

УДК 535.37

## ТЕРМОАКТИВАЦИОННЫЕ ТОКИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $MnGa_2Se_4$

А. Н. Георгобидани, Н. Н. Мусаева<sup>1</sup>, А. М. Шахтагинский

*Исследованы спектры термостимулированной проводимости в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$  в интервале температур 77 – 400 К. Полученные результаты позволяют получить информацию о ловушках носителей в  $MnGa_2Se_4$  и определить их параметры: глубину залегания, сечение захвата и концентрацию.*

В последнее время сильно возрос интерес к тройным и более сложным полупроводниковым соединениям типа  $MnGa_2Se_4$ , связанный со все возрастающим объемом практического применения их в оптоэлектронике и микроэлектронике.

В настоящей работе исследованы токи термостимулированной проводимости (ТСП) в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$  в интервале температур 77 – 400 К, позволяющие получить информацию о ловушках и определить их параметры.

Монокристаллы  $MnGa_2Se_4$  были получены диффузионным методом в газотранспортной двухсекционной печи в виде отдельных совершенных кристалликов размером несколько мм. Полученные монокристаллы  $MnGa_2Se_4$  являются соединениями тетрагональной сингонии, параметры решетки которых равны:  $a = 5,6745 \text{ \AA}$ ;  $c = 10,7414 \text{ \AA}$  [1]. Образцы имели  $n$ -тип проводимости. Контакты к образцам с удельным сопротивлением  $10^{11} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и толщиной 100 – 300 мкм создавались вплавлением индия в сэндвич-исполнении.

Измерение токов ТСП проводилось в следующем порядке. Ловушки заполнялись при освещении образца белым светом с интенсивностью 3850 мк при температуре 77 К в течение 10 мин. После выключения освещения образец нагревался в темноте с постоянной скоростью до 400 К. Скорость нагрева образцов составляла 0,03 и 0,06 град/с.

<sup>1</sup>Институт физики, г. Баку.

Во время освещения и измерения к образцам было приложено электрическое поле  $10 - 10^4$  В/см.

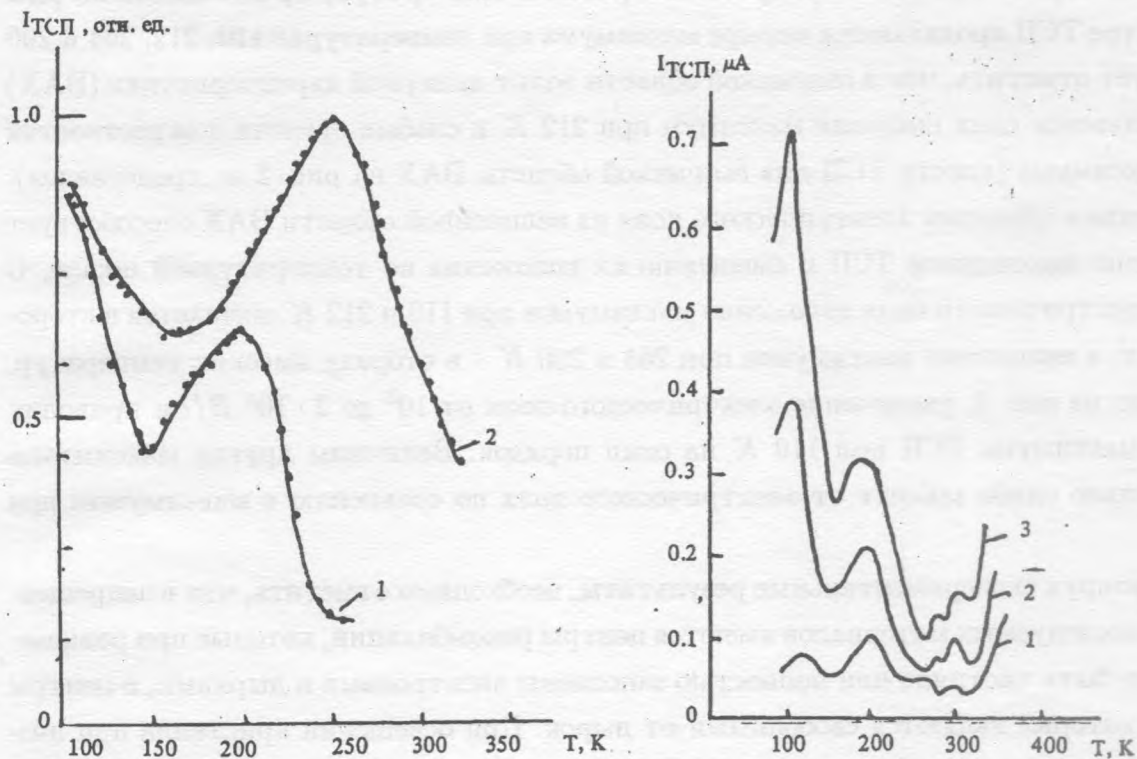


Рис. 1. Спектр ТСП в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$  при скоростях нагрева 0,03 град/с (1), 0,06 град/с (2). Напряженность поля  $F = 1,15 \cdot 10^4$  В/см.

Рис. 2. Спектр ТСП в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$  при различных электрических полях:  $F = 3,8 \cdot 10^3$  В/см (1),  $1,15 \cdot 10^4$  В/см (2),  $1,9 \cdot 10^4$  В/см (3); скорость нагрева 0,03 град/с.

Влияние скорости нагрева на положение и величину максимума ТСП демонстрируется на рис. 1. При скоростях нагрева 0,03 и 0,06 град/с положения максимумов ТСП соответствуют 198 и 254 К. Все максимумы зависимости ТСП от скорости нагрева образцов претерпевают такие изменения. Из рисунка видно, что увеличение скорости нагрева приводит к увеличению пика кривой ТСП и смещению максимума в сторону высоких температур. Скорость выброса носителей зависит только от температуры, поэтому для освобождения равного числа носителей требуется температура нагрева тем более высокая, чем быстрее производится нагрев. Поэтому рост термостимулированного

тока по величине будет сопровождаться смещением в высокотемпературную область.

Зависимость тока разряда системы  $In - MnGa_2Se_4 - In$  от температуры при различных электрических полях (скорость нагревания  $0,03 \text{ град/с}$ ) представлена на рис. 2. В спектре ТСП проявляются четыре максимума при температурах 110, 212, 264 и 290 К. Следует отметить, что в омической области вольт-амперной характеристики (ВАХ) обнаруживается один широкий максимум при 212 К и слабые ступени в окрестностях этого максимума (спектр ТСП для омической области ВАХ на рис. 2 не представлен). Приложение к образцам электрического поля из нелинейной области ВАХ способствует увеличению максимумов ТСП и смещению их положения по температурной шкале. С ростом электрического поля положение максимумов при 110 и 212 К смещается в сторону низких, а положение максимумов при 264 и 290 К – в сторону высоких температур. Как видно из рис. 2, увеличение электрического поля от  $10^3$  до  $2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$  приводит к росту максимума ТСП при 110 К на один порядок. Величины других максимумов относительно слабо зависят от электрического поля по сравнению с максимумом при 110 К.

Анализируя экспериментальные результаты, необходимо отметить, что в запрещенной зоне исследуемых материалов имеются центры рекомбинации, которые при равновесии могут быть частично или полностью заполнены электронами и дырками, и центры захвата, которые являются свободными от дырок. При освещении кристалла при низких температурах ловушки заполняются электронами, тогда как дырки захватываются центрами рекомбинации. Когда кристалл нагревается, электроны переходят с центров рекомбинации в зону проводимости, а центры рекомбинации заполняются дырками.

По спектрам ТСП установлено, что для всех пиков осуществляется мономолекулярный механизм рекомбинации со слабым повторным захватом [2]. Параметры ловушек были вычислены различными методами [3, 4], результаты которых представлены в таблице 1. Из величины сечения захвата можно заключить, что в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$  уровни являются кулоновски отталкивающими.

Т а б л и ц а 1

Оценки параметров уровней, ответственных за пики ТСП

Параметры	Метод определения	$U = 50 \text{ В}$		$U = 150 \text{ В}$	$U = 250 \text{ В}$
Область температур максимума, $K$	По кривым ТСП	77 - 165	125 - 255	90 - 247	91 - 250
Глубина залегания, $\text{эВ}$	$E_t = T_M/500$ $E_t = 25kT_M$	0,22 0,24	0,42 0,46	0,40 0,43	0,36 0,39
Сечение захвата, $\text{см}^2$	$S_t = \frac{\beta E_t}{kT_M^2 N_{c\nu M}} e^{E_t/kT_M}$	$7,2 \cdot 10^{-18}$	$5,8 \cdot 10^{-19}$	$1,9 \cdot 10^{-18}$	$8,3 \cdot 10^{-19}$
Концентрация ловушек, $\text{см}^{-3}$	Площадь под кривой ТСП	$10^{14} - 10^{15}$			

Исследования, результаты которых представлены в данной работе, стали возможны отчасти благодаря поддержке Международного научного фонда, грант М71000.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Tagiev B. G., Kasimov G. B., Tagiev O. B., Musayeva N. N. Proc. ESM-14, Netherlands, August, 1992.
- [2] Литовченко П. Г., Устнов В. М. В сб. Актуальные вопросы физики полупроводников и полупроводниковых приборов, Вильнюс, 1969, с. 153.
- [3] Гороховатский Ю. А. Основы термодеполаризованного анализа. М., 1981.
- [4] Вертопрахов В. Н., Сальман Е. Г. Термостимулированные токи в неорганических веществах. Новосибирск, 1979.

Поступила в редакцию 30 июня 1994 г.