

06.1;09.1

Исследование явления токопрохождения в кристаллах $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ © О.Б. Тагиев^{1,2}, Ф.А. Казымова¹, Г.С. Гаджиева¹, Т.Ш. Ибрагимова¹, Е.Г. Асадов¹, К.О. Тагиев³¹ Институт физики Министерства науки и образования Азербайджана, Баку, Азербайджан² Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в Баку, Баку, Азербайджан³ Integrated Energy Company, Баку, Азербайджан

E-mail: ibrahimovatomasha@gmail.com

Поступило в Редакцию 1 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 22 февраля 2023 г.

Принято к публикации 28 февраля 2023 г.

Приводятся результаты исследования статических вольт-амперных характеристик кристаллов $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ при комнатной температуре. Выявлен механизм токопрохождения в них. Вычислены высота потенциального барьера на границе металл–полупроводник ($\Phi \approx 0.9 \text{ eV}$), относительная диэлектрическая проницаемость кристаллов ($\epsilon = 3.1$), концентрация ловушек ($N \approx 7.14 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Определена форма потенциальной ямы для захваченных ловушками электронов.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, кристалл, контакт металл–полупроводник, высота потенциального барьера, эрбий.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.10.55424.19517

С момента получения тетрагалкогенидов европия EuGa_2S_4 из группы $AB_2^{\text{III}}C_4^{\text{VI}}$ (A — Eu, Yb, Dy; B — Ga, In; C — S, Se, Te) с незаполненными внутренними $4f$ -оболочками, активированных редкоземельными элементами, в частности эрбием, начались их интенсивные исследования, в ходе которых были выявлены их многие интересные физические свойства. Фото-, электро- и термолюминесцентным свойствам этих кристаллов посвящено значительное число работ [1–6], экспериментальные результаты которых позволили определить ряд важных параметров фотолюминесценции (красное смещение, стоксово смещение, время жизни ионов Er^{3+} и др.), электролюминесценции и термолюминесценции (частотный фактор, энергия активации, сечение захвата, концентрация ловушечных уровней и др.). Удалось установить закономерности зависимости интенсивности фотолюминесценции от температуры образца, мощности возбуждающего излучения и показать, как за счет ионов эрбия в указанных кристаллах появляется антистоксова люминесценция и увеличивается время пребывания электронов на ловушках, которым определяется длительность высвечивания люминофора.

Анализ результатов проведенных нами исследований позволил установить, что кристаллы $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}$ являются новыми антистоксовыми люминесцентными материалами для систем волоконно-оптических линий связи, лазеров ИК-излучения и приборов ночного видения.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса токопрохождения в кристаллах $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ и определению некоторых параметров.

Кристаллы EuGa_2S_4 синтезировались путем твердотельной реакции бинарных соединений EuS и Ga_2S_3 . В качестве активатора использовался редкоземельный элемент эрбий, который вводился в матрицу в виде фторидов эрбия (ErF_3). Синтез осуществлялся при 1100°C

в течение 5 h, затем температура уменьшалась до 800°C , после чего в течение 4 h проводился отжиг [1].

Исследование статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) выполнялось на установке, схема которой приведена в работе [7]. Источником питания служила батарея с внутренним сопротивлением 1 МΩ. Напряжение на образце измерялось с помощью цифрового вольтметра В7-16. Для измерения тока в образце использовался электрометрический усилитель типа У5-6, позволяющий измерять токи от $5 \cdot 10^{-15}$ до 10^{-6} А.

Образец для исследования имел форму узкого параллелепипеда, на двух противоположных отшлифованных поверхностях которого создавались надежные индиевые контакты.

Рабочая площадь полученной сэндвич-структуры составляла $\sim 2 \text{ mm}^2$, расстояние (d) между электродами было $\sim 1 \text{ mm}$. Кристаллы имели n -тип проводимости.

На рис. 1, *a* приведена статическая ВАХ исследуемого кристалла $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ при комнатной температуре. На ВАХ выделяются следующие участки: омический, имеющий место до напряжения $\sim 800 \text{ V}$, нелинейный участок в области 800 – 1150 V и далее участок резкого роста тока, заканчивающийся пробоем материала при $\sim 1300 \text{ V}$. Токопрохождение в полупроводниках в нелинейной области ВАХ можно объяснить инжекцией носителей заряда из металлических электродов в полупроводник при относительно малых электрических полях, а при высоких полях — полевой ионизацией примесных центров захвата или одновременно инжекцией и полевой ионизацией [8].

Анализ ВАХ, проведенный нами на нелинейном ее участке, показал, что изменение тока с напряжением происходит по экспоненциальному закону $\exp U^{1/2}$ (рис. 1, *b*), характерному как для надбарьерной эмиссии Ричардсона–Шоттки, так и для эмиссии

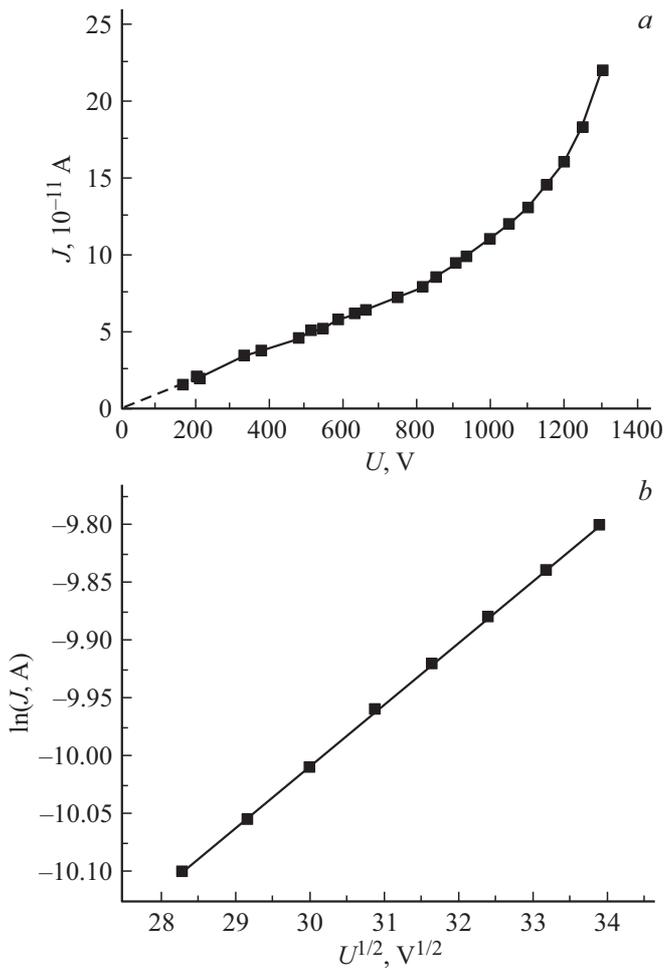


Рис. 1. *a* — статическая вольт-амперная характеристика кристаллов $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ при комнатной температуре; *b* — зависимость $\ln J$ от \sqrt{U} для образцов при комнатной температуре.

Френкеля–Пула — процесса [9], облегченного электрическим полем термического возбуждения электронов, захваченных ловушками в зону проводимости полупроводника, согласно приведенным в работе [10] формулам (рис. 2, процессы 1 и 2 соответственно):

$$J_{Sch} = AT^2 \exp \left[\frac{-q(\varphi - \sqrt{qE/4\pi\epsilon})}{kT} \right], \quad (1)$$

$$J_F = E \exp \left[\frac{-q(\varphi - \sqrt{qE/\pi\epsilon})}{kT} \right], \quad (2)$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, ϵ — диэлектрическая проницаемость материала, T — абсолютная температура, q — электрический заряд, $A = 120 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ — постоянная Ричардсона, $E = U/d$ — напряженность электрического поля, φ — потенциал.

Из сравнения этих формул видно, что выражения для ловушек с кулоновским потенциалом в них практически идентичны.

Однако высота потенциального барьера (Φ) на границе раздела металл–полупроводник (того самого барьера, который преодолевают электроны, переходящие из металла в полупроводник) в эмиссии Шоттки понижена вдвое, что обусловлено фиксированным пространственным зарядом полупроводника (рис. 2).

По приведенной в работе [10] формуле

$$\Phi = -\frac{kT}{0.43} \lg \frac{J}{SAT^2}, \quad (3)$$

зная, что $T = 293 \text{ K}$, $S = 2 \text{ mm}^2$, а ток отсечки (ток при $U = 800 \text{ V}$), при котором происходит отклонение от закона Ома, $J = 8 \cdot 10^{-11} \text{ A}$ (рис. 1, *a*), удалось найти $\Phi = 0.91 \text{ eV}$. Эта высота совпадает с глубиной потенциальной ямы для захваченных ловушками электронов, форму которой можно определить с помощью выражений [11]:

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

$$x = \frac{kT\beta d}{2e} \frac{1}{\sqrt{U}}, \quad (5)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ — заряд электрона, $\varphi(x)$ — потенциальная энергия, зависящая от расстояния x до ловушки, которое берется вдоль направления электрического поля, β — тангенс угла наклона зависимости $\lg J \sim \sqrt{U}$.

Из данных, приведенных на рис. 1, *b*, получено, что $\beta \approx 0.0054 \text{ V}^{-1/2}$. Форма потенциальной ямы, определенная на основании (4) и (5), показана на рис. 3.

Из соотношения [10]

$$\beta = \frac{\sqrt{e^3}}{kT\sqrt{\pi\epsilon\epsilon_0 d}}$$

(где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ — электрическая постоянная вакуума) можно получить выражение для относительной

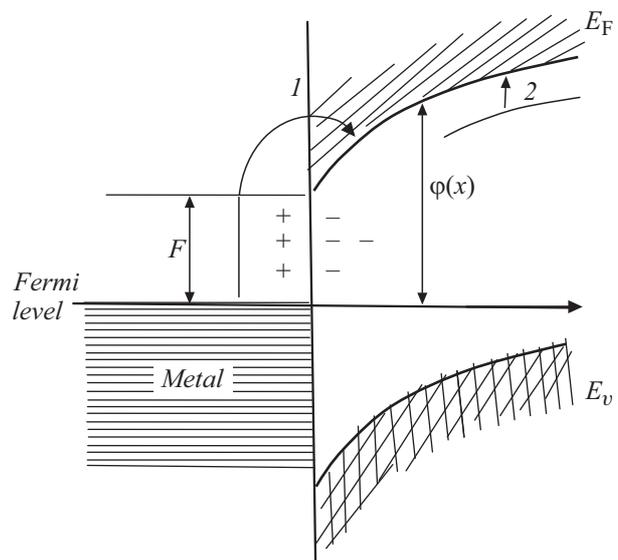


Рис. 2. Энергетическая схема контакта металл–полупроводник.

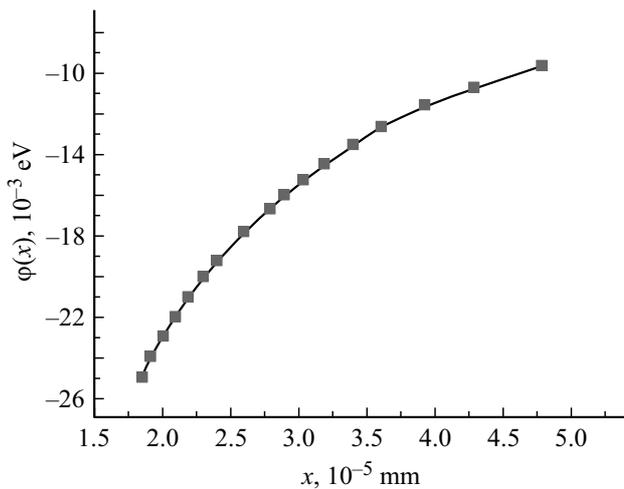


Рис. 3. Вид потенциальной ямы для электронов ловушек.

диэлектрической проницаемости вещества

$$\varepsilon = \frac{e^3}{\beta^2 k^2 T^2 \pi \varepsilon_0 d}, \quad (6)$$

знание которой важно при интерпретации оптических свойств материалов ($\varepsilon = n^2$, где n — показатель преломления вещества), а также при определении емкости полупроводниковых преобразователей.

Расчет по формуле (6) показал, что $\varepsilon = 3.1$, что близко к значению $\varepsilon = 2.9$, найденному в работе [5].

Поскольку исследуемое соединение содержит значительную долю примесей (5%), на токопрохождение существенное влияние может оказывать наличие ловушек (центров захвата) (рис. 2, процесс 2), концентрацию которых можно найти по формуле [10]:

$$N = \left(\frac{2e}{kT\beta d} \sqrt{U} \right)^3. \quad (7)$$

Из этого выражения было получено, что $N \approx 7.14 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, при исследовании статических ВАХ в кристаллах $\text{EuGa}_2\text{S}_4:\text{Er}^{3+}$ выявлен механизм токопрохождения в них, найдены высота потенциального барьера на границе металл–полупроводник, диэлектрическая проницаемость исследуемого материала, концентрация ловушек, определена форма потенциальной ямы для захваченных ловушками электронов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С. Barthou, P. Benalloul, B.G. Tagiev, O.B. Tagiev, S.A. Abushov, A.N. Georgobiani, F.A. Kazimova, A.N. Georgobiani, *J. Phys.: Condens. Matter*, **16** (45), 8075 (2004). DOI: 10.1088/0953-8984/16/45/029
- [2] А.Н. Георгобiani, С.А. Абушов, Ф.А. Казымова, Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, П. Беналлул, К. Бартоу, *Неорган. материалы*, **42** (11), 1304 (2006). <https://www.elibrary.ru/item.aspID=9292313> [A.N. Georgobiani, S.A. Abushov, F.A. Kazymova, B.G. Tagiev, O.B. Tagiev, P. Benalloul, C. Barthou, *Inorg. Mater.*, **42** (11), 1188 (2006). DOI: 10.1134/S0020168506110033].
- [3] А.Н. Георгобiani, Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, Р.Б. Джаббаров, С.А. Абушов, Ф.А. Казымова, К. Бартоу, П. Беналлул, В.М. Салманов, *ЖПС*, **74** (3), 332 (2007). <https://www.elibrary.ru/item.aspID=9465278> [A.N. Georgobiani, B.G. Tagiev, O.B. Tagiev, R.B. Dzhabbarov, S.A. Abushov, F.A. Kazymova, C. Barthou, P. Benalloul, V.M. Salmanov, *J. Appl. Spectrosc.*, **74** (3), 369 (2007). DOI: 10.1007/s10812-007-0060-5].
- [4] А.Н. Георгобiani, Б.Г. Тагиев, О.Б. Тагиев, С.А. Абушов, Ф.А. Казымова, Т.Ш. Гашимова, С. Сююнь, *Неорган. материалы*, **45** (2), 152 (2009). <https://www.elibrary.ru/item.aspID=11685002> [A.N. Georgobiani, B.G. Tagiev, O.B. Tagiev, S.A. Abushov, F.A. Kazymova, T.Sh. Gashimova, X. Xurong, *Inorg. Mater.*, **45** (2), 116 (2009). DOI: 10.1134/S0020168509020022].
- [5] О.Б. Тагиев, Ф.А. Казымова, Г.С. Гаджиева, Т.Ш. Ибрагимова, *Изв. НАН Азербайджана*, **XXXIX** (5), 65 (2019).
- [6] Г.С. Гаджиева, Ф.А. Казымова, Т.Ш. Ибрагимова, О.Б. Тагиев, в сб. *XIV Международ. конф. „Наука России: цели и задачи“* (Екатеринбург, 2019), с. 20.
- [7] Q.Y. Eyubov, *Electrical and luminescent properties of monocrystals GaS, activated by the rare earth elements (Er, Yb, Tm)*, PhD thesis (Institute of Physics, Baku, 2012).
- [8] В.В. Трегулов, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, *ФТП*, **52** (7), 751 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46047.8648 [V.V. Tregulov, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin, *Semiconductors*, **52** (7), 891 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618070242].
- [9] М.М. Казанин, В.В. Каминский, М.А. Гревцев, *ФТП*, **53** (7), 887 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.07.47862.9075 [M.M. Kazanin, V.V. Kaminski, M.A. Grevtsev, *Semiconductors*, **53** (7), 872 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619070121].
- [10] G.S. Hadjieva, K.O. Taghiyev, E.G. Asadov, F.A. Kazimova, T.Sh. Ibrahimova, O.B. Taghiyev, *Mod. Phys. Lett. B*, **34** (31), 2050344 (2020). DOI: 10.1142/S0217984920503443
- [11] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, *ФТП*, **41** (1), 17 (2007). [N.N. Niftiev, O.B. Tagiev, *Semiconductors*, **41** (1), 15 (2007). DOI: 10.1134/S1063782607010046].