

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИМОНИДА КАДМИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО Sm И Eu, ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Арушанов Э. К., Лисунов К. Г., Рознован Ю. В.,  
Шубников М. Л.

Изучены температурные зависимости проводимости и коэффициента Холла в интервале 1.7–78 К, определены основные электрофизические параметры полученных материалов.

Электрические свойства антимонида кадмия, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ), изучены слабо [1, 2]. Установлено, что самарий образует мелкие акцепторные уровни [1] и европий является электрически активной примесью [2]. Введение в антимонид кадмия этих элементов вызывает некоторое увеличение подвижности носителей заряда [1, 2]. Последнее наблюдалось, в частности, и при легировании РЗЭ фосфида индия [3].

Нами исследованы электрические свойства антимонида кадмия, легированного самарием и европием, и на основе их анализа определены электрофизические параметры полученных материалов. Монокристаллы выращивались методом зонной перекристаллизации вдоль кристаллографического направления [001] в атмосфере спектрально чистого аргона. Образцы были вырезаны вдоль [001] и имели неоднородность по концентрации, не превышающую 2%. Температурные зависимости проводимости и коэффициента Холла в интервале 1.7–78 К приведены на рис. 1, а. Все образцы имели проводимость  $p$ -типа. Добавление РЗЭ приводит, согласно [1, 2], к увеличению подвижности носителей заряда. Максимальное значение подвижности наблюдалось на образцах с концентрацией дырок, равной  $10^{16}$  см $^{-3}$  (см. таблицу).

Параметры образцов CdSb, легированных РЗЭ

№ образца	R	$NA_1 \cdot 10^{15}$ , см $^{-3}$	$NA_2 \cdot 10^{15}$ , см $^{-3}$	$ND \cdot 10^{15}$ , см $^{-3}$	$ND/NA_1$ , %	$(1/eRH) \cdot 10^{15}$ , см $^{-2}$ (78 К)	$\mu_{Hh}$ , см $^2/V \cdot c$ (78 К)	$E_A \cdot 10^{-3}$ , эВ	$E_B \cdot 10^{-3}$ , эВ	$m_p^*/m_0$
1	Sm	2.16	6.84	2.0	93	6.7	3900	2.06	4.41	0.32
2	Eu	5.50	1.30	1.6	29	5.0	2200	1.79	2.84	0.36
3	Sm	10.5	2.0	2.7	26	9.8	4400	2.19	4.51	0.37
4	Sm	1.95	3.75	1.7	87	3.5	2700	2.06	4.41	0.34

Наблюдается различие в значениях коэффициента Холла при низких и высоких температурах (рис. 1, а), как и в ранее исследованных легированных [4, 5] и нелегированных монокристаллах антимонида кадмия [6]. Предполагается, что это обусловлено наличием наряду с мелким глубоким уровня в исследованных кристаллах [4, 6]; расчет параметров образцов проводился по методике [6] на основе известного [7] соотношения

$$p + N_D = \frac{N_{A1}}{1 + \frac{\beta p}{N_r} \exp \frac{E_1}{kT}} + \frac{N_{A2}}{1 + \frac{\beta p}{N_r} \exp \frac{E_2}{kT}}, \quad (1)$$

где  $N_{A1, 2}$  — концентрации акцепторных уровней с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  соответственно.  $N_r = 2(2\pi m^* kT h^2)^{3/2}$  — плотность состояний в валентной зоне,  $\beta$  — фактор вырождения ( $\beta \approx 2$ ),  $N_D$  — концентрация компенсирующих доноров.

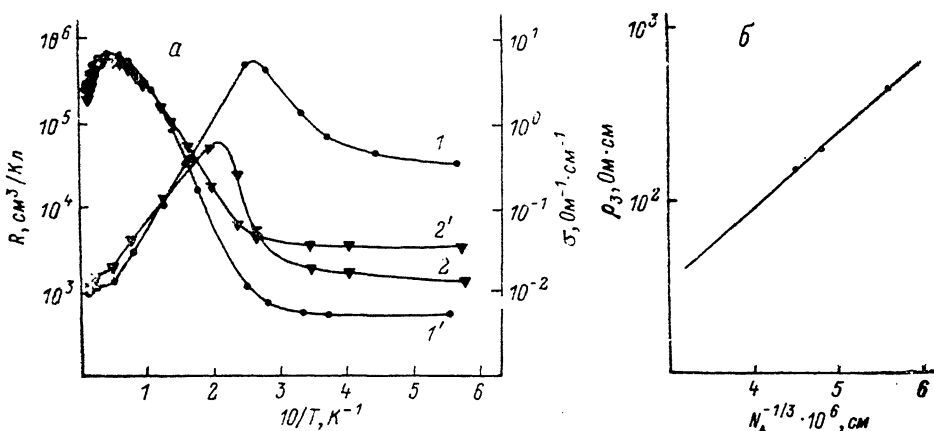


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла (1, 2) и проводимости (1', 2') (а); зависимость удельного сопротивления от концентрации акцепторов в области прыжковой проводимости для образцов CdSb, легированных самарием (б).

Номера кривых соответствуют номерам образцов.

Используя табличные данные, мы получили тригонометрические решения кубического уравнения относительно  $p$  для всех значений температур. Предпо-

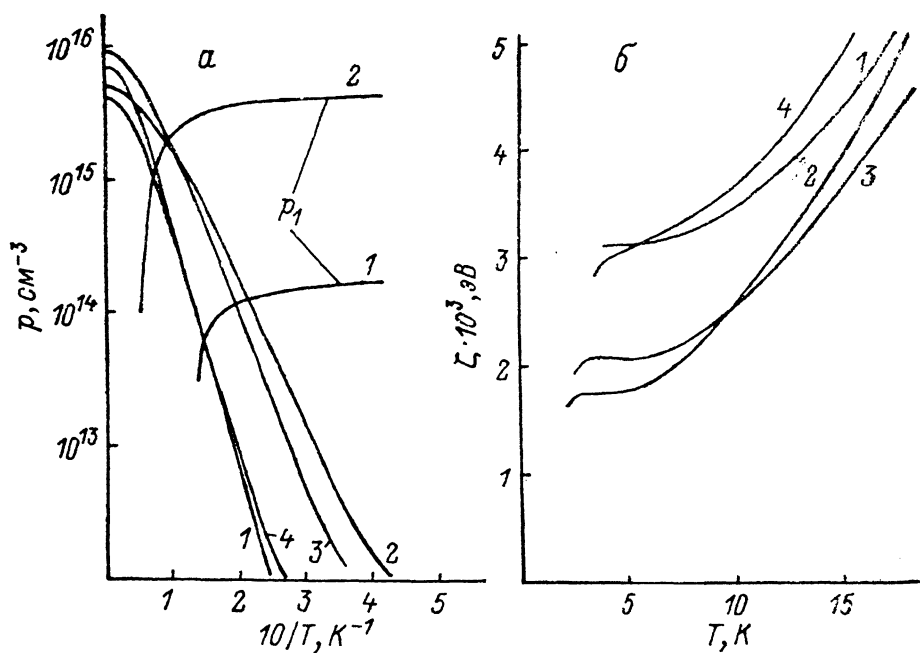


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок в валентной ( $p$ ) и примесной ( $p_1$ ) зонах от обратной температуры (а); зависимость химического потенциала от температуры (отсчет от потолка валентной зоны  $E_0 = E_v$ ) (б).

Номера кривых соответствуют номерам образцов.

ложив, что имеется только один уровень захвата (с энергией активации  $[E_1]$ ) на компенсирующий донор, можно вычислить температурную зависимость

концентрации носителей заряда на примесном уровне или в примесной зоне [7]. Результаты расчетов представлены на рис. 2, а. Влияние компенсации, как видно из рисунка, начинает заметно сказываться при низких температурах.

По температурной зависимости концентрации дырок в валентной зоне определено поведение химического потенциала  $\zeta$  при низких температурах [8], результаты расчета представлены на рис. 2, б. С понижением температуры химический потенциал стремится к потолку валентной зоны, выходя на насыщение вблизи 5 К, что можно связать с прохождением узкой примесной зоны, качественная оценка ширины которой совпадает с расчетной величиной по формуле Мотта [9] и составляет около 2 мэВ, что несколько выше, чем в случае антимонида кадмия, легированного серебром [10]. Дальнейшее уменьшение химического потенциала с температурой (рис. 2, б) соответствует его выходу из примесной зоны, и в этом температурном интервале следует ожидать перехода к прыжковой проводимости по акцепторным уровням с энергией, близкой к  $E_1$ .

Зависимость удельного сопротивления от концентрации основной примеси (рис. 1, б) в данной области температур близка к виду [11]

$$\rho_3 = \rho_{i3} \exp(a/N^{1/2}a^*), \quad (2)$$

что соответствует предположению о переходе к прыжковой проводимости. По данной зависимости для образцов, легированных самарием, определено значение среднего радиуса локализации дырок  $a^* = 170 \text{ \AA}$ . Значение соответствующей величины, вычисленное из асимптотики волновой функции локализованного состояния на большом расстоянии от центра [11], составляет около  $100 \text{ \AA}$ .

Такое различие в значениях данного параметра указывает на близость к области перехода металл—диэлектрик. Оценка этой области для антимонида кадмия, выполненная в [5], дает интервал концентраций  $N_A = (0.5 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; как видно из таблицы, большая часть изученных нами образцов имеет концентрации примеси, попадающие в этот интервал. Данное предположение подтверждается также слабой зависимостью  $\sigma(T)$  в области низких температур (рис. 1, а).

Авторы выражают благодарность Р. В. Парфеньеву за постоянный интерес к работе и полезное обсуждение результатов.

#### Список литературы

- [1] Гончаренко Г. И., Лазарев В. Б., Салов А. В., Шевченко В. Я., Ярембаш Е. И., Шапшева Н. П., Маренкин С. Ф. // *Электрон. техн.* 1970. Т. 14. В. 2. С. 42—43.
- [2] Пилат И. М., Шканде М. И., Шканде Ю. Д., Швеп И. И. // *Материаловедение полупроводниковых соединений группы А<sup>2</sup>В<sup>5</sup>*. М., 1987. С. 106.
- [3] Захаренков Л. Ф., Мастеров В. Ф., Хохрякова О. Д. // *ФТП*. 1987. Т. 21. В. 2. С. 347—349.
- [4] Андроник И. К., Арушанов Э. К., Емельяненко О. В., Наследов Д. Н. // *ФТП*. 1968. Т. 2. В. 9. С. 1248—1252.
- [5] Matsunami H., Nishihara Y., Tanaka T. // *J. Phys. Soc. Japan*. 1969. V. 27. N 6. P. 1507—1516.
- [6] Stukan V. A., Trifonov V. I., Shevchenko V. Ya., Goncharenko G. I. // *Phys. St. Sol.* (a). 1977. V. 41. N 1. P. 307—315.
- [7] Блекмор Дж. *Статистика электронов в полупроводниках*. М., 1964. 392 с.
- [8] Ансельм М. И. *Введение в теорию полупроводников*. М., 1978. 616 с.
- [9] Mott N. F., Twose W. D. // *Adv. Phys.* 1961. V. 10. P. 107.
- [10] Zarubin L. I., Nemis I. V., Rarenko I. M. // *Grch. J. Phys.* 1968. V. 18. P. 117—121.
- [11] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. *Электронные свойства легированных полупроводников*. М., 1979. 416 с.