

# Проводимость кристаллов $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ в сильных электрических полях

© О.Г. Грушка<sup>¶</sup>, С.М. Чупыра, О.М. Мыслюк, С.В. Биличук, И.И. Заблоцкий

Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,  
58000 Черновцы, Украина

(Получена 7 июня 2010 г. Принята к печати 22 июня 2010 г.)

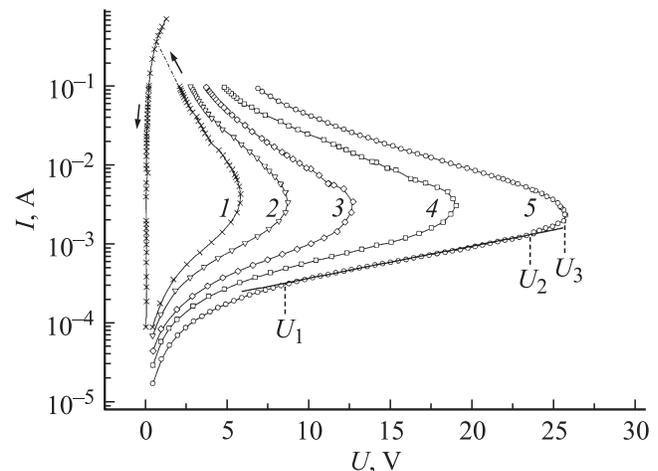
Изучено влияние электрического поля и температуры на проводимость объемных кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ . Показано, что вольт-амперные характеристики в сильных электрических полях являются характеристиками  $S$ -типа с эффектом переключения в низкоомное состояние. Критическое напряжение перехода от закона Ома к экспоненциальной зависимости тока ( $I$ ) от напряжения ( $U$ ) и пороговое напряжение перехода в область отрицательного дифференциального сопротивления  $dU/dI < 0$  линейно зависят от толщины образца. Определены энергии активации проводимости в слабом и сильном электрических полях. Установлено, что сверхлинейный участок вольт-амперной характеристики с  $dU/dI > 0$  описывается зависимостью вида  $I = I_0 \exp(U/U_0)$  и обусловлен электронными переходами с локальных центров с энергетическим уровнем  $E_t = 0.19$  эВ.

Соединение  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  принадлежит к классу дефектных полупроводников с большой концентрацией катионных стехиометрических вакансий,  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Благодаря этим вакансиям материал обладает высокой стойкостью к действию ионизирующих излучений, слабой зависимостью электрических параметров от введенных примесей и рядом других свойств, выгодных для практического применения в электронных и оптоэлектронных приборах [1,2]. При введении примесей металлов в концентрации  $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  уровень Ферми, расположенный вблизи середины запрещенной зоны, не сдвигается сколько-нибудь значительно благодаря эффекту самокомпенсации примесей [3]. Это обеспечивает кристаллам  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  биполярную проводимость, свойственную собственному проводнику, в области температур 250–400 К. Характерной особенностью кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  является нелинейность их вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $S$ -типа. Как известно [4], активные элементы с ВАХ  $S$ -типа могут быть в двух устойчивых состояниях — высокоомном и низкоомном — и в зависимости от характера переключения в низкоомное состояние применяются в качестве переключателей в микроэлектронике или запоминающих устройств.

В настоящей работе приводятся результаты исследований вольт-амперных характеристик кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ , выращенных методом Бриджмена. Образцы были  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\sim 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , концентрацией носителей заряда  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при 300 К и холловской подвижностью 250–300  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , слабо зависящей от температуры. Измерения ВАХ  $I = f(U)$  при 300 К проводились на объемных образцах различной толщины  $L$  (расстояние между электродами) в режиме постоянного тока. Температурные измерения были выполнены в электрических полях с напряжениями  $U$ , меньшими порогового напряжения  $U_3$ , после которого наблюдается переход в область отрицательного дифференциального сопротивления,  $dU/dI < 0$ .

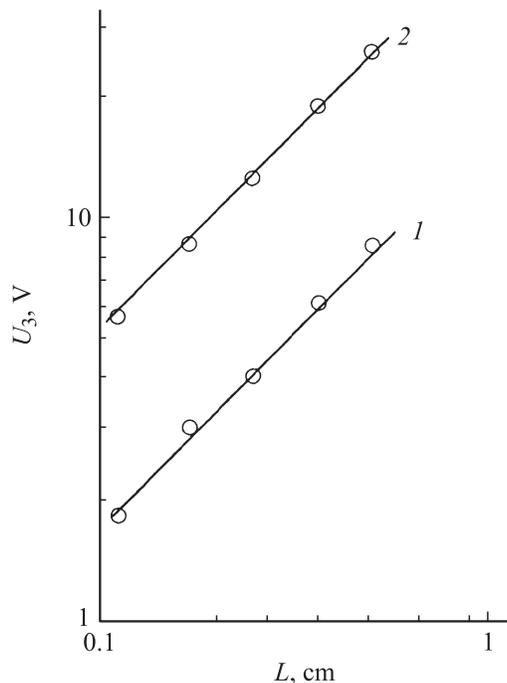
Вольт-амперные характеристики образцов с различной толщиной  $L$  при комнатной температуре (рис. 1) имеют при  $U < U_1$  ( $U_1$  — критическое напряжение) омический участок,  $I \propto U$ ; при  $U_1 < U < U_2$  наблюдается экспоненциальный участок  $J = J_0 \exp(U/U_0)$  ( $J$  — плотность тока), при  $U_2 < U < U_3$  ( $U_3$  — пороговое напряжение) — участок резкого возрастания тока, который переходит в участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением,  $dU/dI < 0$ . Последний заканчивается при напряжении, при котором происходит переключение в низкоомное состояние с  $dU/dI > 0$ . При этом сопротивление уменьшается на 3–4 порядка. Природа подобных  $S$ -образных ВАХ обычно объясняется электронно-тепловым механизмом неустойчивости и электронным фазовым переходом [4–6].

Для кристаллов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  при 300 К переход омического участка в экспоненциальный происходит при критическом поле  $E_1 = U_1/L = 25 - 30 \text{ В/см}$ , т.е. эффект сильного поля, при котором наблюдается отклонение от



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики образцов  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  с различной толщиной  $L$ , см: 1 — 0.11, 2 — 0.17, 3 — 0.25, 4 — 0.37, 5 — 0.51.

<sup>¶</sup> E-mail: semicon-dpt@chnu.edu.ua



**Рис. 2.** Зависимости критического напряжения  $U_1$  (1) и порогового напряжения  $U_3$  (2) от толщины образца.

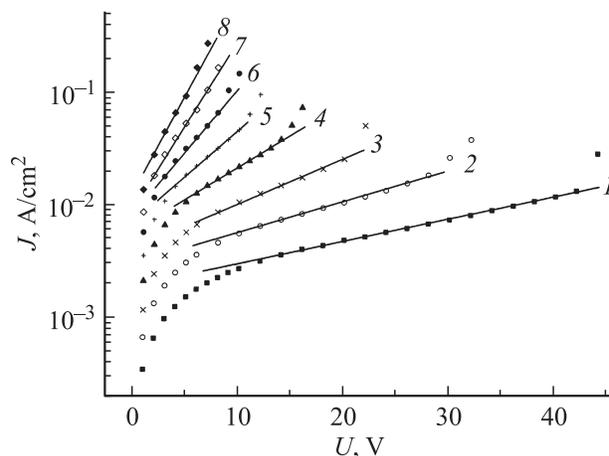
закона Ома, возникает при относительно малых полях. При этом критическое и пороговое напряжения линейно зависят от толщины образца:  $U_1 \propto L$ ,  $U_3 \propto L$  (рис. 2). Согласно [7], линейная зависимость критического напряжения от толщины образца связана с началом ионизации локальных центров.

На рис. 3 приведены зависимости ВАХ от температуры при  $U < U_3$ . Для области слабых полей, при  $U < U_1$ , определена удельная проводимость  $\sigma = J/E$ , которая зависит от температуры  $T$  по закону  $\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT)$  (рис. 4), где энергия активации  $E_a = 0.36$  эВ близка к половине ширины запрещенной зоны  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  ( $E_g/2 = 0.37$  эВ),  $k$  — постоянная Больцмана. В области сильных полей, при  $U_1 < U < U_2$ , плотность тока экспоненциально растет с увеличением напряжения в соответствии с формулой  $J = J_0 \exp(U/U_0)$ , где  $U_0$  — характерное напряжение, зависящее от температуры. С понижением температуры от 334.1 до 249.8 К  $U_0$  увеличивается от 2.7 до 20.7 В. Экспоненциальное возрастание тока с напряжением обычно связывают [8] с эффектом увеличения концентрации носителей заряда, которое возможно из-за сдвига равновесия между процессами захвата электронов на ловушки и их обратного выброса в пользу последних в результате нагрева электронного газа или же в случае, когда напряженность приложенного электрического поля становится сравнимой с напряженностью поля ловушки, что приводит к ионизации ловушки.

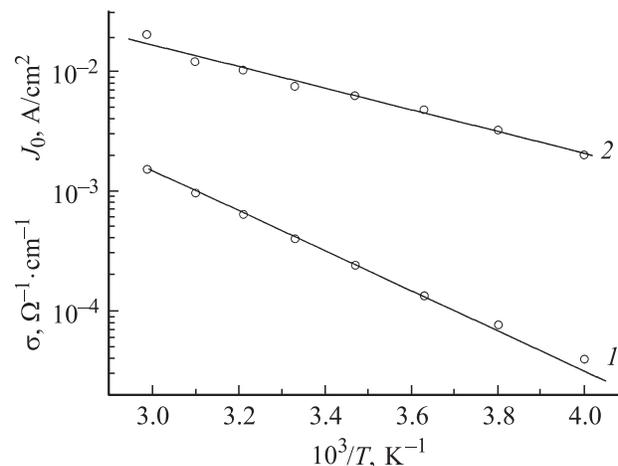
По точкам пересечения прямых  $\lg J = f(U)$  в области  $U_1 < U < U_2$  (рис. 3) с осью ординат при  $U = 0$

определены значения предэкспоненциального множителя  $J_0$ . Температурная зависимость  $J_0$  описывается выражением  $J_0 \propto \exp(-E_t/kT)$ . По наклону прямой  $\lg J_0 = f(10^3/T)$  (рис. 4) определили энергию ионизации ловушек  $E_t = 0.19$  эВ.

Область напряжений  $U_1 < U < U_2$ , при которых наблюдается зависимость  $J = J_0 \exp(U/U_0)$ , с понижением температуры расширяется и сдвигается в сторону увеличения  $U$ . При этом крайние точки  $U_1$  и  $U_2$  области экспоненциальной зависимости  $\lg J = f(U)$  сами зависят от температуры (рис. 5). В случае, когда концентрация носителей заряда определяется не только положением равновесного уровня Ферми  $E_F$  и температурой, но и энергией активации ловушек  $E_t$  [7],  $U_1, U_2 \propto \exp[(E_F - E_t)/kT]$ . Оказалось, что наклоны зависимостей логарифмов  $U_1, U_2, U_3$  от  $10^3/T$  практически одинаковы, что соответствует энергии  $E_F - E_t = 0.17$  эВ.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  при различных температурах  $T$ , К: 1 — 249.8, 2 — 262.8, 3 — 275.4, 4 — 287.8, 5 — 299.8, 6 — 311.5, 7 — 322.6, 8 — 334.1.



**Рис. 4.** Температурные зависимости удельной проводимости  $\sigma$  в области слабых полей (1) и предэкспоненциального множителя плотности тока  $J_0$  в области сильных полей (2).

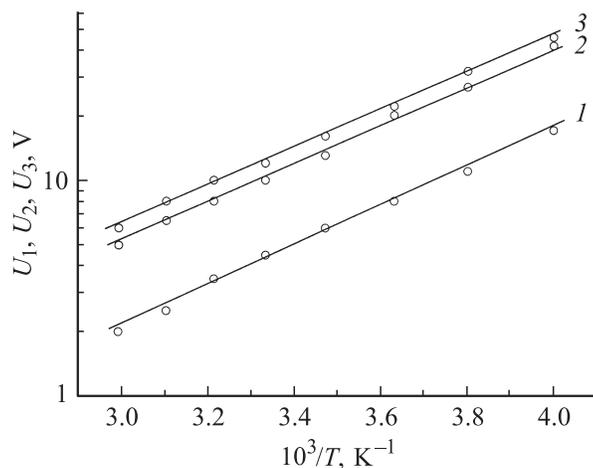


Рис. 5. Температурные зависимости напряжений  $U_1$  (1),  $U_2$  (2),  $U_3$  (3).

Проведенная оценка энергии ионизации ловушек показала, что локальные уровни в запрещенной зоне  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  находятся на 0.19 эВ ниже дна зоны проводимости и на 0.17 эВ выше равновесного уровня Ферми. Поэтому в исходном состоянии локальные центры пусты. С ростом приложенного напряжения концентрация носителей заряда увеличивается, в результате чего квазиуровень Ферми перемещается вверх от уровня  $E_F$  и ловушки заполняются. С разогревом скорость захвата электронов на ловушки уменьшается, что приводит к увеличению концентрации носителей заряда. Энергия захватываемого электрона зависит от напряженности электрического поля, поэтому концентрация носителей заряда становится функцией напряженности электрического поля.

## Список литературы

- [1] P. Gorley, Z. Grushka, Ya. Radevych, O. Grushka, I. Zabolotsky. Proc. SPIE, **6796**, 67961W (2007).
- [2] P.N. Gorley, O.G. Grushka, Z.M. Grushka, A.I. Malik. *8th Conf. Electronic Materials, IUMRS-ICEM* (Xi'an, China, 2002) p. 27.
- [3] О.Г. Грушка, П.Н. Горлей. Перспективные материалы, № 6, 33 (2003).
- [4] К.Д. Цэндин, Э.А. Лебедев, А.Б. Шмелькин. ФТТ, **47** (3), 427 (2005).
- [5] В.Б. Сандомирский, А.А. Суханов, А.Г. Ждан. ЖЭТФ, **58** (5), 1683 (1970).
- [6] Э.А. Лебедев, С.А. Козюхин, Н.Н. Константинова, Л.П. Казакова. ФТП, **43** (10), 1383 (2009).
- [7] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [8] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).

Редактор Л.В. Шаронова

## Conductivity of $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ crystals in high electric fields

O.G. Grushka, S.M. Chupyra, O.M. Myslyuk, S.V. Bilichuk, I.I. Zabolotsky

Chernovtsy National University, 58000 Chernovtsy, Ukraine

**Abstract** The influence of the electrical field and the temperature on the electrical conductivity of bulk  $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$  crystals has been studied. It was shown that current-voltage characteristics in high electrical fields are of S-type with the effect of switching over into a low-resistance state. Both critical voltage of deviation from Ohm law to exponential current dependence on voltage and threshold voltage of switching to negative differential resistance,  $dU/dI < 0$ , depend on sample thickness linearly. The activation energies of conductivity in weak and high fields were determined. It was established, that the superlinear part of current-voltage characteristics with  $dU/dI > 0$  is described by the dependence  $I = I_0 \exp(U/U_0)$  and is due to electron transitions from local centers with the energy level  $E_t = 0.19$  eV.