

# Термополевой эффект Френкеля в слоистых монокристаллах $\text{MnGaInS}_4$

© Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев\*

Азербайджанский государственный педагогический университет,  
AZ-1000 Баку, Азербайджан

\* Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,  
370143 Баку, Азербайджан

(Получена 29 декабря 2005 г. Принята к печати 12 апреля 2006 г.)

Исследованы вольт-амперные характеристики в области сильных электрических полей в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ . Показано, что ток в нелинейной области вольт-амперной характеристики обусловлен термополевым эффектом Френкеля. Определены диэлектрическая проницаемость, концентрация ловушек, а также форма потенциальной ямы.

PACS: 72.80.Ga, 75.50.Pp

## 1. Введение

Полумангнитные полупроводники типа  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}_2^{\text{III}}\text{X}_4^{\text{VI}}$  (A — Mn, Fe, Co, Ni; B — Ga, In; X — S, Se, Te), содержащие элементы с незаполненными  $d$ -оболочками, в последние годы стали объектом многих исследований из-за необычного сочетания полупроводниковых и магнитных свойств [1–6]. Эти соединения перспективны для создания на их основе лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем. В [7,8] при соотношении 1:1 кубической  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$  (пространственная группа  $Fd\bar{3}m$ ) и тетрагональной  $\text{MnGa}_2\text{S}_4$  (пространственная группа  $\bar{1}4$ ) структур методом Бриджмена получены новые слоистые полумангнитные полупроводники состава  $\text{MnGaInS}_4$  и исследованы их электрические и оптические свойства.

В настоящей работе приводятся результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) монокристаллов  $\text{MnGaInS}_4$  в сильных электрических полях.

Монокристаллы  $\text{MnGaInS}_4$  были получены методом химических транспортных реакций (ХТР). Были выбраны температуры холодной зоны  $700^\circ\text{C}$  и горячей зоны  $820^\circ\text{C}$ . В качестве транспорта использовался кристаллический иод. Полученные монокристаллы представляют собой плоскопараллельные пластинки ( $6 \times 5 \times 4$  мм) и являются удобными объектами для исследования электрических и оптических свойств. Рентгенографические исследования показали, что  $\text{MnGaInS}_4$  кристаллизуется (тригональная сингония) в структурном типе однопакетного политипа  $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  с параметрами кристаллической решетки  $a = 3.81 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.17 \text{ \AA}$ ,  $z = 1$ , пространственная группа  $P3m1$  [9]. Структура монокристаллов, полученных методом ХТР, совпадает с полученной методом Бриджмена. Для измерения ВАХ контакты к образцам создавались вплавлением индия к противоположным поверхностям (сэндвич-структура). Расстояние между электродами изменялось в пределах 10–100 мкм. Монокристаллы  $\text{MnGaInS}_4$  имели  $n$ -тип проводимости.

На рис. 1 представлены ВАХ  $I(U)$  структур  $\text{In-MnGaInS}_4\text{-In}$  с различной толщиной  $\text{MnGaInS}_4$  при комнатной температуре (293 К). На ВАХ выявляются следующие участки: омический ( $I \propto U$ ) и область резкого роста тока ( $I \propto U^n$ ,  $n > 1$ ). Видно, что переходные напряжения от омической области к резкому росту тока с уменьшением толщины уменьшаются.

На рис. 2 для области резкого роста тока представлена зависимость электропроводности  $\sigma$  от электрического поля  $F$  при комнатной температуре (293 К) в координатах  $\lg \sigma - \sqrt{F}$ . Экспериментальная зависимость электропроводности от электрического поля хорошо согласуется с теорией термоэлектронной ионизации Френкеля [10]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\beta \sqrt{F}), \quad (1)$$

$\beta$  — коэффициент Френкеля,

$$\beta = \frac{\sqrt{e^3}}{kT \sqrt{\pi \epsilon \epsilon_0}}, \quad (2)$$

$e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость монокристалла,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. По наклону этой зависимости определено значение  $\beta = 2 \cdot 10^{-2} (\text{см/В})^{1/2}$ .

По теории Френкеля [10,11] электрон в полупроводнике ведет себя так же, как в изолированном атоме. При этом предполагается, что изолированный атом находится в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = n^2$  ( $n$  — показатель преломления видимого излучения). С использованием экспериментальных значений из выражения (2) была определена диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 5.8$ . Это значение почти согласуется с результатом оптических измерений показателей преломления  $n$  ( $\epsilon = n^2$ ) для этих монокристаллов в температурном интервале 77–300 К и интервале длин волн 0.50–0.68 мкм [8].

Согласие экспериментальных данных с модифицированной теорией Френкеля, развитой в [12], позволяет

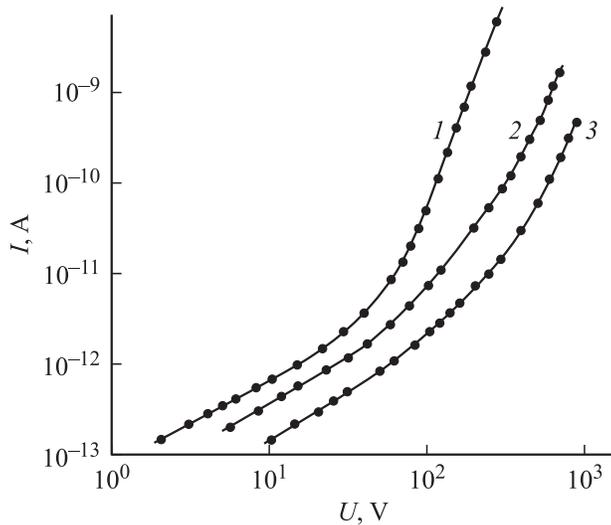


Рис. 1. Темновые ВАХ монокристаллов  $\text{MnGaInS}_4$  при 293 К. Толщина образцов  $d$ , мкм: 1 — 15, 2 — 30, 3 — 60.

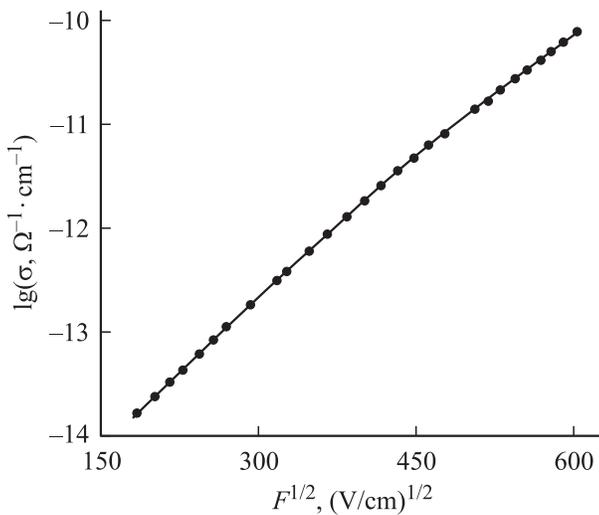


Рис. 2. Зависимость электропроводности от электрического поля в координатах  $\lg \sigma \propto \sqrt{F}$  при комнатной температуре в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ .

оценить концентрацию ионизированных центров в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ . Для концентрации ловушек в [12] получено следующее выражение:

$$N_t = \left( \frac{2e}{kT\beta} \sqrt{F_{\text{cr}}} \right)^3, \quad (3)$$

где  $F_{\text{cr}}$  находится из эксперимента и является критическим полем, при котором закон Ома нарушается. Проводились измерения на разных образцах (толщиной 12, 15, 30, 60 мкм), для концентрации ловушек получено значение  $N_t = (1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Важное значение имеет определение формы потенциальной ямы. Функция  $\varphi(x)$  — потенциальная энергия, зависящая от расстояния до примесного центра или же

ловушки ( $x$  — расстояние вдоль направления поля), — под действием электрического поля изменяется [12]. Из работ [12,13] следует, что

$$\varphi(x) = -\frac{kT\beta}{2} \sqrt{F}, \quad (4)$$

$$x = \frac{kT\beta}{2e} \frac{1}{\sqrt{F}}. \quad (5)$$

Форма потенциальной ямы электронной ловушки в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ , определенная по формулам (4) и (5), представлена на рис. 3.

Если известна форма кривой потенциальной энергии для взаимодействия с конкретным центром, то можно получить информацию о структуре центров захвата. Как указывается в работе [13], чтобы электрон покинул центр, должно выполняться условие  $E > E_0 - \Delta U$  ( $E_0$  — глубина уровня, на котором локализован электрон,  $\Delta U$  — понижение потенциального барьера в электрическом поле). Необходимо, чтобы электрон сохранил энергию до того момента, когда он минует точку перевала, и не потерял ее при тепловых соударениях. Это имеет место лишь в тех случаях, когда длина свободного пробега электрона больше эффективных размеров потенциальной ямы. При этом длина свободного пробега носителей тока определяется формулой [13]

$$\lambda = \frac{1}{e} f(F_{\text{cr}}) = \frac{kT\beta}{2e} \frac{1}{\sqrt{F_{\text{cr}}}}. \quad (6)$$

Длина свободного пробега электрона в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ , вычисленная на основе экспериментальных данных, согласно этой формуле, равна  $\sim 8 \cdot 10^{-7}$  см.

Следует отметить, что значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , концентрации ловушек  $N_t$  и длины свободного пробега электрона  $\lambda$  для монокристаллов

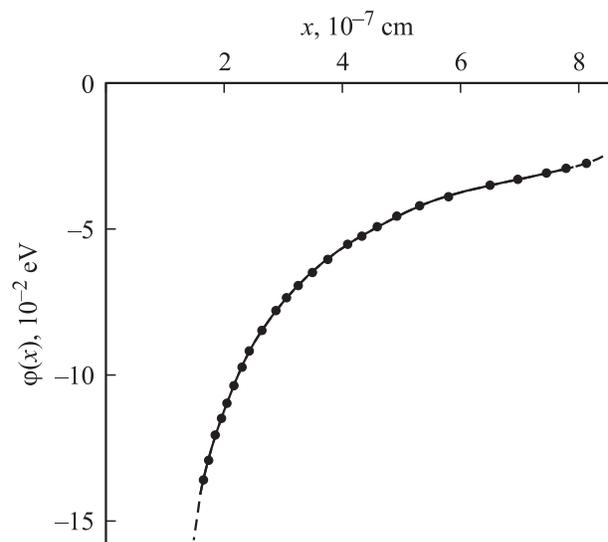


Рис. 3. Форма потенциальной ямы, связанной с электронной ловушкой в  $\text{MnGaInS}_4$ .

$MnGaInS_4$  почти совпадают с аналогичными значениями для кристаллов, полученных методом Бриджмена [7].

Таким образом, на основе исследований ВАХ в области сильных полей показано, что ток в нелинейной области обусловлен термополевым эффектом Френкеля. Определены диэлектрическая проницаемость, концентрация ловушек, а также форма потенциальной ямы.

## Список литературы

- [1] Т. Kanomata, Н. Ido, Т. Kaneko. J. Phys. Soc. Jap., **34**, 554 (1973).
- [2] Э.Л. Нагаев. *Физика магнитных полупроводников* (М., 1979).
- [3] *Магнитные полупроводники*. Тр. ФИАН СССР, **139**, 172 (М., 1982).
- [4] Р.Н. Бекимбетов, Ю.В. Рудь, М.А. Таиров. ФТП, **21**, 1051 (1987).
- [5] С. Марцинкявичус, Г. Амбразявичус, Р.Н. Бекимбетов, Г.А. Медведкин. ФТП, **22**, 1919 (1988).
- [6] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud, M.A. Tairov. Phys. Status Solidi A, **3**, 289 (1989).
- [7] Н.Н. Нифтиев, А.Г. Рустамов, О.Б. Тагиев. ФТП, **27**, 386 (1993).
- [8] Н.Н. Нифтиев, А.Г. Рустамов, О.Б. Тагиев, Г.М. Нифтиев. Опт. и спектр., **75**, 351 (1993).
- [9] C. Battistoni, L. Gastaldi, G. Mattogno, M.G. Simeone, S. Viticoli. Sol. St. Commun., **61**, 43 (1987).
- [10] Я.И. Френкель. ЖЭТФ, **8**, 1292 (1938).
- [11] Я.И. Френкель. Собр. избр. тр. (Наука, 1975) т. 2, с. 217.
- [12] R.H. Hill. Phil. Mag., **23**, 59 (1971).
- [13] Н.Г. Волков, В.К. Ляпидевский. ФТТ, **14**, 1337 (1972).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Electrical a properties of the $MnGaInS_4$ single crystal layers in strong electric fields

*N.N. Niftiev, O.B. Tagiev\**

Azerbaijani State Pedagogical University,  
370000 Baku, Azerbaijan

\* Institute for Physics,

National Academy of Sciences of Azerbaijan,  
370143 Baku, Azerbaijan

**Abstract** Studied have been volt-ampere characteristics of strong electric fields in  $MnGaInS_4$  single crystals. It has been shown that the current in the non-linear range of the characteristic in conditioned by the field effect. Found are the trap density and the shape of the potential well.