\partial N_i(\mu^*, E_i^j)}{\partial \mu^*} \right|_{E_i^j = \text{const}};$$

N_i — концентрация электронов, активированных в зону проводимости с i -го примесного уровня;

$F_{\gamma}(\mu^*) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\gamma} dx}{1 + \exp(x - \mu^*)}$ — интеграл Ферми степени γ ; $f_0 = [1 + \exp(x - \mu^*)]^{-1}$ — функция распределения Ферми—Дирака; μ — химический потенциал; $\mu^* = \mu / kT$ — приведенный химический потенциал; $\Theta_{\gamma}(\mu^*) = \int_0^{\infty} \left(-\frac{\partial f_0}{\partial x} \right) x^{\gamma} dx = F_{\gamma}(\mu^*) / \Gamma(\gamma + 1)$; $\Gamma(\gamma + 1)$ — гамма-функция [6]; $\gamma = 1/2$.

Для барического коэффициента сопротивления

$B = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial P_g} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial P_g}$ по аналогии с (4) можно записать:

$$\begin{aligned}
 B &= -\frac{\Theta_{1/2}(\mu^*)}{kT \cdot F_{1/2}(\mu^*)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_i} \mathcal{G}_i^j \Xi_i}{(n + \zeta)} \cdot \beta_g = \\
 &= -\frac{1}{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}} \cdot \frac{\Theta_{1/2}(\mu^*)}{kT \cdot F_{1/2}(\mu^*)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{j_i} \mathcal{G}_i^j}{(n + \zeta)} \times \\
 &\times \left[\frac{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}}{E_{\text{SmS}}} + 2 \cdot (1 - \bar{v}_{\text{SmS}} - 2v_{\text{подл.}}) \right], \quad (5)
 \end{aligned}$$

где β_g — объемная сжимаемость.

Из (4) и (5) находим искомое соотношение между K и B :

$$\begin{aligned}
 K &= 1 + \bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}} \mp \\
 &\mp B \cdot E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} \cdot \frac{[1 - (\bar{v}_{\text{SmS}} + v_{\text{подл.}})]}{\left[\frac{E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}}}{E_{\text{SmS}}} + 2 \cdot (1 - \bar{v}_{\text{SmS}} - 2v_{\text{подл.}}) \right]}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

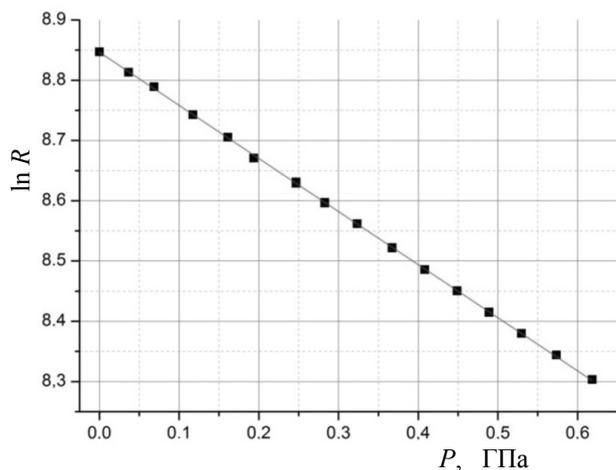


Рис. 1. Барическая зависимость логарифма электросопротивления R пленочного тензодатчика на основе SmS на подложке из константана

Обращает на себя внимание тот факт, что в конечную формулу (6) параметры зонной структуры пленки SmS уже не входят в силу изотропности тензо(баро)резистивного эффекта, в основе которого лежит сферическая симметрия строения дна зоны проводимости, образованного состояниями ионов Sm S-типа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЫВЕДЕННОГО СООТНОШЕНИЯ

Справедливость выражения (6) можно проверить экспериментально. С этой целью стандартный тензодатчик на основе пленки SmS, напыленной на металлическую константановую подложку через изолирующий слой SiO, был подвергнут гидростатическому сжатию в среде полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-5 до давления $P = 0.62$ ГПа. Барическая зависимость логарифма электросопротивления пленки приведена на рис. 1. По наклону зависимости $\ln R(P)$ был определен коэффициент $B = -0.88$ ГПа⁻¹. Модуль Юнга мате-

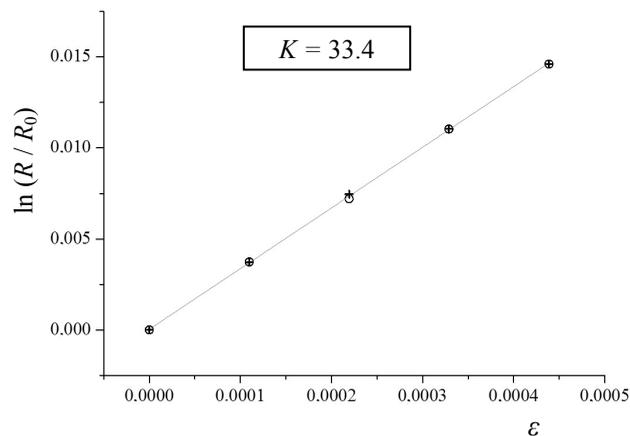


Рис. 2. Зависимость логарифма приведенного электросопротивления пленочного тензодатчика на основе SmS на подложке из константана от одноосной деформации

риала подложки (константана) $E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} = 1.63 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона — 0.33, модуль Юнга поликристаллического SmS $\bar{E}_{\text{SmS}}^{\text{Ю}} = 0.83 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона — 0.21 [7]. На основании этих данных по формуле (6) была рассчитана величина коэффициента тензочувствительности K , которая оказалась равной $K = 33.2$. Далее испытуемый образец был подвергнут одноосной деформации на установке для калибровки тензорезисторов, и для него было получено значение $K = 33.4$. Как видно, величина коэффициента тензочувствительности K , рассчитанного по величине B , превосходно совпадает с его экспериментально определенным значением с точностью не хуже 1%. Это дает возможность рассчитать и построить справочные таблицы перевода величин B в величины K для пленок SmS, напыленных на различные подложки. В приведенной таблице, в частности, представлены такие переводные данные для пленок SmS на стеклянной и константановой подложках.

Соответствие барических коэффициентов сопротивления B коэффициентам тензочувствительности K для поликристаллических пленок SmS на подложках из стекла и константана

| $B \cdot 10^{-3}, \text{MPa}^{-1}$ | K для подложки из стекла с параметрами: $E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} = 80$ ГПа; $\nu = 0.2$ | K для подложки из константана с параметрами: $E_{\text{подл.}}^{\text{Ю}} = 163$ ГПа; $\nu = 0.33$ |
|------------------------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 0.5 | 14.9 | 19.54 |
| 0.6 | 17.6 | 23.14 |

Продолжение таблицы

| 1 | 2 | 3 |
|-----|------|--------|
| 0.7 | 20.3 | 26.74 |
| 0.8 | 23.0 | 30.34 |
| 0.9 | 25.7 | 33.94 |
| 1.0 | 28.4 | 37.54 |
| 1.1 | 31.1 | 41.14 |
| 1.2 | 33.8 | 44.74 |
| 1.3 | 36.5 | 48.34 |
| 1.4 | 39.5 | 51.94 |
| 1.5 | 41.9 | 55.54 |
| 1.6 | 44.6 | 59.14 |
| 1.7 | 47.3 | 62.74 |
| 1.8 | 50.0 | 66.34 |
| 1.9 | 52.7 | 69.94 |
| 2.0 | 55.4 | 73.54 |
| 2.1 | 58.1 | 77.14 |
| 2.2 | 60.8 | 80.74 |
| 2.3 | 63.5 | 84.34 |
| 2.4 | 66.2 | 87.94 |
| 2.5 | 68.9 | 91.54 |
| 2.6 | 71.6 | 95.14 |
| 2.7 | 74.3 | 98.74 |
| 2.8 | 77.0 | 102.34 |
| 2.9 | 79.7 | 105.94 |
| 3.0 | 82.4 | 109.54 |

Работа выполнена при поддержке фирмы SmS-tenzotherm GmbH.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
2. Каминский В.В., Рябов А.В., Степанов Н.Н. Влияние упругих деформаций на концентрации носителей тока в моносulfиде самария // ФТТ. 1981. Т. 23, вып. 4. С. 1805–1807.
3. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Васильев Л.Н. и др. Влияние давления на подвижность носителей тока в SmS // ФТТ. 1985. Т. 27, вып. 1. С. 77–82.
4. Улашкевич Ю.В., Каминский В.В., Голубков А.В. Особенности инфракрасных спектров отражения полупроводникового SmS в области гомогенности // ФТП. 2009. Т. 43, вып. 3. С. 324–328.
5. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Володин Н.М., Мишин Ю.Н. Барорезистивный эффект и полупроводниковые тонкопленочные барорезисторы на основе сульфида самария для аэрокосмических аппаратов // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 1–4.
6. Блэкмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках. М.: Мир, 1964. 392 с.

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, Санкт-Петербург**

Контакты: Степанов Николай Николаевич,
stnick@hotmail.ru

Материал поступил в редакцию 7.06.2012

TEST OF STRAIN GAGES BASED ON SmS SEMICONDUCTOR THIN FILMS

N. N. Stepanov, V. V. Kaminsky, A. A. Molodykh

Ioffe Physical Technical Institute of the RAS, St. Petersburg

The authors propose a method for determining the gage factor of strain gages based on polycrystalline films of samarium monosulphide (SmS) without loss of performance properties. We derive the relation between gage factor K and pressure coefficient of resistance under hydrostatic compression B (barorezistor mode). It is show that the correlation between K and B is determined only by elastic constants of strain sensitive layer of polycrystalline SmS and elastic constants of substrate on which it was formed.

Keywords: strain gage, tenzorezistor, barorezistor, samarium monosulphide, gage factor, pressure coefficient of resistance, thin film