

# Исследование температурных зависимостей электросопротивления монокристаллов SmS при различных давлениях

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

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

E-mail: vladimir.kaminski@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 15 октября 2009 г.)

В окончательной редакции 3 декабря 2009 г.)

На основании измерений температурных зависимостей электросопротивления монокристаллов SmS при различных давлениях получена величина барического сдвига примесных уровней при гидростатическом сжатии ( $-9.6 \text{ meV/MPa}$ ) при  $T = 300 \text{ K}$ . Полученная величина подтверждает справедливость существующей модели фазового перехода полупроводник–металл в моносulfиде самария.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-08-00289).

Известно, что SmS претерпевает изоструктурный фазовый переход полупроводник–металл при гидростатическом сжатии  $P \approx 6.5 \text{ kbar}$  [1]. Согласно предложенной в [2,3] модели указанного перехода, последний представляет собой последовательность двух фазовых переходов моттовского типа: первый, проходящий в системе примесных уровней в SmS, и второй, проходящий в системе  $4f$ -уровней ионов Sm. Качественно процесс можно представить себе следующим образом. При возрастании давления, приложенного к исследуемому образцу, примесные уровни, расположенные на величину энергии  $E_i$  ниже дна зоны проводимости, постепенно приближаются к дну зоны проводимости благодаря наличию барического сдвига их энергии. В результате в зоне проводимости постепенно накапливается порядка  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  дополнительных носителей тока, перешедших с уровней дефектов. Эта величина оказывается пороговой для достижения концентрации носителей, приводящих к столь сильной экранировке потенциала дефектов, что электроны на них не могут более оставаться локализованными и уровни дефектов с  $E_i \neq 0$  сразу выталкиваются в зону проводимости, т.е. происходит моттовский переход в системе дефектов. Резко возросшая таким образом концентрация электронов в зоне проводимости приводит в свою очередь к „экранировке“  $4f^6$ -уровней, достаточной для того, чтобы произошел переход опять моттовского типа, но в системе  $4f^6$ -уровней.  $4f^6$ -уровни входят в зону проводимости, и SmS становится металлом.

Ранее непосредственное измерение барического сдвига примесных уровней  $E_i$  не проводилось, поэтому указанная модель носила, скорее, качественный характер. В последнее время стали проводиться расчеты параметров фазового перехода в рамках данной модели [3] и потребовалось уточнение некоторых характеристик полупроводниковой фазы SmS: барические сдвиги энергетических уровней, величины расщепления  $4f$ -уровней в кристаллическом поле решетки [4], величина эффективной массы носителей заряда и т.д.

В настоящей работе предпринята попытка непосредственного измерения величины  $\partial E_i / \partial P$ .

Исследования проводились на монокристаллах SmS с характерным размером  $3 \times 1.5 \times 1 \text{ mm}$ , выколотых по плоскостям спайности [100]. Концентрация электронов проводимости составляла  $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . При таких концентрациях SmS представляет собой невырожденный полупроводник  $n$ -типа. Измерения электросопротивления проводились четырехзондовым методом на постоянном токе в камере высокого давления клапанного типа [5]. Средой, передающей давление на исследуемый образец, служила жидкость ПЭС-5. Нагревание образца в интервале температур 295–310 K проводилось с помощью резистивного нагревателя, помещенного внутрь рабочего объема камеры. Давление в камере ступенчато изменялось вплоть до давления фазового перехода. После каждого повышения давления и его последующей фиксации производилось измерение температурной зависимости электросопротивления. При каждом фиксированном значении давления строилась зависимость  $\ln[R(P)/R_0]$  от  $10^3/T$ , где  $R(P)$  и  $R_0$  — электросопротивление образца под давлением и при атмосферном давлении соответственно. На основании полученных зависимостей по

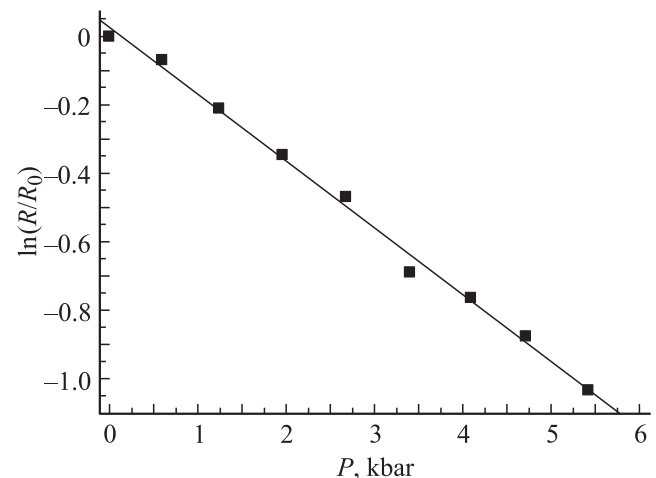
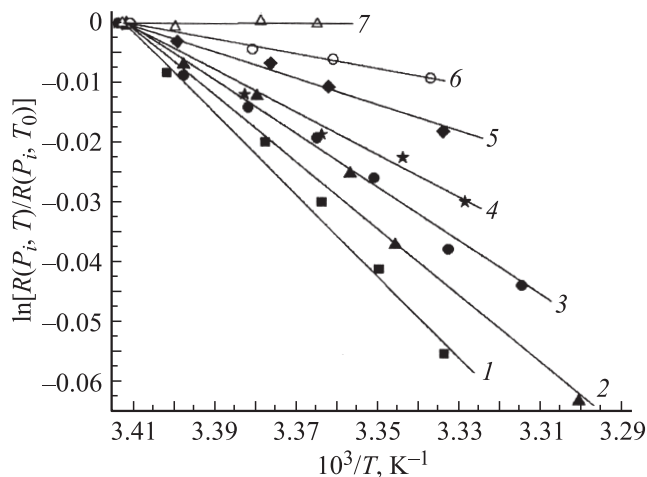
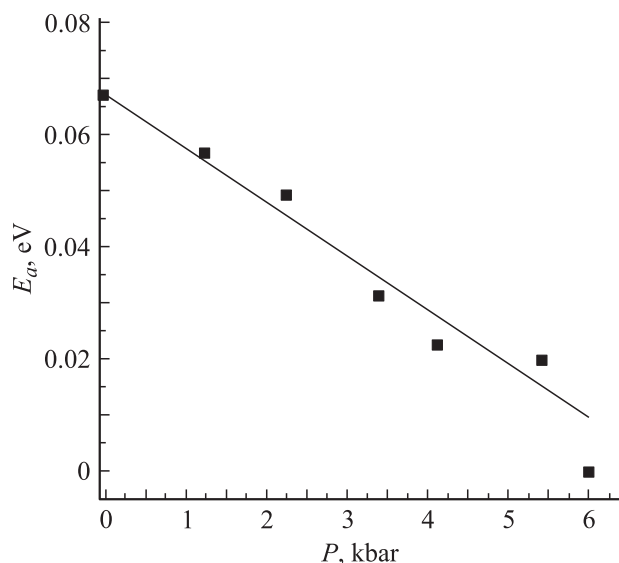


Рис. 1. Зависимость относительного сопротивления монокристалла SmS от давления гидростатического сжатия.



**Рис. 2.** Температурные зависимости относительного электро-сопротивления монокристалла SmS при различных давлениях.  $P$ , kbar: 1 — 0.001, 2 — 1.26, 3 — 2.26, 4 — 3.42, 5 — 4.14, 6 — 5.44, 7 — 6.0.



**Рис. 3.** Зависимость энергии активации проводимости в монокристалле SmS от давления гидростатического сжатия.

стандартной методике определялись энергии активации электропроводности  $E_a$ .

Следует отметить, что в указанном температурном интервале в SmS происходит активация электронов проводимости с примесных донорных уровней  $E_i = -0.045 \pm 0.015$  eV [6]. Таким образом, мы можем получить зависимость энергии активации от давления. На рис. 1 представлена зависимость относительного сопротивления SmS от давления, а на рис. 2 — температурные зависимости относительного электро-сопротивления при различных давлениях.

На рис. 3 показана зависимость величины  $E_a$  от давления. Наблюдается постепенное уменьшение  $E_a$  с давлением. В интервале давлений 5.5–6.0 kbar энергия

активации обращается в нуль. Аналогичным образом должна вести себя и энергия уровня  $E_i$  относительно дна зоны проводимости. Барический сдвиг уровня  $E_i$  может быть оценен из наклона кривой, построенной по шести первым точкам методом наименьших квадратов. Седьмая точка выпадает из рассмотрения, поскольку относится к SmS в вырожденном состоянии. Барические сдвиги  $E_i$  и  $E_a$  равны

$$\partial E_i / \partial P \approx \partial E_a / \partial P = -9.6 \cdot 10^{-2} \text{ meV/MPa}. \quad (1)$$

На то, что поведение  $E_a$  достаточно точно отражает поведение  $E_i$ , указывает примерное равенство экспериментальной величины  $E_a$  значению  $E_i$ ; кроме того, экстраполяция зависимости  $E_a(P)$  к  $E_a = 0$  дает значение давления 7 kbar, несколько большее давления фазового перехода полупроводник–металл в SmS при всестороннем сжатии (6.5 kbar, рис. 3). Это обстоятельство свидетельствует о том, что при данном значении барического сдвига уровни  $E_i$  попадают в зону проводимости при давлении фазового перехода. Полученный результат согласуется с существующей моделью фазового перехода полупроводник–металл в SmS [2]. Энергия активации может быть близка к глубине залегания уровня в случае, когда энергия Ферми находится вблизи дна зоны проводимости. Это обстоятельство и реализуется в SmS в невырожденном состоянии.

Таким образом, согласно полученным данным, барический сдвиг примесных донорных уровней  $E_i$  при всестороннем сжатии составляет  $-9.6$  meV/kbar. Такая величина согласуется с существующей моделью фазового перехода полупроводник–металл в SmS, согласно которой при фазовом переходе эти уровни входят в зону проводимости.

## Список литературы

- [1] A. Jayaraman, V. Narayanamurti, E. Bucher, R.G. Maines. Phys. Rev. Lett. **25**, 20, 1430 (1970).
- [2] В.В. Каминский, В.А. Капустин, И.А. Смирнов. ФТТ **22**, 12, 3568 (1980).
- [3] В.В. Каминский, Л.Н. Васильев. ФТТ **50**, 4, 685 (2008).
- [4] Ю.В. Улашкевич, В.В. Каминский, А.В. Голубков. ФТП **43**, 3, 324 (2009).
- [5] В.В. Каминский, Н.Н. Степанов, Л.Н. Васильев, Ю.Н. Харченко, И.А. Смирнов. ФТТ **27**, 1, 77 (1985).
- [6] А.В. Голубков, Е.В. Гончарова, В.А. Капустин, М.В. Романова, И.А. Смирнов. ФТТ **22**, 12, 3561 (1980).