

03

## Спектры отражения поликристаллов SmS в дальней инфракрасной области

© Ю.В. Улашкевич, В.В. Каминский, М.М. Казанин

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

E-mail: ulashkev@mail.ru

(Поступила в Редакцию 18 апреля 2012 г.)

Измерены спектры отражения поликристаллических образцов SmS в дальней инфракрасной области в широком интервале температур (293–80 К). Показана эффективность таких измерений для определения градиента концентрации свободных электронов, что важно для оценки величины термовольтаического эффекта в образце.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-08-00583-а, а также фирмой „SmS tenzotherm GmbH“.

### Введение

В связи с исследованиями термовольтаического эффекта в поликристаллах моносulfида самария (SmS) [1,2] возникла необходимость проведения расчетов величины электрического напряжения  $U$ , генерируемого при этом эффекте. Из данных работы [3] следует, что величина  $U$  равна

$$U = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — локальные концентрации электронов проводимости в приконтактных областях образца в момент возникновения эффекта. С учетом того, что электропроводность  $\sigma = e\mu n$  (где  $\mu$  — подвижность носителей заряда), можно записать

$$U = \frac{kT}{e} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}. \quad (2)$$

Таким образом, для оценки величины  $U$ , ожидаемой в результате термовольтаического эффекта в образце SmS, необходимы данные о концентрации электронов либо электропроводности в различных областях образца. Получить эту информацию из стандартных электрических измерений во многих случаях не представляется возможным.

В работе [4] были исследованы ИК-спектры отражения монокристаллов SmS в дальней ИК-области и показана хорошая корреляция между оптическими и электрическими параметрами этого полупроводникового соединения. Обработка экспериментальных оптических данных с использованием модели Друде–Лоренца показала хорошую применимость этой модели для описания оптических свойств кристаллов при комнатной температуре. Тем самым была показана эффективность оптических измерений для определения электрических параметров этого полупроводника. В частности, было установлено хорошее согласие значений статической удельной проводимости образца  $\sigma_0$ , полученных с помощью непосредственных электрических измерений и

вычисленных при экстраполяции из оптических данных согласно соотношению [5]

$$\sigma(\nu) = \nu \varepsilon_2(\nu)/60, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_2(\nu)$  — мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости образца, величина  $\sigma$  выражена в  $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , а волновое число  $\nu$  — в  $\text{cm}^{-1}$ .

Поэтому в настоящей работе были продолжены начатые в [6] измерения ИК-спектров отражения поликристаллических образцов SmS. С учетом отмеченного выше они были выполнены в дальней ИК-области и в широком интервале температур.

ИК-спектры отражения поликристалла SmS в области 30–700  $\text{cm}^{-1}$  были измерены в интервале температур 80–300 К на инфракрасном Фурье-спектрометре IFS-113v фирмы Брукер при разрешении 2  $\text{cm}^{-1}$  с помощью фирменной приставки отражения. Размер образца составлял 20 × 5 × 3 мм, точность поддержания его температуры — 0.5 К. Непосредственно перед спектральными измерениями образец подвергался химическому травлению, поскольку механическая полировка переводит полупроводниковый SmS в металлическое состояние. Статическая удельная проводимость образца  $\sigma_0$  в указанном выше интервале температур была измерена стандартным четырехзондовым методом при постоянном токе.

На рисунке представлены ИК-спектры отражения исследованного образца поликристалла SmS при различных температурах. На этом же рисунке приведены аппроксимации экспериментальных данных согласно модели Друде–Лоренца для комплексной диэлектрической функции  $\varepsilon(\nu)$

$$\begin{aligned} \varepsilon(\nu) &= \varepsilon_1(\nu) + i\varepsilon_2(\nu) \\ &= \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\nu_t^2}{\nu_t^2 - \nu^2 + i\nu/2\pi c\tau_{ph}} + \frac{\nu_p^2 \varepsilon_\infty}{-\nu^2 + i\nu/2\pi c\tau_p} + \varepsilon_\infty, \quad (4) \end{aligned}$$

в которой учитывается как взаимодействие плазменных и ЛО-фононных колебаний, так и их демпфирование [5].

В выражении (4) первый член описывает вклад классического демпфированного осциллятора, связанный с полярными оптическими фононами, второй — вклад свободных носителей заряда. В этой формуле  $\nu_t$  — частота поперечной оптической моды,  $\tau_{ph}$  — время релаксации фононных колебаний,  $\nu_p$  — частота незранированной плазмы,  $\tau_p$  — среднее время релаксации импульса свободных носителей. Величина  $\epsilon_\infty$  определяет вклад, обусловленный всеми остальными высокочастотными процессами,  $\epsilon_s$  — статическая диэлектрическая постоянная,  $c$  — скорость света.

Вычисленные с помощью нелинейного метода наименьших квадратов параметры уравнения (4) приведены в табл. 1, в последнем столбце которой указаны величины среднеквадратичных отклонений  $\chi^2$ , полученные при вычислениях. Сравнение этих величин со среднеквадратичной фотометрической погрешностью измерений, которую можно оценить как 1.5–2%, а также непосредственное сопоставление спектров и их аппроксимаций с помощью (4) на рисунке позволяют сделать вывод, что формула (4) хорошо описывает оптические функции поликристаллического SmS в области комнатных температур. Это подтверждается сравнением значений статической удельной проводимости образца  $\sigma_0$ , полученных с помощью непосредственных электрических измерений и вычислений из оптических данных согласно (3). Эти величины представлены в табл. 2. При более низких температурах формула (4) описывает экспериментальные спектры все менее удовлетворительно (см. рисунок и табл. 1), и расхождения между двумя значениями проводимости становятся значительными. При температурах ниже 200 К неприменимость модели Друде–Лоренца к поликристаллическим образцам SmS становится очевидной. В то же время можно ожидать, что для температур выше комнатной справедливость

**Таблица 1.** Параметры модели (4), вычисленные нелинейным методом наименьших квадратов для спектров, показанных на рисунке

$T$ , K	$\epsilon_\infty$	$\epsilon_s$	$\nu_t$ , $\text{cm}^{-1}$	$\tau_{ph} \cdot 10^{13}$ , s	$\nu_p$ , $\text{cm}^{-1}$	$\tau_p \cdot 10^{15}$ , s	$\chi^2$ , %
295	3.36	4.56	177.7	2.47	373	12.9	2.36
210	3.23	4.44	175.7	2.32	339	15.3	3.14
140	3.47	5.29	173.6	2.07	270	22.7	5.81
80	3.81	6.64	166.9	1.62	204	41	12.5

**Таблица 2.** Электрические параметры SmS

Измеренные величины		Вычисленные величины
$T$ , K	$\sigma_0$ , $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\sigma_0$ , $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
295	19.8	18.8
210	11.5	17.9
140	1.6	17.7
80	0.3	19.7
300 [4]	36.8	37
150 [4]	13.4	13

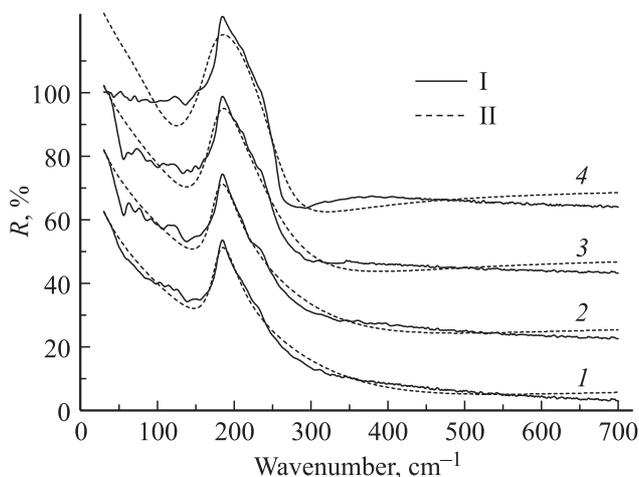
формулы (4) и соответственно (3) будет соблюдаться. Следует отметить, что для монокристаллического образца эта модель хорошо описывает оптические свойства и при значительно более низких температурах, что видно из табл. 2, в которой приведены соответствующие величины, взятые из работы [4]. Это может быть связано с более совершенной структурой кристалла в случае монокристаллического образца и с отсутствием побочных эффектов, не учитываемых моделью (4).

Таким образом, на основе измерений коэффициента отражения разных областей образца (например, противоположных граней, на которые наносятся контакты) можно по формуле (3) оценить величину градиента концентрации электронов, а по формуле (2) — величину  $U$ , которую следует ожидать в результате термовольтаического эффекта. Такие измерения не представляют существенных экспериментальных затруднений при налаженной методике их проведения.

Авторы благодарны Ю.В. Марковой за помощь в работе и Г.А. Каменской за подготовку образцов.

## Список литературы

- [1] В.В. Каминский, С.М. Соловьев. ФТТ **43**, 423 (2001).
- [2] В.В. Каминский, М.М. Казанин. Письма в ЖТФ **34**, 8, 92 (2008).
- [3] В.В. Каминский, М.М. Казанин, А.Н. Клишин, С.М. Соловьев, А.В. Голубков. ЖТФ **81**, 6, 150 (2011).
- [4] V. Zelezny, J. Petzelt, V.V. Kaminski, M.V. Romanova, A.V. Golubkov. Solid State Commun. **72**, 1, 43 (1989).
- [5] Ю.И. Уханов. Оптические свойства полупроводников. Наука, М. (1977). 368 с.
- [6] Ю.В. Улашкевич, В.В. Каминский, А.В. Голубков. ФТП **43**, 324 (2009).



Спектры отражения образца SmS (I) и их аппроксимация согласно (4) (II). Температура измерения равна 295 (1), 210 (2), 140 (3) и 80 К (4). Для спектров 2–4 начало оси ординат сдвинуто на 20, 40 и 60% соответственно.