

# Электрические свойства FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> на переменном токе

Н. Н. Нифтиев<sup>a,\*</sup>, А. О. Дашдемиров<sup>a,\*\*</sup>, Ф. М. Мамедов<sup>b,a,\*\*\*</sup>, Р. М. Агаева<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Азербайджанский государственный педагогический университет,  
г. Баку, Az-1000, Азербайджан,

\*e-mail: [namiq7@bk.ru](mailto:namiq7@bk.ru), \*\*e-mail: [arzu.dashdemirov@adpu.edu.az](mailto:arzu.dashdemirov@adpu.edu.az), \*\*\*\*e-mail: [reyhan.agayeva@adpu.edu.az](mailto:reyhan.agayeva@adpu.edu.az)

<sup>b</sup>Институт катализа и неорганической химии им. академика М. Нагиева,  
г. Баку, Az-1143, Азербайджан, \*\*\*e-mail: [faikmamadov@mail.ru](mailto:faikmamadov@mail.ru)

Поступила в редакцию 12.04.2024

После доработки 22.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Исследованы температурные и частотные зависимости диэлектрической проницаемости и электропроводности кристаллов FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> на переменном токе. В кристалле FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> нормальная дисперсия возникает в диапазоне частот  $2 \times 10^2 \div 10^4$  Гц, а распределение дефектов по времени жизни подчиняется закону  $n(\tau) \sim \tau^{-1,75}$ . С повышением температуры причиной увеличения значения действительной части диэлектрической проницаемости является возрастание концентрации дефектов. Наблюдаемое в эксперименте монотонное уменьшение мнимой части диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты свидетельствует о наличии релаксационной дисперсии в кристалле FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub>. Установлено, что в температурном интервале 294,5÷343 К при частотах  $2 \times 10^2 \div 10^6$  Гц для электропроводности выполняется закономерность  $\sigma \sim f^S$  ( $0,1 \leq S \leq 1,0$ ). Показано, что проводимость в этих кристаллах характеризуется зонно-прыжковым механизмом. Из зависимостей  $\lg \sigma \frac{10^3}{T}$  определены энергии активации.

*Ключевые слова:* FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub>, переменный ток, частота, диэлектрическая проницаемость, электропроводность, нормальная дисперсия, зонно-прыжковый механизм, энергия активации

УДК 537.855. 621.315.592.3

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.56>

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большую актуальность приобретает вопрос получения и исследования материалов с одновременными магнитными и полупроводниковыми свойствами. Наличие атомов незаполненных переходных элементов 3d-оболочки в ряде полупроводниковых материалов приводит к возникновению новых, уникальных физических свойств этих материалов, сочетающих в себе как полупроводниковые, так и магнитные свойства. В этом плане вызывает интерес группа тройных соединений  $A''B_2'''X_4^VI$  (A – Mn, Fe, Co, Ni; B – Ga, In; X – S, Se, Te) [1–25]. Этим соединениям присущи явления электронно- или оптически управляемого магнетизма, их используют при создании лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем. На основе этих материалов созданы фоточувствительные структуры [22–24], на базе кристаллов FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> получены гетеропереходы [25], из соединений FeIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> синтезирован нанокристалл [11]. В работе [10] новые 2D-пористые

нанолистовые фотокатализаторы MnIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> были синтезированы впервые с помощью простого гидротермального метода. Они демонстрируют многообещающую активность для фотокаталитического расщепления воды без какого-либо жертвенного агента благодаря их большой удельной площади поверхности, 2D-слоистой морфологии, пористой структуре и подходящей энергетической запрещенной зоне. В работах [26–28] показано, что некоторые соединения вышеуказанного типа могут найти применение в фотокатализе, фотогальванике и термоэлектрических преобразователях, при фотокаталитическом расщеплении воды, а также перспективны для возобновляемой энергии.

Вышеизложенное показывает актуальность исследований, направленных на получение и изучение свойств новых фаз на основе соединений типа AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub> со слоистой структурой, которые демонстрируют широкий спектр структурных, электронных и магнитных превращений, сопровождающихся выраженными аномалиями физических свойств.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований диэлектри-

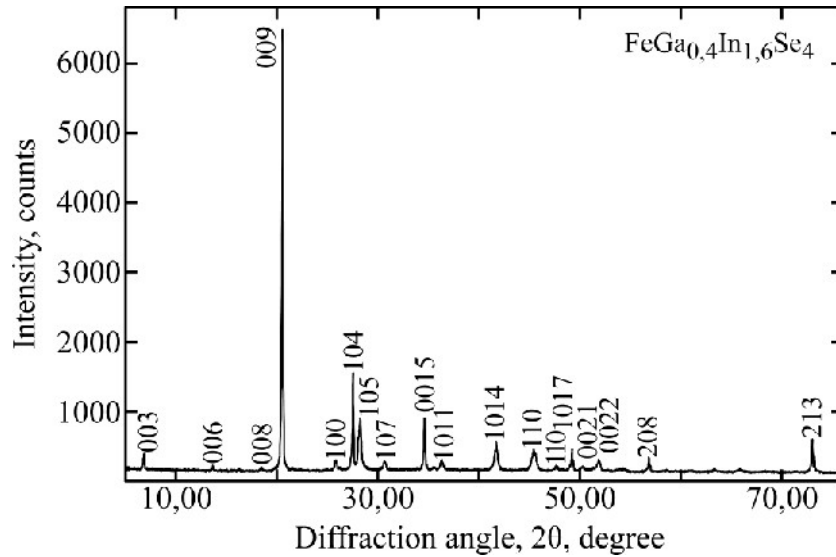


Рис. 1. Дифрактограмма кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  при комнатной температуре.

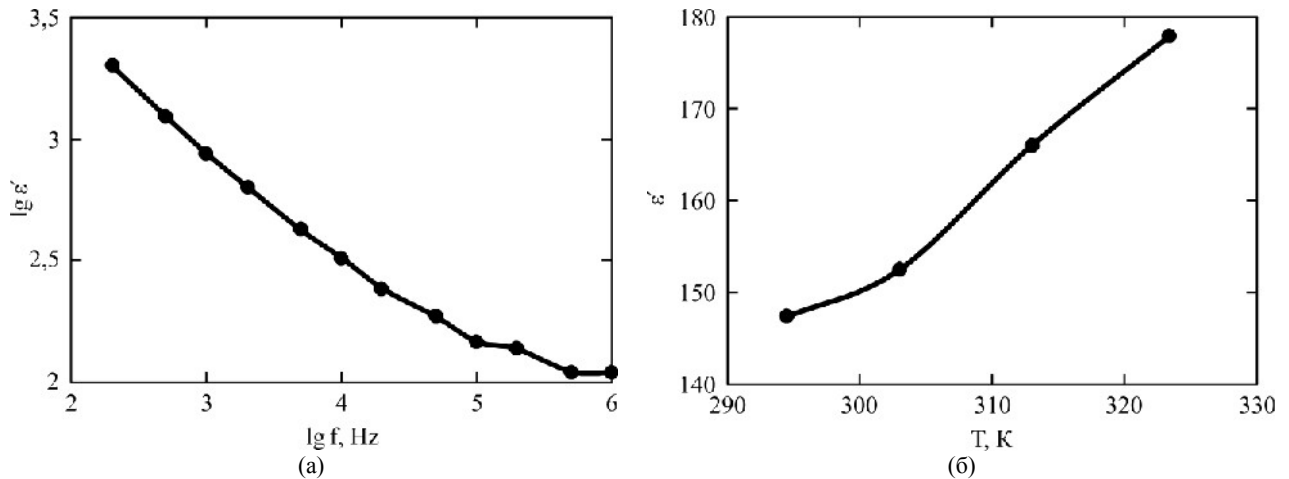


Рис. 2. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости при температуре 294,5 К для кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  от частоты переменного электрического тока (а); температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости на частоте  $10^4$  Гц для кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  (б).

ческой проницаемости и проводимости  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  на переменном токе.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследований сплавлением элементарных компонентов (железо – 99,995 мас.%, индий – 99,999 мас.%, галлий – 99,999 мас.% и селен – 99,99%) фирмой Alfa Aesar в стехиометрических соотношениях в откачанных до  $\sim 10^{-2}$  Па и запаянных кварцевых ампулах был синтезирован кристалл  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ . В результате рентгеноструктурного анализа установлено, что кристалл состава  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  имеет тригональную структуру с параметрами кристаллической решетки  $a = 3,983 \text{ \AA}$  и  $c = 38,811 \text{ \AA}$  [29]. Типичная дифрактограмма кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  при комнатной температуре приведена на рис. 1. Для измерения электрических свойств из образцов кристаллов  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  изготавливались пластинки

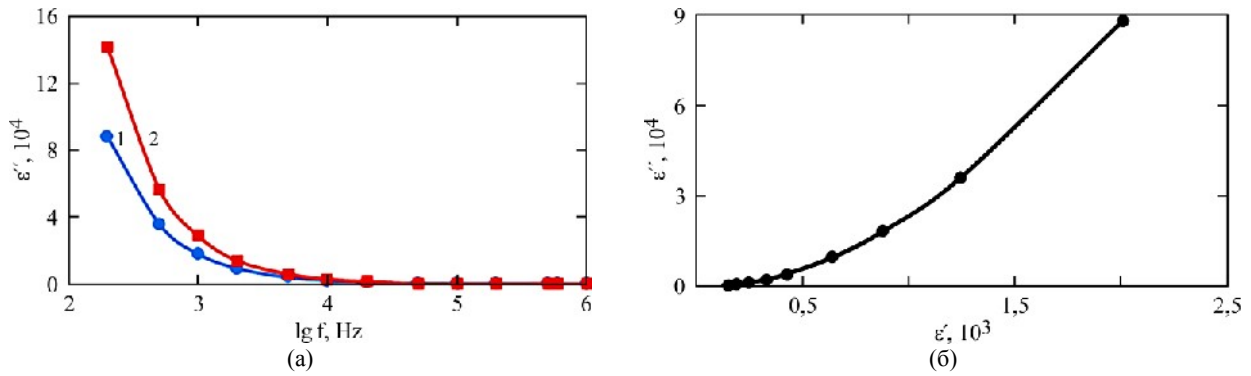
толщиной  $\sim 1,5$  мм, на которые наносились обкладки из серебряной пасты. Конденсаторы помещались в криостат, регулируемый в интервале температур от 293 до 400 К. Точность измерения температуры составляла  $\pm 0,5$  К. Измерения емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и сопротивления проводились с помощью цифровых измерителей иммитанса E7-20 (частоты  $25\text{--}10^6$  Гц). На образец подавалось измерительное напряжение 1 В. Из формул

$$\sigma = \frac{d}{RS}, \quad \varepsilon' = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S} \quad \text{и} \quad \varepsilon'' = \text{tg} \delta \times \varepsilon'$$

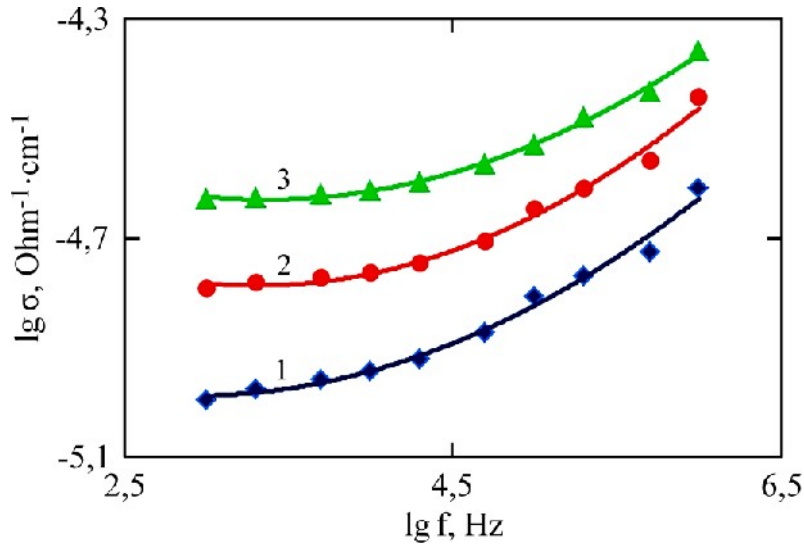
соответственно рассчитывались проводимость, действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а представлена зависимость действительной части диэлектрической



**Рис. 3.** Зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  от частоты измерений при различных температурах  $T$ , К: 1 – 294,5; 2 – 323,5 (а); частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для соединения  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ , представленные в комплексной плоскости (б).



**Рис. 4.** Зависимости электропроводности от частоты измерений при различных температурах  $T$ , К: 1 – 294,5; 2 – 323,4; 3 – 343.

проницаемости ( $\epsilon'$ ) от частоты ( $f$ ) переменного электрического тока при температуре 294,5 К для кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ . В интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^6$  Гц значение  $\epsilon'$  изменяется в диапазоне  $2000 \div 100$ . На частотах  $2 \times 10^2 \div 10^4$  Гц наблюдается уменьшение  $\epsilon'$  с увеличением частоты. В диапазоне частот  $2 \times 10^4 \div 10^6$  Гц  $\epsilon'$  убывает более медленными темпами.

В работе [30] теоретически было рассмотрено поведение диэлектрической проницаемости полупроводников, в которых происходит прыжковый обмен зарядами между дефектами:

$$\epsilon'(f) \sim f^{-(\beta+2)}. \quad (1)$$

Здесь  $(\beta + 2) = -\gamma$ . В этом случае распределение дефектов по времени жизни подчиняется закономерности:

$$n(\tau) \sim \tau^\beta. \quad (2)$$

Отсюда можно сделать вывод, что в полупроводниках с высокой концентрацией в их центрах должна наблюдаться дисперсия диэлектрической проницаемости. Как видно из выражения (1), нормальная дисперсия должна наблюдаться при  $\beta > -2$ , а аномальная дисперсия — при  $\beta < -2$

(при  $\beta = -2$  дисперсия не возникает). Значения  $\beta$  и  $\gamma$  можно определить из экспериментальной зависимости  $\epsilon'(f)$ . Из рис. 2 видно, что зависимость  $\lg \epsilon' \sim \lg f$  в интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^4$  Гц характеризуется практически прямым наклоном. Значение  $\gamma = -0,25$  было найдено по наклону этой прямой. При этом, поскольку  $\beta = -1,75$ , в кристалле  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  возникает нормальная дисперсия в диапазоне частот  $2 \times 10^2 \div 10^4$  Гц, а распределение дефектов по времени жизни подчиняется закону  $n(\tau) \sim \tau^{-1,75}$ .

На рис. 2б представлена температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости на частоте  $10^4$  Гц в кристалле  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ . В диапазоне температур 294,5 ÷ 323 К значение  $\epsilon'$  изменяется в пределах 147 ÷ 180. С повышением температуры причиной увеличения значения действительной части диэлектрической проницаемости является рост концентрации дефектов [31, 32].

На рис. 3а представлена зависимость мнимой части ( $\epsilon''$ ) диэлектрической проницаемости при температурах 294,5 и 323,5 К от частоты электрического поля для кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ . Видно, что в интервале частот

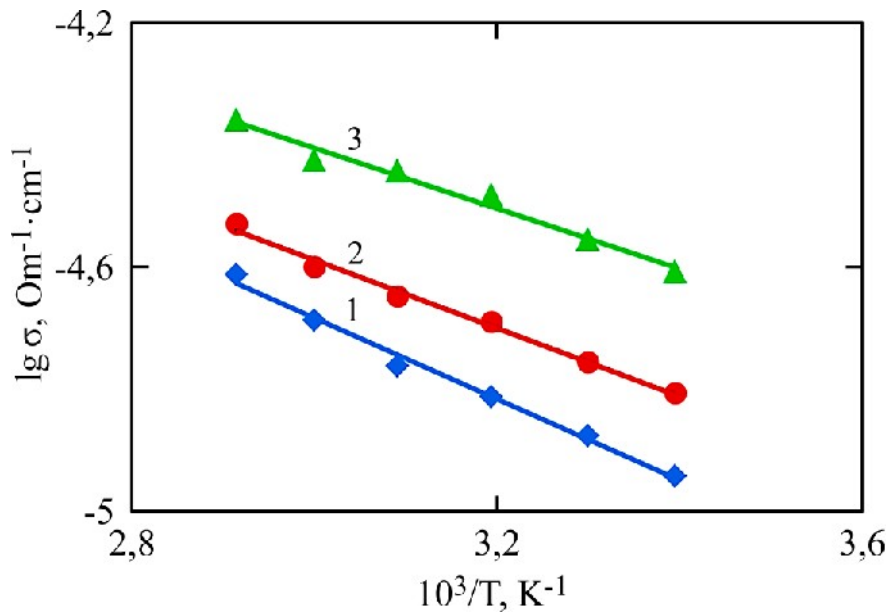


Рис. 5. Температурная зависимость электропроводности для кристаллов  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  на переменном токе при различных значениях частоты  $f$ , Гц: 1 –  $10^4$ ; 2 –  $10^5$ ; 3 –  $10^6$ .

$5 \times 10^2 \div 10^6$  Гц с увеличением частоты зависимость имеет характер монотонного уменьшения, а с увеличением частоты  $\epsilon''$  претерпевает значительную дисперсию. Наблюдаемое в эксперименте монотонное уменьшение мнимой части диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты свидетельствует о наличии релаксационной дисперсии в кристалле  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  [2].

На рис. 3б в виде диаграммы Дэвидсона–Коула представлена зависимость  $\epsilon''$  от  $\epsilon'$  при изменении частоты для фиксированной температуры ( $T = 294,5$  К). Форма этой диаграммы свидетельствует о наличии одного типа релаксаторов в кристалле  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  в интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^5$  Гц [33].

На рис. 4 приведены зависимости проводимости от частоты для кристаллов  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  при различных температурах. Видно, что вначале с увеличением частоты электропроводность возрастает медленно, а затем, по мере наращивания частоты, электропроводность повышается несколько быстрее. Для кристаллов  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  в интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^6$  Гц с увеличением частоты электропроводность растет по закону  $\sigma \sim f^S$  ( $0,1 \leq S \leq 1,0$ ). При температуре 294,5 К в интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^6$  Гц показатель степени ( $S$ ) получает значение  $0,03 \div 0,57$ ; а при температуре 343 К такой же частоты показатель степени ( $S$ ) изменяется в области  $0,01 \div 0,23$ . Видно, что при низких температурах значение  $S$  исследуемых частот изменяется больше чем при высоких температурах. Известно, что если в кристаллах и аморфных полупроводниках зависимость изменения электропроводности от частоты будет

подчиняться закономерности  $\sigma(\omega) \sim \omega^S$  ( $0,1 \leq S \leq 1,0$ ), тогда можно предполагать, что существует прыжковый механизм проводимости [34]. Это означает, что проводимость в соединении  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  характеризуется прыжковым механизмом.

На рис. 5 представлены температурные зависимости электропроводности при различных частотах электрического поля для кристалла  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$ . Электропроводность в изучаемом интервале температур соответствует активационному механизму и определяется следующим выражением:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E / kT). \quad (3)$$

Здесь  $\Delta E$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана. Отсюда видно, что зависимость  $lg \sigma \sim 10^3/T$  в интервале частот  $5 \times 10^4 \div 10^6$  Гц представляет собой прямую линию с различным наклоном. Из этих зависимостей определяли энергии активации. Значения 0,13; 0,11 и 0,10 эВ были получены для энергии активации на частотах  $10^4$ ;  $10^5$  и  $10^6$  Гц при исследованных температурах. Следовательно, величина энергии активации является функцией частоты. Частотную зависимость энергии активации можно объяснить с помощью прыжкового механизма [35]. Таким образом, проводимость в соединении  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  характеризуется смешанным зонно-прыжковым механизмом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы температурные и частотные зависимости  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\sigma$  в кристаллах  $FeGa_{0,4}In_{1,6}Se_4$  на переменном токе. Определены экспери-

ментальные их значения. Установлено, что в кристалле  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  возникает нормальная дисперсия в диапазоне частот  $2 \times 10^2 \div 10^4$  Гц, а распределение дефектов по времени жизни подчиняется закону  $n(\tau) \sim \tau^{-1.75}$ . Предположено, что возрастание  $\epsilon'$  связано с увеличением концентрации дефектов с ростом температуры. Установлено, что мнимая часть диэлектрической проницаемости претерпевала значительную дисперсию, носящую релаксационный характер. Для кристаллов  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  в интервале частот  $2 \times 10^2 \div 10^6$  Гц с увеличением частоты электропроводность растет по закону  $\sigma \sim f^S$  ( $0,1 \leq S \leq 1,0$ ). Проводимость в соединении  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  характеризуется смешанным зонно-прыжковым механизмом. Из зависимостей  $\lg \sigma \sim \frac{10^3}{T}$  определены энергии активации.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Gainza, J., Guinazu, O.N., Cespedes, E., Falcon, H., et al., Tunable inversion degree of  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$  thiospinels prepared by high-pressure synthesis, and its implication in the optical and magnetic properties, *J. Alloys Comp.*, 2023, vol. 969, art. ID 172413. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172413>
- Нифтиев, Н.Н., Дашдемиров, А.О., Мамедов, Ф.М., Мурадов, М.Б., Диэлектрические свойства слоистых монокристаллов  $\text{MnGaInSe}_4$  в переменном электрическом поле, *ЭОМ*, 2023, т. 59, № 2, с. 61. <https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.61>
- Sharan, A., Sajjad, M., Singh, D.J. and Singh, N., Two-dimensional ternary chalcogenides  $\text{FeX}_2\text{Y}_4$  (X=Ga, In; Y=S, Se, Te): Promising materials for sustainable energy, *Phys. Rev. Mater.*, 2022, vol. 6, no. 9, art. ID 094005. [doi: 10.1103/PhysRevMaterials.6.094005](https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.6.094005)
- Lee, T.-Y. and Liu, W.-R., *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 24, art. ID 4367. <https://doi.org/10.3390/nano12244367>
- Нифтиев, Н.Н., Фотоэлектрические свойства монокристаллов  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$ , *Журнал прикладной спектроскопии*, 2021, т. 88, № 6, с. 967. <https://doi.org/10.47612/0514-7506-2021-88-6-967-969>
- Kim, H., Liu, X., Kim, M., Cho, Y., et al., Layer-dependent band structure of ternary metal chalcogenides: thickness-controlled hexagonal  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ , *Chem. Mater.*, 2020, vol. 33, p. 164. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c03146>
- Hwang, Y., Choi, J., Ha, Y., Cho, S., et al., Electronic and optical properties of layered chalcogenide  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$ , *Curr. Appl. Phys.*, 2020, vol. 20, no. 1, p. 212.
- Zeng, C. and Hu, Y., Hydrothermal synthesis of a  $\text{CoIn}_2\text{S}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$  heterojunctional photocatalyst with enhanced photocatalytic  $\text{H}_2$  evolution activity under visible light illumination, *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, no. 50, art. ID 505711. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abb72c>
- Yang, J., Zhou, Z., Fang, J., Wen, H., et al., Magnetic and transport properties of a ferromagnetic layered semiconductor  $\text{MnIn}_2\text{Se}_4$ , *Appl. Phys. Lett.*, 2019, vol. 115, art. ID 222101. <https://doi.org/10.1063/1.5126233>
- Liang, H., Feng, T., Tang, S., Zhao, K., et al., Two-dimensional (2D)  $\text{MnIn}_2\text{Se}_4$  nanosheets with porous structure: a novel photocatalyst for water splitting without sacrificial agents, *Chem. Commun.*, 2019, vol. 55, p. 15061. <https://doi.org/10.1039/C9CC08145C>
- Kim, H., Tiwari, A.P., Hwang, E., Cho, Y., et al.,  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  nanocrystals: A ternary metal chalcogenide material for ambipolar field-effect transistors, *Adv. Sci.*, 2018, vol. 5, no. 7, art. ID 1800068. <https://doi.org/10.1002/advs.201800068>
- Pauliukavets, S.A., Bychek, I.V. and Patapovich, M.P., Specific features of the growth, structure, and main physicochemical properties of  $\text{FeGa}_2\text{Se}_4$  single crystals, *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2018, vol. 9, no. 2, p. 207. <https://doi.org/10.1134/S2075113318020223>
- Myoung, B.R., Lim, J.T. and Kim, C.S., Investigation of magnetic properties on spin-ordering effects of  $\text{FeGa}_2\text{S}_4$  and  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ , *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, vol. 438, p. 121. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.04.056>
- Hou, W., Xiao, Y. and Han, G., An interconnected ternary  $\text{MIn}_2\text{S}_4$  (M = Fe, Co, Ni) thiospinels nanosheets array: a type of efficient platinum-free counter electrodes for dye-sensitized solar cells, *Angew. Chem.*, 2017, vol. 56, no. 31, p. 9146. <https://doi.org/10.1002/anie.201705399>
- Rincón, C., Torrrres, T.E., Sagredo, V., Jiménez-Sandoval, S.J., et al., The Fundamental absorption edge in  $\text{MnIn}_2\text{Se}_4$  layer semi-magnetic semiconductor, *Physica B: Cond. Matt.*, 2015, vol. 477, p. 123. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2015.08.004>
- Shi, Y.-F., Wang, Y. and Wu, L.-M., Hexagonal  $\text{MIn}_2\text{S}_4$  (M = Mn, Fe, Co): formation and phase transition, *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol. 117, no. 39, p. 20054. <https://doi.org/10.1021/jp407067d>
- Боднар, И.В., Федотова, Ю.А., Новикова, М.А., Выращивание и исследование методами рентгенографии и ЯГР спектроскопии кристаллов твердых растворов системы  $\text{FeIn}_2\text{S}_4\text{-In}_2\text{S}_3$ , *Георг. мат.*, 2011, т. 47, № 2, с. 156.
- Боднар, И.В., Викторов, И.А., Павлюковец, С.А., Выращивание, структура и анизотропия теплового расширения монокристаллов соединения  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$ , *Георг. мат.*, 2010, т. 46, № 6, с. 681.

19. Takubo, K., Mizokawa, T., Nambu, Y. and Nakatsuji, S., Electronic structure study of triangular lattices in  $\text{FeGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ga}_2\text{S}_5$ , and  $\text{NiGa}_2\text{S}_4$ : Photoemission spectroscopy and Hartree-Fock calculations, *Phys. Rev. B.*, 2009, vol. 79, no. 13, art. ID 134422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.134422>
20. Sagredo, V., Morón, M., Betancourt, L. and Delgado, G.J., Antiferromagnetic versus spin-glass like behavior in  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$ , *J. Magn. Magn. Mater.*, 2007, vol. 312, no. 2, p. 294.
21. Нифтиев, Н.Н., Тагиев, О.Б., Термостимулированные токи в монокристаллах  $\text{MnGaInS}_4$ , *Неорг. мат.*, 2003, т. 39, № 6, с. 576.
22. Боднар, И.В., Рудь, В.Ю., Рудь, Ю.В., Фоточувствительные структуры на монокристаллах  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$ : создание и свойства, *ФТП*, 2009, т. 43, № 11, с. 15492.
23. Боднар, И.В., Павлюковец, С.А., Рудь, В.Ю., Рудь, Ю.В., Выращивание монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  и создание фоточувствительных структур на их основе, *ФТП*, 2009, т. 43, № 11, с. 1553.
24. Боднар, И.В., Рудь, В.Ю., Рудь, Ю.В., Ложкин, Д.В., Четверные твердые растворы  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_x - (\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$  и фоточувствительные структуры на их основе, *ФТП*, 2011, т. 45, № 7, с. 941.
25. Ковалюк, З.Д., Катеринчук, В.Н., Нетяга, В.В., Заслонкин, А.В., Гетеропереход на основе кристалла  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$ , полученного методом Бриджмена, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2007, № 5, с. 43.
26. Chen, W., He, Z.-C., Huang, G.-B., Wu, Ch-L., et al., Direct Z-scheme 2D/2D  $\text{MnIn}_2\text{S}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$  architectures with highly efficient photocatalytic activities towards treatment of pharmaceutical wastewater and hydrogen evolution, *Chem. Eng. J.*, 2019, vol. 359, p. 244.
27. Song, Y., Guo, Y., Qi, S., Zhang, K., et al.,  $\text{Cu}_7\text{S}_4/\text{MnIn}_2\text{S}_4$  heterojunction for efficient photocatalytic hydrogen generation, *J. Alloys Comp.*, 2021, vol. 884, art. ID 161035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161035>
28. Zhang, B., Liu, Y., Hao, J., Gu, D., et al., *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, no. 5, p. 13438.
29. Мамедов, Ф.М., Имамалиева, С.З., Амирасланов, И.Р., Бабанлы, М.Б., Фазовая диаграмма системы  $\text{FeGa}_2\text{Se}_4\text{-FeIn}_2\text{Se}_4$  и кристаллическая структура  $\text{FeGaInSe}_4$ , *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2018, т. 20, № 4, с. 604.
30. Жуковский, П.В., Партыка, Я., Венгерэк, П., Шостак, Ю., и др., Диэлектрические свойства соединений  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}$ , *ФТП*, 2000, т. 34, № 10, с. 1174.
31. Нифтиев, Н.Н., Тагиев, О.Б., Мурадов, М.Б., Электрические свойства слоистых монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$  на переменном токе, *ФТП*, 2008, т. 42, № 3, с. 268.
32. Sardarly, R.M, Samedov, O.A, Abdullaev, A.P. and Salmanov, F.T., Giant dielectric relaxation in  $\text{TlGaTe}_2$  crystals, *Physics of the Solid State*, 2011, vol. 53, no. 8, p. 1564.
33. Мустафаева, С.Н., Асадов, М.М., Гусейнов, Д.Т., Касымоглу, И., Диэлектрические свойства монокристалла  $\text{CuInS}_2$  в переменных электрических полях радиочастотного диапазона, *ФТТ*, 2015, т. 57, № 6, с. 1079.
34. Мотт, Н., Дэвис, Э., *Электронные процессы в некристаллических веществах*. М.: Мир, 1974. 472 с.
35. Böttger H. and Bryksin, V.V., Hopping conductivity in ordered and disordered systems (III), *Phys. stat. sol. (b)*, 1982, vol. 113, p. 9.

### Summary

The temperature and frequency dependences of the dielectric constant and electrical conductivity of  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  crystals on alternating current have been studied. In the  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  crystal, normal dispersion occurs in the frequency range  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz, and the lifetime distribution of defects obeys the law  $n(\tau) \sim \tau^{-1.75}$ . With increasing temperature, the reason for an increase in the value of the real part of the dielectric constant is an increase in the concentration of defects. The experimentally observed monotonic decrease in the imaginary part of the dielectric constant depending on frequency indicates the presence of relaxation dispersion in the  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$  crystal. It has been established that in the temperature range  $294,5 \div 343$  K at frequencies  $2 \cdot 10^2 \div 10^6$  Hz for electrical conductivity the law  $\sigma \sim f^S$  ( $0.1 \leq S \leq 1.0$ ) is satisfied. It was shown that the conductivity in those crystals is characterized by a band-hopping mechanism. Activation energies were determined from the  $\lg \sigma \frac{10^3}{T}$  dependencies.

**Keywords:**  $\text{FeGa}_{0.4}\text{In}_{1.6}\text{Se}_4$ , alternating current, frequency, dielectric constant, electrical conductivity, normal dispersion, band-hopping mechanism, activation energy