

## Инжекционные токи в смешанослойных монокристаллах Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub>

© И.М. Аскеров, Ф.Ю. Асадов

Азербайджанский инженерно-строительный университет,  
370073 Баку, Азербайджан

(Получена 4 февраля 1997 г. Принята к печати 10 февраля 1997 г.)

Синтезированы методом химической транспортной реакции монокристаллы Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub> и исследованы вольт-амперные характеристики и температурные зависимости электропроводности. Показано, что механизм прохождения тока в структуре In-Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub>-In обусловлен монополярной инжекцией.

В физике полупроводников большой интерес вызывают кристаллические структуры слоистых материалов на основе твердых растворов типа (Ga,In)<sub>2</sub>S<sub>3</sub> [1–8]. В результате исследования фазообразования в системе Ga-In-S был получен и исследован методом рентгеноструктурного анализа ряд монокристаллических фаз общего состава (Ga,In)<sub>2</sub>S<sub>3</sub> [4–8]. Большинство исследованных в данной системе фаз по своему строению относятся к слоистым структурам. В этой серии структур особый интерес представляют смешанослойные структуры, построенные из различных по строению и составу электронейтральных пакетов.

Первым представителем полупроводников со смешанослойной структурой является Ga<sub>1.73</sub>In<sub>2.94</sub>S<sub>7</sub> [8], состоящий из 2- и 3-этажных пакетов с соотношением, равным 1:1. Вторым примером полупроводника со смешанослойной структурой является Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub> [9], состоящий из аналогичных 2- и 3-этажных пакетов, но с соотношением, равным 1:2.

Монокристаллы Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub> были получены методом химической транспортной реакции. Выращенные пластинчатые кристаллы оранжевого цвета обладают совершенной спаянностью по плоскости (001). Уточненные кристаллографические параметры имеют следующие значения,  $a = 3.814(2) \text{ \AA}$ ,  $c = 100.04(3) \text{ \AA}$ ,  $U = 1260.4(1) \text{ \AA}$ , пространственная группа  $R3m$ ,  $Z = 11$ ,  $R = 0.069$ . В кристалле Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub> связь между пакетами осуществляется через межпакетные тетраэдрические и октаэдрические позиции, статистически занятые атомами металлов Ga и In.

В данной работе приводятся результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и температурной зависимости электропроводности  $\sigma(T)$  в этих монокристаллах.

Монокристаллы обладали проводимостью  $n$ -типа с удельным сопротивлением  $5 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и шириной запрещенной зоны при  $T = 293 \text{ К}$ , равной 237 эВ.

На ВАХ структуры In-Ga<sub>0.5</sub>In<sub>1.5</sub>S<sub>3</sub>-In при различных температурах выделяются следующие участки: линейный ( $I \sim U$ ), квадратичный ( $I \sim U^2$ ) и область резкого роста тока ( $I \sim U^n$ ,  $n = 3-7$ ). Резкий рост тока в полупроводниковых структурах объясняется заполнением и опустошением ловушек [10]. В первом случае между током, напряжением и межэлектродным расстоянием  $L$  существуют закономерности  $I \sim U^3$  и  $U \sim L^2$ . В

обоих случаях фактор захвата  $\theta = n_0/n_t \ll 1$ , где  $n_0$  — концентрация свободных носителей,  $n_t$  — концентрация захваченных ловушками носителей тока, инжектированными из электрода. Когда имеет место опустошение ловушек электрическим полем, наблюдаются закономерности  $I \sim U^3$  и  $U \sim L$ . В работе [10] показано, что для структур с различными межэлектродными расстояниями ( $L_1 \neq L_2$ ), изготовленных по идентичной технологии, при заполнении ловушек имеет место соотношение

$$\frac{U_f(L_1)}{U_f(L_2)} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2,$$

а при опустошении

$$\frac{U_E(L_1)}{U_E(L_2)} = \frac{L_1}{L_2}.$$

В исследованной нами структуре имел место второй случай, который показан на рис. 1. Согласно полученным данным можно сделать вывод, что область резкого роста тока в нашей структуре связана с опустошением заполненных ловушек электрическим полем. В этом случае

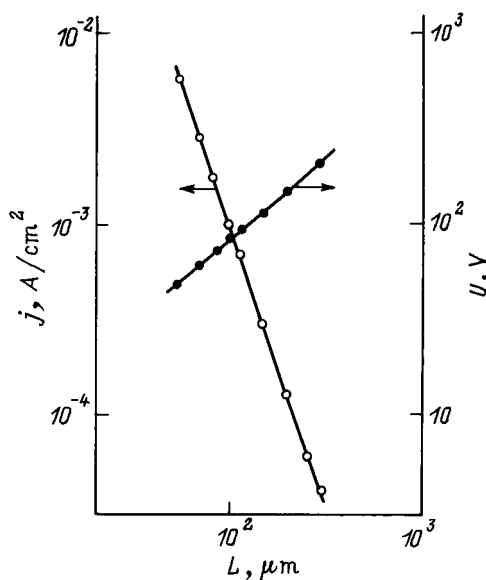


Рис. 1. Зависимости плотности тока  $j$  (из квадратичной области вольт-амперной характеристики) и напряжения  $U$  от межэлектродного расстояния.

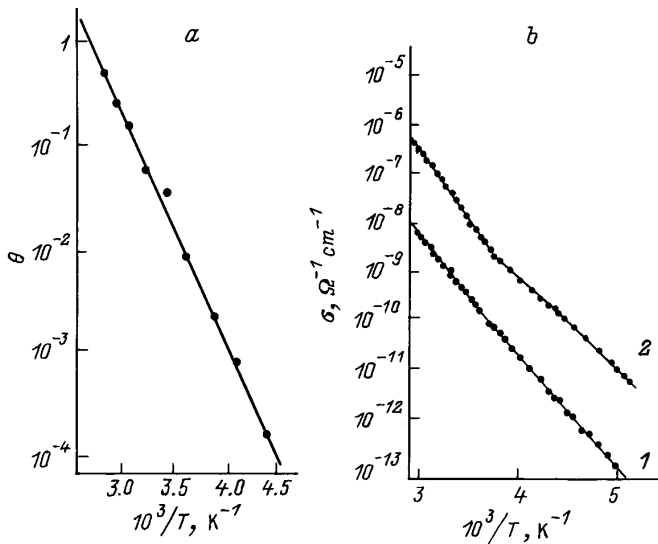


Рис. 2. Температурные зависимости: *a* — фактора захвата  $\theta$ , *b* — электропроводности  $\sigma$  при электрических полях  $E$ , В/см: 1 —  $10^3$ , 2 —  $10^4$ .

глубина залегания и концентрация ловушек определяются из температурной зависимости фактора захвата  $\theta(T)$ . Согласно [9,10], фактор захвата связан с глубиной залегания и концентрацией ловушек по следующей формуле:

$$\theta = \frac{N_c}{gN_t} \exp \frac{E_t - E_c}{kT}.$$

Здесь  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости,  $g$  — фактор спинового вырождения ( $g = 2$ ). На рис. 2, *a* зависимость фактора захвата представлена в координатах  $\lg \theta - 10^3/T$ . Из наклона прямой определяется глубина залегания ловушек ( $E_t = 0.45$  эВ), а из пересечения прямых с осью  $\lg \theta$  при  $10^3/T = 0$  определяется концентрация ловушек  $N_t = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При вычислении параметров ловушек эффективная плотность состояний, подвижность носителей тока и диэлектрическая проницаемость принимались равными  $10^{19} \text{ эВ/см}^{-3}$ ,  $\mu = 20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\epsilon = 8$  соответственно [11,12]. Глубина залегания ловушек  $E_t$  может быть также определена из температурной зависимости электропроводности  $\sigma(T)$  (рис. 2, *b*). При напряжении, соответствующем закону Ома (кривая 1), и в нелинейной области (кривая 2) на зависимости  $\sigma(T)$  выявляются две прямые с энергиями активации 0.45 и 0.55 эВ.

Таким образом, на основе анализа вольт-амперных характеристик при различных температурах и электрических полях показано, что механизм прохождения тока в структуре  $\text{In-Ga}_{0.5}\text{In}_{1.5}\text{S}_3\text{-In}$  обусловлен монополярной инжекцией.

## Список литературы

- [1] М.И. Зартарова, Р.С. Гамидов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **5**, 369 (1969).
- [2] В.П. Амброс, И.Я. Андрончик, В.П. Мушинский, Н.М. Павленко. *Некоторые вопросы химии и физики полупроводников сложного состава* (Ужгород, 1970).
- [3] В.П. Амброс, В.П. Мушинский. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **8**, 1310 (1972).
- [4] И.Р. Амирасланов, Г.Г. Гусейнов, Х.С. Мамедов, А.С. Кулиев. Кристаллография, **33**, 767 (1988).
- [5] Т.Х. Азизов, Г.Г. Гусейнов, Г.М. Нифтиев, И.Р. Амирасланов. Докл. АН АзССР, **12**, 25 (1985).
- [6] И.Р. Амирасланов, Т.Х. Азизов, Г.Г. Гусейнов, А.С. Кулиев, Г.М. Нифтиев. Неорг. матер., **24**, 723 (1988).
- [7] I.R. Fmiraslanov, G.G. Guseinov, A.S. Kuliev, Kh.S. Mamedov. *Abstracts 10th European Crystallographic Meeting Collected* (Wroclaw, Poland, 1986) p. 456.
- [8] И.Р. Амирасланов, Ф.Ю. Асадов, А.А. Мусаев, Г.Г. Гусейнов. Кристаллография, **34**, 1012 (1989).
- [9] И.Р. Амирасланов, Ф.Ю. Асадов, А.А. Мусаев, А.С. Кулиев. *Тез. докл. 1-го Всес. совещ. по кристаллохимии неорганических и координационных соединений* (Владивосток, 1989) с. 108.
- [10] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973) с. 416.
- [11] Ю.С. Рябинкин. ФТТ, **6**, 2989 (1964).
- [12] R.N. Bude. J. Appl. Phys., **33**, 1733 (1960).

Редактор Т.А. Полянская

## Injection currents in mix-layer $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{1.5}\text{S}_3$ single crystals

I.M. Askerov, F.U. Asadov

Institute of Civil Construction,  
370073 Baku, Azerbaijan

**Abstract**  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{1.5}\text{S}_3$  single crystals have been obtained by chemical transport reactions. Temperature dependences of conductivity  $\sigma(T)$  and current-voltage characteristic of obtained crystals are investigated. It has been shown that mechanism of current flow in  $\text{In-Ga}_{0.5}\text{In}_{1.5}\text{S}_3\text{-In}$  structure is caused by a monopolar injection.