

ТОКИ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CaIn_2S_4

© Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, Р.Б. Джаббаров, Н.Н. Мусаева

Институт физики Академии наук Азербайджана,

370143 Баку, Азербайджан

(Получена 17 апреля 1995 г. Принята к печати 23 ноября 1995 г.)

Впервые представлены результаты исследований токов термостимулированной деполяризации в монокристаллах CaIn_2S_4 . Спектры термостимулированной деполяризации для структур $\text{In-CaIn}_2\text{S}_4\text{-In}$ измерены при $T = 99$ К, при различных скоростях нагрева, временах поляризации и временах ожидания после выключения электрического поля и до начала измерений тока короткого замыкания. Определены основные параметры центров захвата: глубина залегания $E_t = 0.33$ эВ, сечение захвата $S = 10^{-18}$ см², частный фактор $\nu = 10^8$ с⁻¹, концентрация ловушек $N_t = 10^{15} \div 10^{16}$ см⁻³. Установлено, что в монокристаллах CaIn_2S_4 имеет место бимолекулярный механизм с сильным повторным захватом.

Метод исследования токов термостимулированной деполяризации (ТСД) является одной из разновидностей термоактивационной токовой спектроскопии [1-3] и применяется для изучения полупроводников, диэлектриков и структур на их основе. Метод ТСД обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью, позволяет исследовать электрофизические процессы, обусловленные ловушками. Измерение ТСД при различных скоростях нагрева, временах поляризации и временах ожидания после выключения электрического поля до начала измерений тока короткого замыкания позволяет выявить тонкую структуру центров захвата, определить их параметры, а также выяснить механизм рекомбинации.

В настоящей работе впервые представлены результаты исследований ТСД в монокристаллах CaIn_2S_4 . Монокристаллы CaIn_2S_4 нами получены методом газотранспортной реакции (переносчиком служил кристаллический йод). Газотранспортная реакция производилась в двухзонной печи с температурным градиентом 130 °С (720 ÷ 850 °С). В полученных образцах при комнатной температуре в интервале углов $10^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ зафиксированы 13 четких дифракционных линий, однозначно идентифицируемых на основе параметра гранецентрированной кубической решетки $a = (10.71 \pm 0.02)$ Å, пространственная группа O_h^7 ($Fd\bar{3}m$), которые приводятся в работе [4] для CaIn_2S_4 .

CaIn_2S_4 — широкозонный вполупроводник с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^4 \div 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при 300 К обладает проводимостью n -типа. В соединениях типа CaIn_2S_4 обнаружена эффективная высокотемпературная (до 500 К) [5] люминесценция под действием внешних факторов (электрическое поле, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения), и в этом процессе важную роль играют центры захвата.

Методика и результаты эксперимента

При измерении тока ТСД к структурам $\text{In}-\text{CaIn}_2\text{S}_4-\text{In}$ (типа «сэндвич»), охлажденным до 99 К (когда вероятность теплового заброса электронов с центров прилипания ничтожно мала), в течение 20 мин было приложено электрическое поле, отвечающее нелинейной области вольт-амперной характеристики (ВАХ). Расстояние между электродами, т.е. толщина образцов монокристаллов CaIn_2S_4 , было равно $(2.0-2.8) \cdot 10^{-2} \text{ см}$, а площадь токовых контактов — $(2.0-2.5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. После выключения электрического поля температура структур повышалась с постоянной скоростью β (т.е. $T = T_0 + \beta t$) и регистрировались токи деполяризации в режиме короткого замыкания.

Результаты измерений при скорости нагрева $\beta = 0.3 \text{ К/с}$ для различных приложенных электрических полей в диапазоне $(1-4) \cdot 10^3 \text{ В/см}$

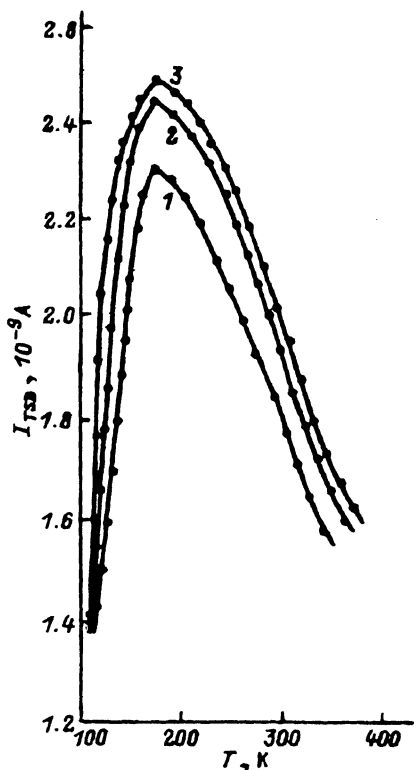


Рис. 1. Спектры термостимулированной деполяризации при электрических полях F , В/см: 1 — 10^3 , 2 — $1.8 \cdot 10^3$, 3 — $4.0 \cdot 10^3$.

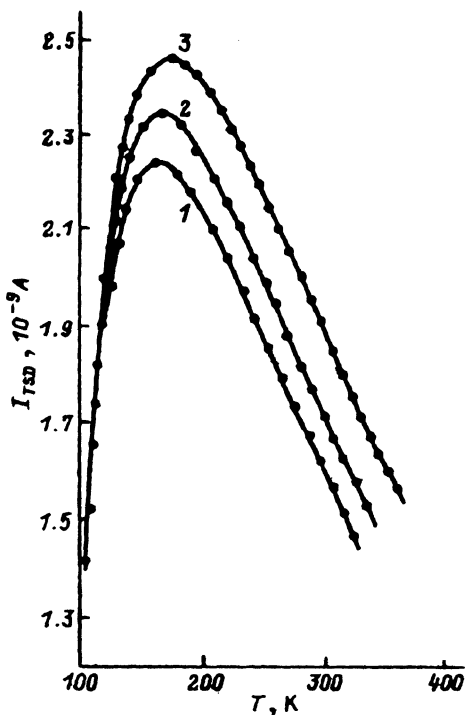


Рис. 2. Спектры термостимулированной деполяризации при скоростях нагрева β , К/с: 1 — 0.08, 2 — 0.16, 3 — 0.3.

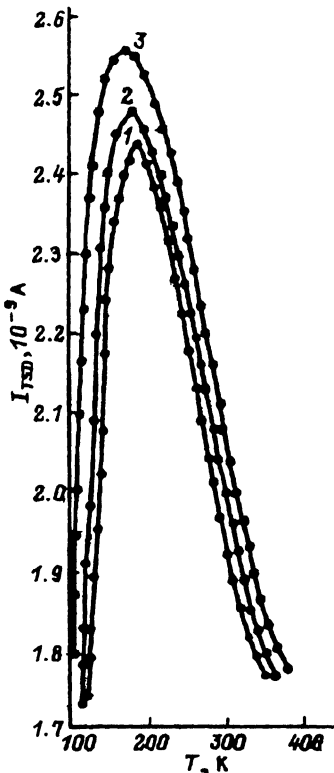


Рис. 3. Спектры термостимулированной деполяризации при временах поляризации t , мин: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 20.

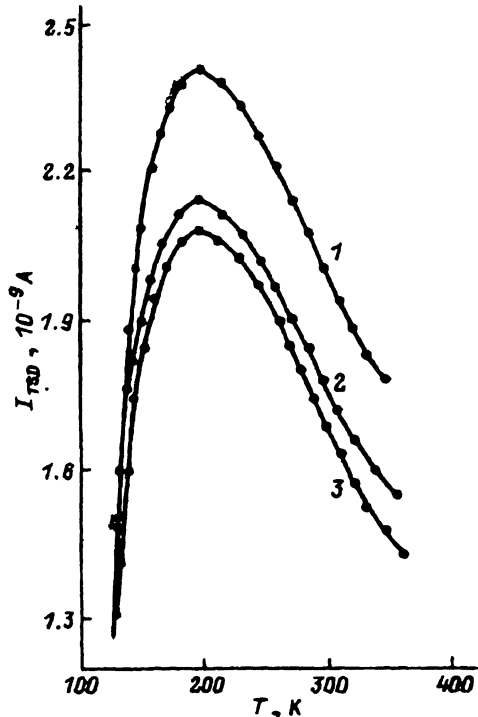


Рис. 4. Спектры термостимулированной деполяризации при временах ожидания t , мин: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15.

представлены на рис. 1. Отчетливо видно, что максимум в спектре ТСД по мере роста возбуждающего электрического поля увеличивается и смещается в сторону низких температур. На кривых 1-3 максимумы появляются при 184, 176 и 168 К соответственно.

Известно, что при быстром росте температуры на освобождение электронов требуется меньше времени и, следовательно, при соблюдении условий постоянства площади под спектральной кривой термостимулированный ток растет с увеличением скорости нагрева. Скорость выброса носителей зависит только от температуры, и поэтому рост термостимулированного тока по величине будет сопровождаться смещением пика в высокотемпературную область (рис. 2). Величина этого смещения связана с глубиной залегания уровня с энергией E_t .

Степень начального заполнения ловушек зависит от времени поляризации и времени ожидания после выключения возбуждающего электрического поля до начала измерения тока ТСД. Поэтому для структур $\text{In}-\text{CaIn}_2\text{S}_4-\text{In}$ токи ТСД измерены при различных временах поляризации и ожидания (рис. 3, 4). Экспериментально показано, что температура максимума ТСД (T_M) не зависит от времен поляризации и ожидания, при этом I_M (ток максимума ТСД) увеличивается с ростом времени поляризации, а с увеличением времени ожидания уменьшается. Из рис. 1 и 3 видно, что ток максимума ТСД I_M линейно зави-

сит от времени поляризации и поляризующего поля. Эти факты дают нам основания считать, что пик ТСД обусловлен миграцией заряда по центрам захвата.

Обсуждение результатов

В соответствии с работами [6,7] максимум на кривой ТСД можно связать с определенными центрами захвата, расположенными в запрещенной зоне рассматриваемого материала. В случае структур $\text{In-CaIn}_2\text{S}_4\text{-In}$ обнаружен один максимум, что свидетельствует о наличии дискретного центра захвата носителей тока в запрещенной зоне исследуемого материала. Экспериментальные данные, представленные на рис. 1-4 были проанализированы на основе теории [6,7], развитой для структур металл-диэлектрик-металл (МДМ). Это позволило нам определить основные параметры центра захвата (глубины залегания, сечения захвата, частотного фактора, концентрации ловушек и др.). В указанных работах получено выражение для определения глубины залегания центров захвата в МДМ структурах:

$$E_t (\text{эВ}) = 10^{-4} T_M \left[1.92 \lg \left(\frac{\nu}{\beta} \right) + 3.2 \right] - 0.0155, \quad (1)$$

где ν — частотный фактор. Проведение измерений при разных скоростях нагрева позволяет легко определить частотный фактор. На основе данных, представленных на рис. 2, для частотного фактора найдена величина $\nu = 10^8 \text{ с}^{-1}$ в монокристаллах CaIn_2S_4 . Подставляя эту величину в (1), для величины E_t находим значение 0.33 эВ. Это значение близко к результатам определенным другими методами, которые указаны в таблице. Методы определения величины E_t , указанные в таблице буквами а и б, описываются выражениями

$$(a) \quad E_t = 22.5 k T_M,$$

$$(б) \quad E_t = \frac{k T_{M_1} T_{M_2}}{T_{M_1} - T_{M_2}} \left[\ln \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \left(\frac{T_{M_2}}{T_{M_1}} \right)^3 \right].$$

Концентрация ловушек определялась по формуле

$$N_t = \frac{k T_M^2 N_c}{E_t \tau \beta} \left(e - \frac{E_t}{k T_M} \right).$$

Оценка параметров уровней, ответственных за пики в спектре ТСД

$U, \text{В}$	$E_t, \text{эВ}$		Диапазон T вблизи $T_M, \text{К}$	Концентрация ловушек $N_t, \text{см}^{-3}$
	а	б		
25	0.35 ± 0.02	-	138-272	$10^{15} \div 10^{16}$
50	0.34 ± 0.02	0.29 ± 0.03	130-278	-
100	0.32 ± 0.02	-	114-285	-

По величине частотного фактора в монокристаллах ν по формуле $S = \nu/N_c v$ ($N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ — плотность состояния в зоне проводимости, $v = 10^7 \text{ см/с}$ — тепловая скорость электронов) было оценено сечение захвата, которое оказалось равным 10^{-18} см^2 . Смещение максимума в спектре ТСД в сторону низких температур с ростом электрического поля свидетельствует о наличии в монокристаллах CaIn_2S_4 отталкивающих кулоновских центров [8].

Анализ спектра ТСД показывает, что увеличение степени начального заполнения центра захвата приводит к уменьшению температуры максимума (рис. 1) и для пика справедливо условие

$$\delta \geq e^{-1}(1 + 2kT_M/E_t),$$

где $\delta = (T_2 - T_M)/(T_2 - T_1)$, T_1, T_2 — температуры, при которых ток ТСД достигает половины максимума со стороны высокой и низкой температур. Это подтверждает гипотезу, что в монокристаллах CaIn_2S_4 имеет место бимолекулярный механизм с сильным повторным захватом [9].

Список литературы

- [1] В.Н. Вертопрахов, Е.Г. Сальман. *Термостимулированные токи в неорганических веществах* (Новосибирск, Наука, 1979).
- [2] Ю.А. Гороховатский. *Основы термодеполяризационного анализа* (М., Наука, 1981).
- [3] Ю.А. Гороховатский Г.А. Бордовский. *Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков* (М., Наука, 1991).
- [4] H. Hann, U.W. Klingler. *Z. Anorg. Chem.*, **260**, 97 (1949).
- [5] Б.Г. Тагиев, М.Г. Шахтахтинский, Б.М. Иззатов, О.В. Тагиев. *Неорг. матер.*, **29**, 1392 (1993).
- [6] J.G. Simmons, G.W. Taylor. *Phys. Rev. (B)*, **5**, 1619 (1972).
- [7] J.G. Simmons, G.S. Nadkarni. *Phys. Rev. (B)*, **6**, 4815 (1972).
- [8] A.P. Kulshreshta, I.J. Saunders. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **8**, 1787 (1975).
- [9] Г.Г. Литовченко, В.М. Устинов. *Актуальные вопросы физики полупроводников и полупроводниковых приборов* (Вильнюс, 1969) с. 153.

Редактор Т.А. Полянская

Currents of thermally stimulated depolarization in CaIn_2S_4 single crystals

B.G.Tagiev, O.B.Tagiev, R.B.Dzhabbarov, N.N.Musaeva

Institute for Physics, Azerbaijan Academy of Sciences, 370143 Baku, Azerbaijan