

УДК 531.7.681.2

© В. В. Каминский, Н. Н. Степанов, Н. М. Володин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА БАРИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК SmS

В работе приведены результаты исследования температурной зависимости барического коэффициента электросопротивления (БКС) барорезистора на основе тонкой пленки моносulfида самария (SmS) на стеклянной (SiO<sub>2</sub>) подложке в диапазоне 77–350 К. На температурной зависимости модуля БКС наблюдается особенность в виде острого максимума. Наличие максимума объясняется активацией электронов проводимости с донорного уровня, энергия которого зависит от температурных деформаций, возникающих вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки. Произведен расчет энергии активации этого донорного уровня. На основании результатов работы определена приемлемая для технического применения низкотемпературная граница эксплуатации тензо- и барорезисторов на основе пленок SmS, равная ~ 150 К.

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

В работах [1, 2] проводилось исследование температурных зависимостей барочувствительности барорезисторов, изготовленных на основе тонких поликристаллических пленок моносulfида самария, сформированных на подложках (носителях) из различных материалов. В результате проведенных экспериментов была показана возможность использования таких пленок в качестве первичных преобразователей датчиков механических величин в температурном диапазоне от –30 до 223 °С (243÷496 К) и приведены примеры их использования для решения ряда технических проблем. Однако в различных отраслях науки и техники существуют задачи, требующие применения более низкотемпературных датчиков механических величин. В связи с этим интересным и перспективным представлялось проведение исследований температурных зависимостей БКС тонких поликристаллических пленок SmS в низкотемпературной области, тем более что ранее нами были получены обнадеживающие результаты в ходе проведения аналогичных экспериментов на монокристаллах SmS [3].

С указанной целью поликристаллические пленки SmS, нанесенные методом взрывного испарения в вакууме на стеклянные подложки [4], подвергались гидростатическому сжатию газообразным гелием при температурах  $T \geq 77$  К. При каждой фиксированной температуре проводилось из-

мерение электросопротивления пленки при повышении и сбросе давления. Более подробно описание установки и методика работы с ней даны в [3]. Барический коэффициент электросопротивления  $B$ , рассчитывался по формуле:

$$B = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial P} = \frac{\partial \ln R}{\partial P}, \quad (1)$$

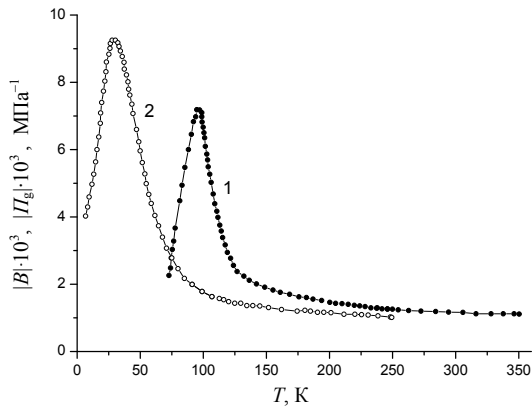
или

$$B = \frac{\Delta R}{R \Delta P}, \quad (2)$$

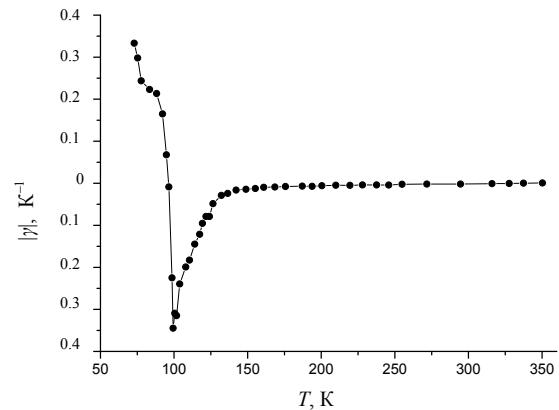
где  $R$  — электросопротивление испытуемой пленки,  $\Delta R$  — приращение электросопротивления,  $P$  — давление всестороннего сжатия. На основании полученных данных строилась температурная зависимость  $B(T)$ . Поскольку, как показано в [5], для материала SmS существует взаимнооднозначное соответствие между его коэффициентом тензочувствительности и БКС, эксперименты при одноосной деформации пленки представлялись излишними.

Результаты исследования  $B(T)$  пленки SmS приведены на рис. 1. Здесь же с иллюстративной целью размещен график зависимости модуля коэффициента пьезосопротивления всестороннего сжатия  $|P_g(T)|$  для монокристалла SmS из [3].

Обращает на себя внимание наличие особенно-



**Рис. 1.** Температурные зависимости модулей БКС тонкой поликристаллической пленки SmS (1) и коэффициента пьезосопротивления гидростатического сжатия монокристалла SmS (2)



**Рис. 2.** Температурная зависимость температурного коэффициента БКС полупроводниковой поликристаллической пленки SmS на стеклянной подложке

стей в виде острых максимумов на зависимостях  $|B(T)|$  и  $|\Pi_g(T)|$  для пленки и монокристалла SmS. В работе [3] указанная особенность для монокристалла была объяснена наличием в последнем донорных уровней с энергией активации  $E_d \approx 3.5$  эВ относительно дна зоны проводимости, что соответствует температуре  $T \approx 40$  К. При более низких температурах коэффициент пьезосопротивления  $\Pi_g$  "вымораживается" вследствие недостаточной для термоактивации доноров тепловой энергии, а при более высоких температурах ( $T > 60$  К) истощается концентрация неионизированных доноров. В пленке максимум зависимости  $|B(T)|$  сдвинут в сторону более высоких температур — до  $T \approx 90$  К. Подобный эффект может быть объяснен температурной деформацией пленки SmS под влиянием подложки, с которой они имеют различные термические коэффициенты расширения. А priori понятно, что величина температурного сдвига максимума  $|B(T)|$  в пленке будет зависеть и от материала подложки, и от технологии напыления пленки. Поскольку температурный коэффициент расширения SmS превосходит таковой стеклянной подложки, пленка в рассматриваемом случае находится под действием деформаций растяжения, и упомянутые донорные уровни  $E_d$  в ней просто заглублены относительно их положения в монокристалле. Соответственно их энергия активации при этом возрастает. Высказанное предположение можно проверить путем проведения расчетов изменения удельных объемов монокристалла и пленки при изменении температуры и далее в рамках теории деформационного потенциала оценить глубину залегания примесных донорных уровней в последней.

Изменение удельного объема пленки  $(\Delta V/V)_{пл} = Sp(\varepsilon_{ij})$ , где  $\varepsilon_{ij}$  — компоненты тензора деформации;  $i$  и  $j$  — пробегает значения 1, 2, 3. Компоненты

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{cm}(T) dT = \bar{\alpha}_{cm} \cdot \Delta T,$$

где  $\alpha_{cm}(T)$  — температурная зависимость линейного коэффициента термического расширения

стеклянной подложки;  $\bar{\alpha}_{cm} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{cm}(T) dT / \Delta T$  — ус-

редненный линейный коэффициент теплового расширения стекла;  $T_1$  — температура подложки пленки SmS в процессе формирования (720 К),  $T_2$  — температура проведения эксперимента ( $\geq 77$  К);  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Компонента  $\varepsilon_{33} = (\bar{\alpha}_{SmS} - 2\bar{v}_{SmS} \bar{\alpha}_{cm}) \cdot \Delta T$ , где  $\bar{v}_{SmS}$  — усредненный по всем неэквивалентным кристаллографическим направлениям в кристаллитах пленки SmS коэффициент Пуассона [6],  $\bar{\alpha}_{SmS}$  — усредненный линейный коэффициент теплового расширения SmS (определяется аналогично  $\bar{\alpha}_{cm}$ ). Отсюда следует, что  $(\Delta V/V)_{пл} = [2\bar{\alpha}_{cm}(1 - \bar{v}_{SmS}) + \bar{\alpha}_{SmS}] \cdot \Delta T$ . Величины  $\bar{v}_{SmS}$ ,  $\bar{\alpha}_{cm}$  и  $\bar{\alpha}_{SmS}$  равны соответственно 0.21,  $(4 \div 6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и  $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [6–8]. Максимальное отношение изменений удельных объемов монокристалла и пленки

$$(\Delta V/V)_{SmS} / (\Delta V/V)_{пл} = 1.67.$$

Если исходить из предположения, что деформационный потенциал донорных уровней  $E_d$  в монокристалле и пленке одинаков, то в последней глу-

бина залегания относительно дна зоны проводимости составит  $E_{d(пл)} = 1.67 \cdot E_{d(кр)} = 5.9$  мэВ, что соответствует  $T \approx 70$  К. Максимум температурной зависимости  $B(T)$  пленки должен располагаться по температурной шкале несколько выше 70 К. Разница между температурой максимума пика и выраженной в единицах температуры энергией активации донорных уровней  $E_{d(пл)}$ , которые ответственны за его наличие, определяется положением последних относительно уровня химического потенциала. Вычисление температуры максимума пика представляет собой достаточно сложную математическую задачу, решение которой выходит за рамки настоящего сообщения.

Низкотемпературная граница применения поликристаллических пленок моносulfида самария в качестве материала для тензо- и барорезисторов, даже при больших значениях БКС, обуславливается приемлемыми для данных условий эксплуатации температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) пленки и температурным коэффициентом БКС, определяемым по формуле

$$\gamma = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial B}{\partial T} = \frac{\partial \ln B}{\partial T}. \quad (3)$$

Однако, если первый (ТКС) еще удастся скомпенсировать, например, применением мостовых схем для регистрации сигналов с датчиков, то второй не поддается термокомпенсации так просто, и именно его температурная зависимость определяет нижнюю температурную границу применимости пленочных тензо- и барорезисторов на основе SmS. Как видно из графика зависимости  $\gamma$  от температуры, представленного на рис. 2, этот температурный предел эксплуатации составляет  $\approx 150$  К или  $-123$  °С, поскольку до этой температуры  $\gamma$  изменяется слабо и мала по величине.

*Работа выполнена при поддержке фирмы SmS-tenzotherm GmbH.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Большев К.Н., Алексеев А.А. и др. Методика исследования ветвления трещины при низкотемпературных натуральных испытаниях // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 2. С. 57–62.
2. Каминский В.В., Молодых А.А., Степанов Н.Н. и др. Особенности применения полупроводниковых тензо- и барорезисторов на основе сульфида самария // Научное приборостроение. 2011. Т. 21, № 2. С. 53–59.
3. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Васильев Л.Н. и др. Пьезосопротивление моносulfида самария при криогенных температурах // ФТТ. 1985. Т. 27, в. 7. С. 2162–2165.
4. Слущкая В.В. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. 399 с.
5. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Молодых А.А. Тестовые испытания полупроводниковых тензорезисторов на основе тонких пленок SmS // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 1. С. 136–140.
6. Каминский В.В., Степанов Н.Н., Молодых А.А., Соловьев С.М. Исследование электрических свойств тонких пленок SmS при высоких давлениях // ФТТ. 2011. Т. 63, в. 10. С. 1920–1922.
7. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1972. 256 с.
8. Каминский В.В., Шаренкова Н.В., Васильев Л.Н., Соловьев С.М. Исследование температурной зависимости параметра кристаллической решетки SmS // ФТТ. 2005. Т. 47, в. 2. С. 217–219.

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

*ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, г. Химки, Моск. обл. (Володин Н.М.)*

Контакты: Степанов Николай Николаевич, stnick@hotmail.ru

Материал поступил в редакцию 5.02.2013

## THE INFLUENCE RESEARCH OF TEMPERATURE DEFORMATION ON PRESSURE COEFFICIENT OF RESISTANCE OF THE SmS THIN POLYCRISTALLINE FILMS

V. V. Kaminskii<sup>1</sup>, N. N. Stepanov<sup>1</sup>, N. M. Volodin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Ioffe Physicotechnical Institute RAS, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup>*Federal Enterprise "Lavochkin Association", Moscow region, Khimki*

The article presents the results of the researches, dedicated to the temperature dependence of the pressure electrical resistivity coefficient (PRC) of the baroresistor on the ground of thin film of the samarium monosulfide (SmS) on the glass substrate (SiO<sub>2</sub>) within the range of 77–350 K.

The feature as a sharp maximum is observed throughout the temperature dependence of the PRC module. This maximum can be explained by the growing activity of electrons conductivity from the donor level, which energy depends on the temperature deformation, appearing as the result of the temperature coefficients difference between linear dilatation of the film and glass substrate.

The calculation of the activation energy according to this donor level is carried out. On the basis of the work results the acceptable for the technical using the low temperature border for tenso- and barorezistor operation on the ground of the SmS films equal to the  $\sim 150$  K is determined.

*Keywords:* coefficient of piezoresistance, thermal deformation, strain gage, tenzorezistor, barorezistor, samarium monosulfide, tenzosensitivity coefficient, pressure coefficient of resistance, thin film