

## Особенности токопрохождения в монокристаллах $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$

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

Институт физики Академии наук Азербайджана,  
370143 Баку, Азербайджан

(Получена 15 февраля 2001 г. Принята к печати 20 июня 2001 г.)

Представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик монокристаллов  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  с удельным сопротивлением  $10^{10} - 10^{12}$  Ом·см, полученных методом Бриджмена–Стокбаргера. Вычисленное с помощью дифференциального метода анализа вольт-амперной характеристики значение подвижности основных носителей ( $\mu = 14$  см<sup>2</sup>/В·с) позволяет оценить ряд параметров: концентрацию носителей у катода  $n_{k0} = 2.48 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>, ширину приконтактного барьера  $d_k = 5.4 \cdot 10^{-8}$  см, прозрачность катода  $D_k^* = 10^{-5} - 10^{-4}$  эВ, положение квазиуровня Ферми  $E_F = 0.38$  эВ. Показано, что в сильных электрических полях токопрохождение в монокристаллах  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  обеспечивается эффектом Пула–Френкеля. Вычисленная из значений коэффициента Френкеля величина диэлектрической проницаемости оказалась равной 8.4.

Тройное халькогенидное соединение  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  является фоточувствительным материалом, представляющим большой практический интерес для создания фотоприемников и фотопреобразователей, работающих в широкой области спектра (0.40–1.20 мкм) [1].

В [1,2] нами исследована температурная зависимость значений темного и светового токов и определено энергетическое положение центров рекомбинации, а также приведены результаты исследований по определению значений ширины запрещенной зоны, соответствующих прямым и непрямым разрешенным оптическим переходам в монокристаллах  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ .

В настоящей работе представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) монокристаллов  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  с удельным сопротивлением  $10^{10} - 10^{12}$  Ом·см (при  $T = 300$  К). С этой целью были изготовлены образцы с толщинами от 50 до 200 мкм. Индиевые контакты наносились на естественные сколы кристаллов. Перед измерениями образцы нагревались до температуры 380 К, а затем медленно (в течение 2 ч) охлаждались в темноте и в вакууме до 300 К.

Типичные ВАХ для всех исследуемых образцов приведены на рис. 1. Видно, что при изменении электрического поля от  $10^2$  до  $10^5$  В/см ток, проходящий через структуры  $\text{In-PbGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$ , увеличивается на 3–4 порядка величины в зависимости от температуры. С понижением температуры зависимость тока от напряжения усиливается, и ВАХ смещаются в сторону высоких электрических полей. На начальном участке ВАХ наблюдается быстрый рост тока с увеличением напряжения ( $I \propto U^n$ ). Далее, в диапазоне напряжений до 120 В, зависящем от температуры, скорость роста тока уменьшается.

Ток в образце ограничен контактом — поверхностным барьером, включенным в запорном направлении, — и при незначительном увеличении напряжения ( $\approx 10$  В) может происходить пробой барьера вследствие ударной ионизации в области объемного заряда, что приводит к быстрому росту тока с напряжением при низких напряжениях.

Начиная с 40 В наблюдается сравнительно медленный рост тока, который обусловливается захватом инжектированных электронов пустыми уровнями  $E_t = 0.72$  эВ, и это продолжается до напряжения предельного заполнения ловушек. Однако если в образце имеется выраженная неоднородность, область которой является областью повышенного сопротивления, то проводимость этой области должна падать с ростом напряжения.

Для аналитического представления ВАХ существует несколько приближенных методов. Полученные для структур  $\text{In-PbGa}_2\text{Se}_4\text{-In}$  результаты анализировались

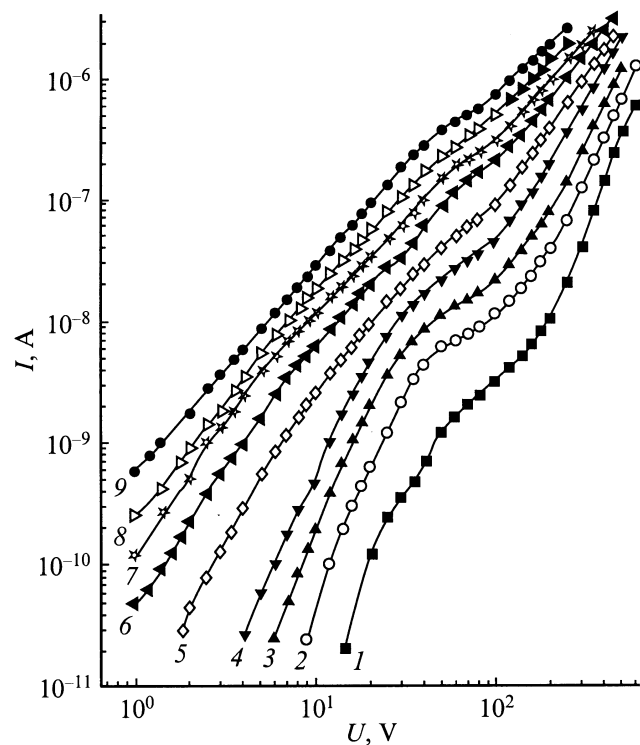


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики монокристалла  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  толщиной  $L = 120$  мкм при температурах  $T, \text{K}$ : 1 — 125, 2 — 161, 3 — 181, 4 — 198, 5 — 230, 6 — 248, 7 — 340, 8 — 360, 9 — 380.

на основе степенной зависимости тока  $I$  от напряжения  $U$  ( $I \propto U^\alpha$ ) [3–4]:

$$\alpha = \frac{d \lg I}{d \lg U} = \frac{dI}{dU} \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Зависимость  $\alpha(U, I)$  при температуре 181 К имеет одну экстремальную точку ( $\alpha_{\min} = 0.66$  при  $U_{\min} = 65$  В ( $I_{\min} = 1.37 \cdot 10^{-8}$  А)) (рис. 2).

По теории, изложенной в [3], энергия активации глубоких уровней определяется формулой

$$E_t = kT \ln \left[ 2 \left( \frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{3(1 + \alpha_m) e \mu S V_m}{2\alpha_m^2 (5 - 8\alpha_m^2) L I_m} \right], \quad (2)$$

где  $2 \left( \frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right) \approx 10^{19} \text{ см}^{-3} \left( \frac{m_n}{m} \frac{T}{300\text{К}} \right)^{3/2} = N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости,  $m_n = 0.5m_e$  — эффективная масса,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $L$  — толщина образца,  $S$  — площадь контактов. Используя значения  $E_t$ , определенные из температурной зависимости проводимости, вычислена подвижность основных носителей  $\mu = 14 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , и это дает возможность определить такие параметры, как  $n_{k0}$  (концентрация носителей у катода),  $d_k$  (ширина приконтактного барьера),  $D_k^*$  (прозрачность катода),  $E_F$  (положение квазиуровня Ферми) [4,5]:  $n_{k0} = 2.48 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ,  $E_F = 0.38 \text{ эВ}$ ,  $d_k = 5.4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ,  $D_k^* = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ эВ}$ .

Как видно из рис. 1, пройдя участок медленного роста, ток вновь начинает подниматься, т.е. происходит термополевая ионизация ловушек. С целью выяснения справедливости этого механизма в исследуемых образцах монокристаллов PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> использована теория Пула-Френкеля [6], согласно которой

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\beta \sqrt{F}).$$

Здесь  $F$  — электрическое поле,  $\sigma_0$  — электропроводность при  $F = 0$  или в области выполнения закона Ома,

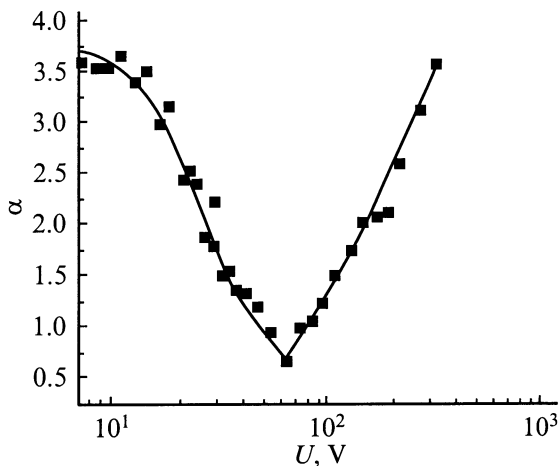


Рис. 2. Зависимость  $\alpha$  от  $U$  при  $T = 181$  К для образца монокристалла PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>.

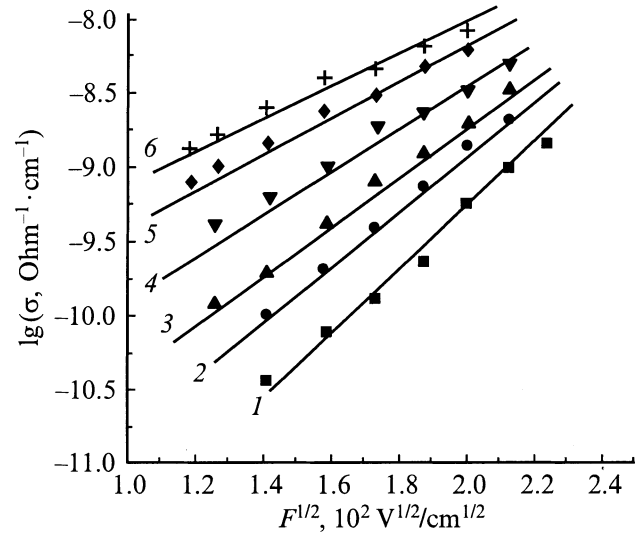


Рис. 3. Зависимость  $\lg \sigma$  от  $\sqrt{F}$  для монокристалла PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> при различных температурах  $T$ , К: 1 — 125, 2 — 161, 3 — 181, 4 — 198, 5 — 230, 6 — 248.

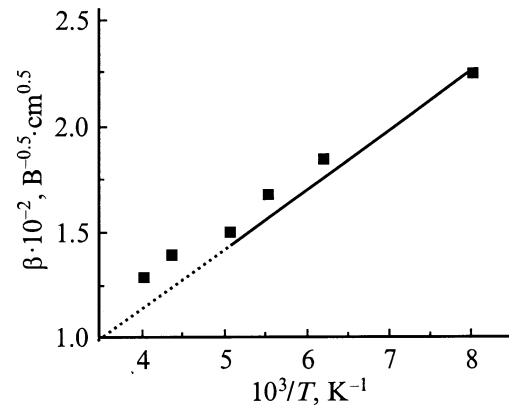


Рис. 4. Зависимость  $\beta$  от  $10^3/T$  для PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>.

$\sigma$  — электропроводность в сильных электрических полях ( $F \neq 0$ ),  $\beta = \frac{\sqrt{e^3}}{kT \sqrt{\pi \epsilon \epsilon_0}}$  — коэффициент Френкеля,  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника.

На рис. 3 приведена зависимость  $\lg \sigma = f(\sqrt{F})$  для структуры In–PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>–In при различных температурах. Нетрудно заметить, что наклон  $\beta$  прямых  $\lg \sigma = f(\sqrt{F})$  увеличивается с понижением температуры (рис. 4). Это означает, что при высоких электрических полях ионизация ловушек происходит только за счет температуры. По экспериментальному значению  $\beta$  определена величина  $\epsilon$  для PbGa<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>, которая оказалась равной 8.4.

### Список литературы

- [1] Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, Р.Б. Джаббаров, Н.Н. Мусаева. Неорг. матер., **35**, 33 (1999).
- [2] Б.Г. Тагиев, Н.Н. Мусаева, Р.Б. Джаббаров. ФТП, **33**, 39 (1999).

- [3] А.Н. Зюганов, С.В. Свечников. *Инжекционно-контактные явления в полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1981).
- [4] З.В. Беришвили, А.Н. Зюганов, С.В. Свечников, П.С. Смертенко. Полупроводн. техн. и микроэлектрон., № 28, 23 (1978).
- [5] А.Н. Зюганов, П.С. Смертенко, Е.П. Шульга. Полупроводн. техн. и микроэлектрон., № 29, 48 (1979).
- [6] Я.И. Френкель. ЖЭТФ, **8**, 1292 (1938).

Редактор Л.В. Беляков

## Features of the current in $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$ single crystals

B.G. Tagiev, N.N. Musayeva, R.B. Jabbarov

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

**Abstract** Results of an investigation of volt-ampere characteristics in  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  single crystals with resistivity of  $10^{10} - 10^{12}$  Ohm  $\cdot$  cm, obtained by a Bridgman-Stockbarger method are presented. Value of the majority carrier mobility ( $\mu = 14 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) calculated by a differential method of the analysis of the volt-ampere characteristic makes it possible to evaluate a number of parameters: the carrier concentration at the cathode,  $n_{k0} = 2.48 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , the width of a contact barrier,  $d_k = 5.4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$ , the transparency of the cathode  $D_k^* = 10^{-5} - 10^{-4}$  eV, the position of the quazi-Fermi level  $E_F = 0.38 \text{ eV}$ . It has been found that high electrical fields provide the current conductivity in  $\text{PbGa}_2\text{Se}_4$  in accordance with the Pool-Frenkel effect. The dielectric constant calculated from the values of Frenkel's factor is equal to 8.4.