

Электропроводность FeGaInSe₄ на переменном токе

© Н.Н. Нифтиев¹, Ф.М. Мамедов^{2,¶}, М.Б. Мурадов³

¹ Азербайджанский государственный педагогический университет,
Az-1000 Баку, Азербайджан

² Институт катализа и неорганической химии им. академика М. Нагиева Национальной академии наук Азербайджана,
Az-1143 Баку, Азербайджан

³ Бакинский государственный университет,
Az-1148 Баку, Азербайджан

¶ E-mail: namiq7@bk.ru

Поступила в Редакцию 14 января 2020 г.

В окончательной редакции 4 февраля 2020 г.

Принята к публикации 14 февраля 2020 г.

Приведены результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности кристаллов FeGaInSe₄ на переменном электрическом токе. Установлено, что при исследуемых температурах в интервале частот $f = 5 \cdot 10^4 - 10^6$ Гц для электропроводности выполняется закономерность $\sigma \propto f^s$ ($0.1 \leq s \leq 1.0$). Из температурных зависимостей проводимости определены энергии активации. Показано, что в кристалле FeGaInSe₄ зависимость электропроводности от частоты можно объяснить при помощи мультиплетной модели, а значит, проводимость в этих кристаллах определяется зонно-прыжковым механизмом.

Ключевые слова: электропроводность, зонно-прыжковый механизм, кристаллы FeGaInSe₄.

DOI: 10.21883/FTP.2020.06.49378.9346

1. Введение

В настоящее время тройные халькогенидные соединения привлекают все больший интерес в связи с тем, что они обладают комплексом исключительно важных свойств и находят широкое применение в различных областях новой техники. В этом плане вызывает интерес группа тройных соединений $A^{II}B_2^{III}X_4^{VI}$ (A — Mn, Fe, Co, Ni; B — Ga, In; X — S, Se, Te) [1–12]. Эти соединения перспективны для создания на их основе лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем. На основе этих материалов созданы фоточувствительные структуры [7–9], на основе кристаллов FeIn₂Se₄ получены гетеропереходы [10], соединение FeIn₂S₄ синтезировано в виде нанокристаллов [11].

В настоящей работе приводятся результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности кристаллов FeGaInSe₄ на переменном электрическом токе.

2. Методика эксперимента и обсуждение результатов

При соотношении 1:1 кубической структуры FeGa₂Se₄ (пр. гр. $F\bar{4}3m$) и тригональной структуры FeIn₂Se₄ (пр. гр. $R3m$) получены слоистые полуметаллические полупроводники состава FeGaInSe₄. Методом Ритвельда на основе порошковой дифрактограммы уточнена кристаллическая структура FeGaInSe₄ и установлено, что вещество кристаллизуется в тригональной решетке (пр. гр. $R3m$, постоянные решетки $a = 3.9290 \text{ \AA}$,

$c = 38.542 \text{ \AA}$) [12,13]. Результаты элементного анализа (таблица) и рентгеновского спектра флюоресценции кристаллов FeGaInSe₄ (рис. 1) хорошо согласуются с химической формулой. Для измерения электрических свойств из полученных кристаллов вырезались крупноблочные пластинки толщиной ~ 0.1 мм, а нанесением серебряной пасты на противоположные поверхности были изготовлены конденсаторы. Измерения сопротивления проводились с помощью цифровых измерителей иммитанса E7-20 (диапазон частот $f = 25 - 10^6$ Гц). На образец подавалось измерительное напряжение 1 В.

На рис. 2 приведены зависимости проводимости от частоты для кристаллов FeGaInSe₄. Видно, что электропроводность в области низких частот сначала остается почти постоянной, затем с ростом частоты увеличивается. Для кристаллов FeGaInSe₄ в интервале частот $5 \cdot 10^4 - 10^6$ Гц с увеличением частоты электропроводность растет по закону

$$\sigma \propto f^s \quad (0.1 \leq s \leq 1.0). \quad (1)$$

При температуре 294 К в интервале частот $5 \cdot 10^4 - 10^6$ Гц показатель степени равен 0.15–0.91,

Результаты элементного анализа кристаллов FeGaInSe₄

Элемент	Массовая концентрация, %	Атомная концентрация, %
Fe	9.27	13.21
Ga	12.91	14.74
Se	57.47	57.94
In	20.35	14.11
Итого	100.00	100.00

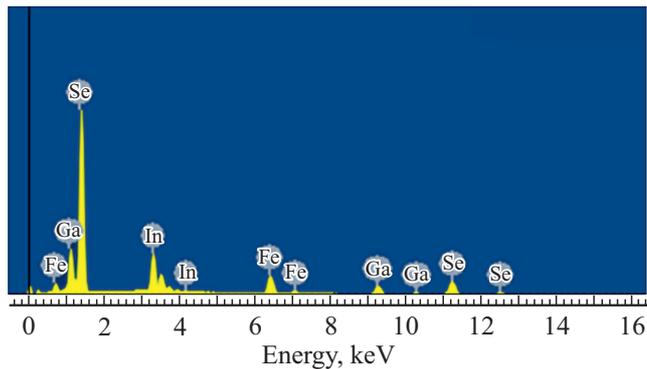


Рис. 1. Рентгеновский спектр флуоресценции кристалла FeGaInSe₄.

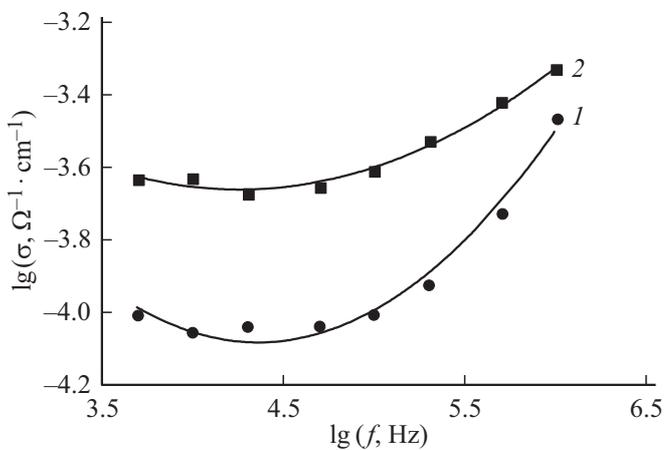


Рис. 2. Зависимости электропроводности от частоты измерений при температурах T , К: 1 — 294, 2 — 333.

а при температуре 333 К при тех же частотах изменяется в диапазоне 0.11–0.53. Видно, что при более низкой температуре значение s в исследуемом частотном диапазоне изменяется больше. В кристаллах FeGaInSe₄ механизм зависимости роста электропроводности от частоты можно объяснить следующим образом: известно, что, если в кристаллах и аморфных полупроводниках зависимость изменения электропроводности от частоты $\omega = 2\pi f$ будет подчиняться закономерности $\sigma(\omega) \propto \omega^s$ ($0.1 \leq s \leq 1.0$), то можно предположить существование прыжкового механизма проводимости [14]. На основе дебаевского анализа частотной зависимости проводимости в [14] теоретически исследованы частотная и температурная зависимости проводимости и получены следующие выражения:

$$\sigma(\omega)_T \propto \omega \left\{ \ln \left(\frac{\nu_f}{\omega} \right) \right\}^4 \propto \omega^s, \quad s \leq 1, \quad (2)$$

$$\sigma(T)_\omega \propto T^{-1} \exp \left(\frac{T}{T_0} \right), \quad (3)$$

где ν_f — частота фонона, T_0 — характеристическая температура. Согласно (3), при вышеизложенном меха-

низме проводимости при температурах $T > T_0$ температурная зависимость электропроводности в координатах $\ln(\sigma T) - T$ должна давать прямую линию. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость $\ln(\sigma T) - T$ при 10^6 Гц. Видно, что зависимость линейная, чему соответствует прыжковый механизм проводимости. Отметим, что соединение типа AB_2X_4 обладает некоторыми свойствами (например эффект переключения, токовая неустойчивость и т.д.), характерными для аморфных веществ [15,16], а также установлено, что эти кристаллы являются компенсированными полупроводниками [17,18]. В целом такого рода вещества можно рассматривать как разупорядоченные системы, поэтому для кристалла FeGaInSe₄ предположение о прыжковом механизме проводимости естественно. В соединениях типа AB_2X_4 природа локальных уровней может быть такой: образование антиструктурных дефектов на основе взаимозамещения катионов (A_B и B_A); нарушение периодического расположения стехиометрических пустот; нарушение дальнего порядка; наличие неконтролируемых примесей. Вероятность образования антиструктурных дефектов на основе взаимозамещения катионов в соединениях FeGaInSe₄ мала, потому что ионные радиусы Fe и Ga(In) существенно отличаются друг от друга (Fe — 0.80 Å, Ga — 0.62 Å, In — 0.92 Å). Нам кажется, что дефекты в FeGaInSe₄ возникают из-за нарушения периодического расположения стехиометрических пустот. В некоторых работах проблемы прыжковой проводимости в разупорядоченных системах рассматриваются с точки зрения кластерного приближения [19,20]. В кристаллах FeGaInSe₄ изменение электропроводности в зависимости от частоты можно объяснить при помощи мультиплетной модели [21], так как в кристаллах существуют кластеры, содержащие локализованные состояния с близкой энергией и перескок электронов осуществляется между ними. С повышением частоты сначала одни, а затем другие заряженные частицы не успевают за время четверти периода приложенного напряжения достигнуть мест локализации и, непрерывно

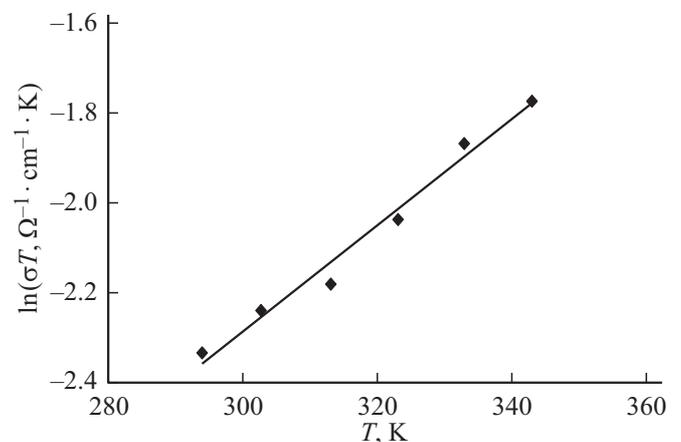


Рис. 3. Температурная зависимость $\ln(\sigma T)$ для кристаллов FeGaInSe₄ при 10^6 Гц.

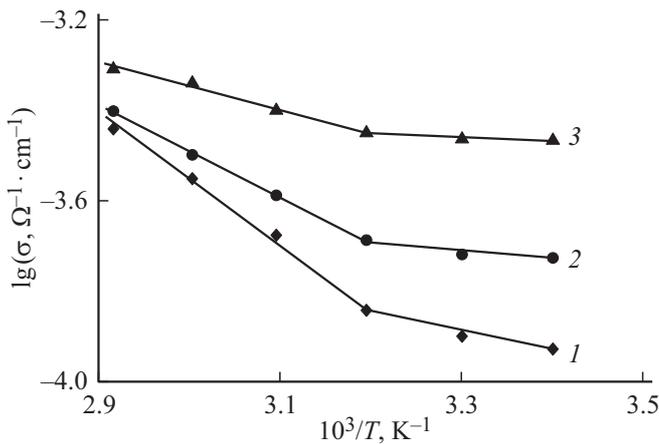


Рис. 4. Температурные зависимости электропроводности для кристаллов FeGaInSe₄ на переменном токе при значениях частоты f , Гц: 1 — $2 \cdot 10^5$, 2 — $5 \cdot 10^5$, 3 — 10^6 .

следуя за изменением электрического поля, дают вклад уже в проводимость.

На рис. 4 приведены температурные зависимости электропроводности кристаллов FeGaInSe₄ на переменном токе при различных значениях частоты. В исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом, при этом проводимость описывается соотношением [14]

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT), \quad (4)$$

где ΔE — энергия активации, k — постоянная Больцмана. Видно, что в интервале частот $5 \cdot 10^4 - 10^6$ Гц зависимость $\lg \sigma = f(10^3/T)$ состоит из двух прямых с различными наклонами. По наклонам этих зависимостей определены энергии активации, значения которых в низкотемпературной области изменяются в интервале 0.083–0.016 эВ, а в высокотемпературной — это интервал 0.29–0.10 эВ. Отсюда следует, что величина энергии активации есть функция частоты. Зависимость энергии активации от частоты можно объяснить с помощью прыжкового механизма [14]. Также, согласно (4), видно, что в кристаллах FeGaInSe₄ температурная зависимость электропроводности имеет активационный характер и, значит, в соединении FeGaInSe₄ проводимость определяется зонно-прыжковыми механизмами.

3. Заключение

Приведены результаты исследования частотных и температурных зависимостей электропроводности кристаллов FeGaInSe₄ на переменном электрическом токе. Установлено, что при исследуемых температурах в интервале частот $5 \cdot 10^4 - 10^6$ Гц для электропроводности выполняется закономерность $\sigma \propto f^s$ ($0.1 \leq s \leq 1.0$). Из температурных зависимостей $\lg \sigma$ определены энергии активации. В кристалле FeGaInSe₄ изменение электропроводности в зависимости от частоты можно объяснить

при помощи мультиплетной модели, так как в кристаллах существуют кластеры, содержащие локализованные состояния с близкой энергией и перескок электронов осуществляется между ними. В кристаллах FeGaInSe₄ проводимость характеризуется зонно-прыжковым механизмом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Hwang, J. Choi, Y. Ha, S. Cho, H. Park. *Curr. Appl. Phys.*, **20**, 212 (2020).
- [2] B.R. Myoung, J.T. Lim, C.S. Kim. *J. Magn. Magn. Mater.*, **438**, 121 (2017).
- [3] K. Takubo, T. Mizokawa, Y. Nambu, S. Nakatsuji. *Phys. Rev. B*, **79**, 134422 (2009).
- [4] S. Lei, K. Tang, Z. Fang, Y. Qi, H. Zheng. *Mater. Res. Bull.*, **41**, 2325 (2006).
- [5] T. Torres, V. Sagredo, L.M. de Chalbaund, G. Attolini, F. Bolzoni. *Phys. Condens. Matter*, **384**, 100 (2006).
- [6] C. Xiangying, Z. Zhongjie, Z. Xingfa, L. Jianwei, Q. Yitai. *J. Cryst. Growth*, **277**, 524 (2005).
- [7] И.В. Боднар, С.А. Павлюковец, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. *ФТП*, **43**, 1553 (2009).
- [8] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. *ФТП*, **43**, 1549 (2009).
- [9] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Д.В. Ложкин. *ФТП*, **45**, 941 (2011).
- [10] З.Д. Ковалюк, В.Н. Катеринчук, В.В. Нетяга, А.В. Заслонкин. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **5**, 43 (2007).
- [11] H. Kim, A.P. Tiwari, E. Hwang, Y. Cho, H. Hwang, S. Bak, Y. Hong, H. Lee. *Adv. Sci.*, **5** (7), 1800068 (2018). www.advancedsciencenews.com
- [12] Ф.М. Мамедов, С.З. Имамалиева, И.Р. Амирасланов, М.Б. Бабанлы. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **20**, 604 (2018).
- [13] F.M. Mammadov, I.R. Amiraslanov, S.Z. Imamaliyeva, M.B. Babanly. *J. Phase Equilib. Diffus.*, **20**, 787 (2019).
- [14] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, (1982) т. 1.
- [15] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, М.А. Алиджанов, М.Б. Мурадов. *Украин. физ. журн.*, **47**, 1054 (2002).
- [16] Н.Н. Нифтиев, М.А. Алиджанов, О.Б. Тагиев, М.Б. Мурадов. *ФТП*, **38**, 550 (2004).
- [17] Н.Н. Нифтиев. *ФТП*, **38**, 166 (2004).
- [18] Н.Н. Нифтиев. *ФТП*, **38**, 522 (2004).
- [19] N. Bettger, V. Bruksin. *Phys. Status Solidi B*, **113**, 9 (1982).
- [20] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронная свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [21] В.В. Брыксин. *ФТП*, **22**, 2441 (1980).

Редактор Л.В. Шаронова

Electrical AC conductivity of FeGaInSe₄

N.N. Niftiyev¹, F.M. Mammadov², M.B. Muradov³

¹ Azerbaijan State Pedagogical University,
Az-1000 Baku, Azerbaijan

² Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry
named after academician M. Nagiyev,
Azerbaijan National Academy of Sciences,
Az-1143 Baku, Azerbaijan

³ Baku State University,
Az-1148 Baku, Azerbaijan

Abstract The results of studying frequency and temperature dependences of AC electrical conductivity in FeGaInSe₄ crystals are presented. It was found in the frequency interval $f = 5 \cdot 10^4 - 10^6$ Hz, the regularity $\sigma \propto f^s$ ($0.1 \leq s \leq 1.0$) holds for electrical conductivity. From the temperature dependences the activation energies were determined. It is shown that in the FeGaInSe₄ crystal, the frequency dependence of electrical conductivity can be explained using the multiplet model, which means that the conductivity in these crystals is characterized by a band-hop mechanism.