

УДК 537.31

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕНОСА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ SmS

*В. В. Каминский, А. А. Виноградов, Н. М. Володин,  
М. В. Романова, Г. А. Сосова*

На основании анализа экспериментальных зависимостей электросопротивления и коэффициента Холла поликристаллических пленок и поликристаллов моносulfида самария от температуры и деформации, а также зависимости удельного электросопротивления пленок от толщины сделан вывод о наличии в пленках SmS перескокового механизма проводимости, который имеет место наряду с зонным.

По своим электрическим параметрам пленки полупроводникового SmS существенно отличаются от объемных образцов. Такое отличие для различных материалов может иметь различную природу, и выяснение ее требует специального рассмотрения в каждом конкретном случае [1]. Для моносulfида самария эта задача актуальна еще и потому, что поликристаллические пленки SmS находят применение при изготовлении тензорезисторов [2]. С целью выяснения причин отличия электрических параметров пленок и объемных образцов SmS в настоящей работе исследованы их электросопротивление и эффект Холла в зависимости от температуры, а также при одноосной деформации.

Пленки были получены путем взрывного испарения в вакууме моносulfида самария с последующим осаждением на подложку из силикатного стекла. Толщины пленок измерялись с помощью микроинтерферометра МИИ-4 и имели значение 0.4—0.8 мкм. Измерение электросопротивления и коэффициента Холла проводилось на постоянном токе и в постоянном магнитном поле в интервале температур 77—300 К. Деформирование пленок осуществлялось посредством приложения к ним растягивающей нагрузки. При этом относительные деформации не превышали  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Типичные температурные зависимости удельного электросопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла  $R$ , снятые на пленках SmS толщиной  $d \sim 0.5$  мкм, приведены на рис. 1. Холловские подвижности носителей заряда в таких пленках  $U = R/\rho \leq 1$  см<sup>2</sup>/В·с и, как следует из рис. 1, весьма слабо зависят от температуры. Обычные значения холловских концентраций  $n = 1/eR \sim 10^{20} \div 10^{21}$  см<sup>-3</sup> при  $T = 300$  К. Для монокристаллических объемных образцов SmS эти величины имеют значения 30—80 см<sup>2</sup>/В·с и  $(1 \div 3) \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> соответственно.

Наиболее обычным механизмом, уменьшающим подвижность носителей заряда в тонких пленках по сравнению с объемными образцами, является размерный эффект. Он проявляется тогда, когда длина свободного пробега носителей заряда сравнима с толщиной пленки. Однако оценка длины свободного пробега электронов проводимости в SmS, проведенная исходя из величин их подвижности<sup>1</sup> и эффективной массы

<sup>1</sup> Как показано в [3], в монокристаллах SmS холловская подвижность носителей заряда не должна отличаться от дрейфовой более чем на 5—6 %.

( $m^* \approx m_0$  [4]), дает значения 20—50 Å, что на два порядка меньше толщин исследованных пленок. Кроме того, полученная нами зависимость указывает на рост удельного сопротивления материала пленок с увеличением их толщины (рис. 2) вместо обычного при наличии размерного эффекта убывания [5]. Таким образом, наши пленки не являются достаточно тонкими для того, чтобы эта причина вызвала заметное уменьшение подвижности носителей заряда.

Рассмотрим влияние фактора поликристалличности на кинетические коэффициенты в пленках.

Поскольку SmS обладает кубической структурой, различная ориентация кристаллитов не должна вызывать отличие удельного сопротивления поликристаллических структур от монокристаллов. Однако границы могут выступать в качестве рассеивающих нейтральных дефектов, а также с ними могут быть связаны поверхностные состояния. Эти состояния

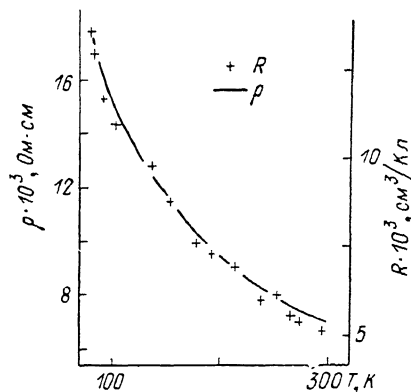


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления (кривая) и коэффициента Холла (точки) поликристаллической пленки SmS.

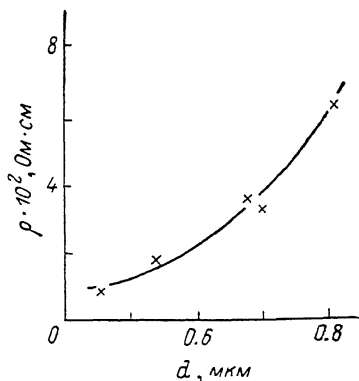


Рис. 2. Зависимость удельного электро-сопротивления поликристаллических пленок SmS от их толщины (300 К).

изменяют объемные свойства кристаллитов на глубину, соответствующую дебаевской длине экранирования  $L$ . Расчет  $L = (\epsilon \epsilon_0 k T / e^2 n)^{1/2}$ , где  $n = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \approx 20$ , дал  $L \sim 10 \text{ Å}$ , что значительно меньше размеров кристаллитов (200—1000 Å) в полупроводниковых пленках SmS [6]. Поэтому влияние границ зерен на объемные свойства кристаллитов мало. Роль самих границ может быть оценена из сравнения электрических свойств монокристаллов и поликристаллических образцов SmS. Измерения электрических параметров поликристаллических образцов показали, что их величины ( $U \sim 20 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$ ) мало отличаются от соответствующих значений для монокристаллов. На рис. 3 представлены типичные для поликристаллов температурные зависимости  $\rho$  и  $R$  (а) и зависимости  $\mu$  (Т) (б) для поликристалла (2) и монокристалла (1) SmS с одинаковой концентрацией носителей заряда  $n \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Некоторое понижение подвижности в поликристалле по сравнению с монокристаллом имеет место наряду с выполаживанием ее температурной зависимости, что можно объяснить наличием дополнительного рассеяния на границах кристаллитов, как на нейтральных дефектах [7]. Однако в пленках указанная причина понижения  $\mu$  не может быть единственной, так как в этом случае удельное сопротивление пленок должно было бы быть более чем на порядок выше по сравнению с  $\rho$  монокристаллов, в то время как экспериментальные их значения отличаются не более чем в 2 раза [2].

Значительное уменьшение коэффициента Холла в исследованных нами пленках по сравнению с объемными образцами (0.005—0.05 и 0.2—1  $\text{см}^3/\text{Кл}$ , соответственно) можно объяснить, если воспользоваться моделью, согласно которой все электроны, участвующие в электропереносе,

делятся на две группы: электроны зоны проводимости и электроны, вносящие вклад в электропроводность посредством перескоков. Наличие перескоковой проводимости в пленках SmS было обнаружено при исследовании частотных зависимостей электропроводности при различных температурах [7]. Концентрацию и подвижность перескоковых носителей заряда можно оценить из сравнения наблюдаемых и расчетных значений коэффициента Холла. При расчете была использована формула, применяемая при наличии в полупроводнике двух сортов носителей заряда

$$R = \frac{1}{en_1} \frac{1 + (n_2/n_1)(u_2/u_1)^2}{(1 + n_2/u_2/n_1u_1)^2}, \quad (1)$$

где  $n_1 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $u_1 = 20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  — концентрация и подвижность электронов в зоне проводимости;  $n_2$ ,  $u_2$  — концентрация и подвижность перескоковых электронов. Оценка дает значения  $n_2 = 10^{21} \div 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и  $u_2 =$

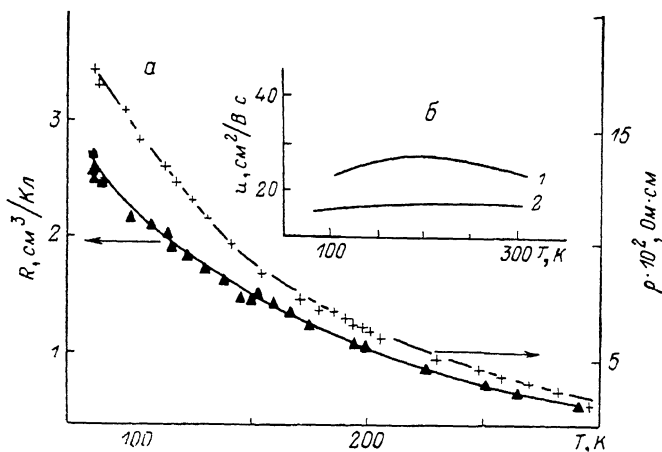


Рис. 3. Температурные зависимости электрических параметров объемных образцов SmS.

$= 0.1 \div 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При этом принимались во внимание естественные ограничения для величин  $n_2$  и  $u_2$ :  $n_2$  не может быть больше концентрации ионов самария, а  $u_2$  не может превышать экспериментального значения холловской подвижности для пленок.

Справедливость предложенной модели можно проверить экспериментально. Известно [8], что в основе тензорезистивного эффекта в SmS лежит изменение под действием деформации концентрации носителей тока, а их подвижность изменяется слабо. Исходя из того что чувствительность электропроводности к деформации в объемных образцах SmS всегда выше, чем в пленках, можно заключить, что перескоковая составляющая проводимости значительно менее зависима от деформации, чем зонная. Вследствие этого чувствительность электросопротивления и коэффициента Холла пленок к деформации должна быть различной. Нами были проведены измерения  $R$  и  $\rho$  пленок при их одноосном растяжении при 300 К. Типичные результаты для одной из пленок с  $R = 0.019 \text{ см}^3/\text{Кл}$  приведены на рис. 4. Коэффициент Холла изменялся под действием деформации почти в 3 раза быстрее, чем электросопротив-

Параметры модели и результаты расчета

| $n_2, \text{ см}^{-3}$ | $u_2, \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ | $R, \text{ см}^3/\text{Кл}$ | $\frac{\Delta \rho}{\rho}, \%$ | $\frac{\Delta R}{R}, \%$ |
|------------------------|---|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| $10^{22}$              | 0.1   | 0.018                       | 1                              | 3.7                      |
| $10^{21}$              | 1   | 0.022                       | 1                              | 2.8                      |

ление. Полагая, что величины  $R$  и  $\rho$  при деформации изменяются только вследствие изменения  $n_1$ , мы оценили поведение зависимости  $\Delta R/R$  от  $\Delta\rho/\rho$  при различных значениях параметров перескоковых носителей заряда. Оценка проводилась исходя из формулы (1) и соотношения

$$\rho = (en_1u_1 + en_2u_2)^{-1}. \quad (2)$$

Заданному значению  $\Delta\rho/\rho$ , используя (2), ставилось в соответствие значение  $\Delta n_1$  и по нему, используя (1), находилось  $\Delta R/R$ . В таблице приведены параметры и результаты расчета, а на рис. 4 — расчетная кривая для случая  $n_2=10^{21}$  см<sup>-3</sup>,  $u_2=1$  см<sup>2</sup>/В·с. Налицо вполне удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных как по величине  $R$ , так и по характеру зависимости  $\Delta R/R$  от  $\Delta\rho/\rho$ , что свидетельствует в пользу предложенной модели. На рис. 4 представлены также результаты измерений на поликристаллическом объемном образце SmS. Характер зависимости такой же, как и для монокристаллов SmS [8]: коэффициент Холла изменяется с деформацией почти также и даже несколько медленнее, чем электросопротивление (штриховая линия соответствует  $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho$ ). Этот факт дает основание считать, что перескоковая проводимость в объемных поликристаллах отсутствует (либо вклад ее пренебрежимо мал) и, таким образом, перескоковый механизм является специфической особенностью электропереноса в пленках SmS.

Можно предположить, что перескоковая проводимость в пленках связана с влиянием их поверхностей. На это указывает рост удельного сопротивления материала пленок с увеличением их толщины (рис. 3). Он может быть связан с уменьшением шунтирующего влияния приповерхностного слоя, в котором наряду с обычной зонной имеет место перескоковая проводимость. Другое возможное объяснение экспериментальных данных заключается в следующем. В [6] были отмечены два факта: 1)  $\rho$  пленок SmS уменьшается с понижением параметра кристаллической решетки, 2) количество ионов Sm<sup>3+</sup> повышается при уменьшении параметра решетки. В то же время  $\rho$  уменьшается с уменьшением толщины пленки (рис. 3), следовательно, можно думать, что с уменьшением толщины пленки увеличивается количество ионов Sm<sup>3+</sup>. Если это так, то можно предположить, что наличие и количество ионов Sm<sup>3+</sup> определяют концентрацию перескоковых носителей заряда во всем объеме пленки, а значит, и ее электросопротивление. Следует, однако, отметить, что оба изложенных варианта объяснения полученных результатов не являются взаимоисключающими.

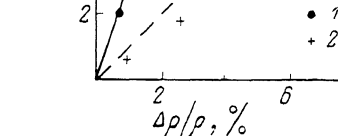


Рис. 4. Относительные изменения удельной электропроводности и коэффициента Холла поликристаллической пленки (1) и поликристалла (2) SmS под действием деформаций.  $\Delta l/l \leq 5 \cdot 10^{-4}$  (300 К).

Авторы благодарны В. М. Сергеевой за предоставление поликристаллических образцов SmS.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Казмерски Л. Тонкие поликристаллические пленки. Физика и применение. М.; Мир, 1983. 304 с.
- [2] Каминский В. В., Смирнов И. А. // Приборы и системы управления. 1985. № 8. С. 22—24.
- [3] Каминский В. В., Степанов Н. Н. // Деп. в ВИНТИ. 1985. № 2308-85 деп. 43 с.
- [4] Смирнов И. А., Оскотский В. С. // УФН. 1978. Т. 124. № 2. С. 241—279.
- [5] Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. М.; Мир, 1972. 435 с.

- [6] Погарёв С. В., Куликова И. Н., Гончарова Е. В., Романова М. В., Финкельштейн Л. Д., Ефремова Н. Н., Жукова Т. Б., Гарцман К. Г., Смирнов И. А. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 2. С. 434—439.
- [7] Виноградов А. А., Володин Н. М., Каминский В. В., Романова М. В., Сергеева В. М. // Тез. докл. IV Всес. конф. по физике и химии редкоземельных полупроводников. Новосибирск, 1987. С. 156.
- [8] Виноградов А. А., Гребинский С. И., Каминский В. В., Степанов Н. Н., Сергеева В. М., Смирнов И. А. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 2. С. 402—408.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
7 апреля 1989 г.