

## Электрические свойства слоистых монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на переменном токе

© Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев\*, М.Б. Мурадов<sup>†,¶</sup>, Ф.М. Мамедов

Азербайджанский государственный педагогический университет,  
AZ-1000 Баку, Азербайджан

\* Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,  
AZ-1143 Баку, Азербайджан

<sup>†</sup> Бакинский государственный университет,  
AZ-1148 Баку, Азербайджан

(Получена 24 февраля 2009 г. Принята к печати 31 марта 2009 г.)

Приводятся результаты исследования частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и проводимости монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на переменном электрическом токе. Определены диэлектрические проницаемости монокристаллов и энергии активации диэлектрической проницаемости и проводимости. Установлено, что в исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом. Наблюдается частотная зависимость энергии активации, которая связана с уменьшением времени релаксации запирающих слоев при увеличении частоты.

PACS: 72.30.+q, 72.80.Jc

В последние годы значительное внимание уделяется изучению тройных соединений типа AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub> (A — Mn, Fe, Co, Ni; B — Ga, In; X — S, Se, Te) [1–11]. Эти соединения перспективны для создания на их основе лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем. В работах [5,6] при соотношении 1:1 шпинельной структуры FeIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (пространственная группа *Fd3m*) и ромбической структуры FeGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (пространственная группа *Pna2<sub>1</sub>*) получены новые слоистые полупроводники состава FeGaInS<sub>4</sub> и исследованы их электрические свойства в статическом поле. Определены коэффициенты термоэдс, концентрация и холловская подвижность носителей тока, найдены положения уровней дефектов и механизм прохождения тока в сильном электрическом поле. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований электрических свойств слоистых монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на переменном токе.

Монокристаллы FeGaInS<sub>4</sub> были получены методом Бриджмена. Рентгенографическим методом установлено, что монокристаллы кристаллизуются в структуре однопакетного политапа ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> [12] с параметрами кристаллической решетки  $a = 3.81$ ,  $c = 12.17 \text{ \AA}$ ,  $z = 1$ , пространственная группа *P3m1*. Для измерения электрических характеристик из пластинок монокристаллов толщиной  $\sim 0.1$  мм нанесением серебряной пасты были изготовлены конденсаторы. Измерения емкости и сопротивления проводились с помощью цифровых измерителей иммитанса E7-20 (на частотах 25–10<sup>6</sup> Гц). На образец подавалось измерительное напряжение 1 В.

На рис. 1 приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub>. Видно, что при исследуемых частотах на зави-

симости  $\lg \epsilon$  от  $1/T$  выявляется один линейный участок и с ростом температуры наблюдается возрастание  $\epsilon$ . Из зависимости  $\lg \epsilon \propto 10^3/T$  определяется энергия активации, которая равна  $\Delta E^\epsilon = 0.21$  эВ.

На рис. 2 приведены температурные зависимости электропроводности монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на переменном токе. В исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом, при этом проводимость описывается соотношением [13]

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

где  $\Delta E^\sigma$  — энергия активации,  $k$  — постоянная Больцмана. При исследуемых частотах зависимость  $\lg \sigma \propto 10^3/T$  дает прямые с различными наклонами. По наклонам этих зависимостей определены энергии активации ( $\Delta E^\sigma$ ) носителей тока. При частотах 10<sup>4</sup>–10<sup>6</sup> Гц значение  $\Delta E^\sigma$

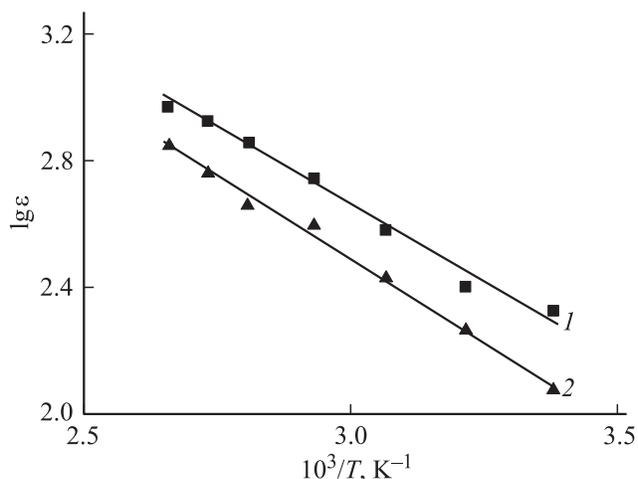
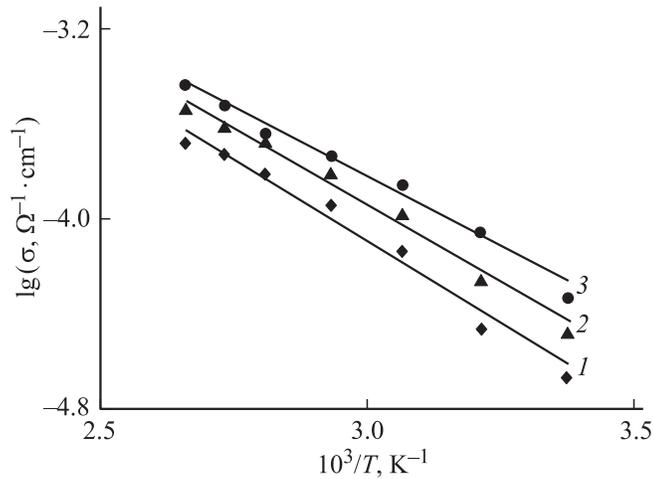


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на частотах  $f$ , Гц: 1 — 10<sup>5</sup>, 2 — 10<sup>6</sup>.

<sup>¶</sup> E-mail: MBMuradov@gmail.com



**Рис. 2.** Температурные зависимости электропроводности монокристаллов  $\text{FeGaInS}_4$  на переменном электрическом токе при различных значениях частоты  $f$ , Гц: 1 —  $10^4$ , 2 —  $5 \cdot 10^5$ , 3 —  $10^6$ .

изменяется в интервале 0.27–0.23 эВ. Здесь величина энергии активации зависит от частоты. Такую зависимость можно объяснить с помощью барьерной модели, так как в дефектных кристаллах, кроме высокоомных прослоек с зернами локальных барьеров, могут быть запирающие низкоомные слои, локализованные на различных неоднородностях типа дислокаций, электрических доменов и т.д. Релаксационные явления в барьерном слое состоят, в частности, в процессе перезарядки медленных поверхностных состояний, т.е. перезарядки „обкладок“ барьерного слоя [14]. В этих запирающих слоях время релаксации энергии ( $\tau$ ) может различно зависеть от частоты. Если эта зависимость сильная, тогда энергия активации проводимости зависит от частоты. Определив время релаксации по закону Аррениуса [15]:

$$\tau = \frac{1}{2f} \exp(\Delta E/kT),$$

мы видим, что с ростом частоты  $10^4$ – $10^6$  Гц время релаксации уменьшается в интервале  $\sim 1$ – $10^{-4}$  с, и получается, что  $\Delta E$  и  $f$  зависят от времени релаксации. Тогда в нашем случае величина энергии активации есть функция частоты. В исследуемой температурной области значения  $\sigma$  и энергии активации диэлектрической проницаемости ( $\Delta E^\epsilon$ ) и проводимости ( $\Delta E^\sigma$ ) почти совпадают с теми значениями, которые найдены при исследовании статических электрических свойств монокристаллов  $\text{FeGaInS}_4$  [5].

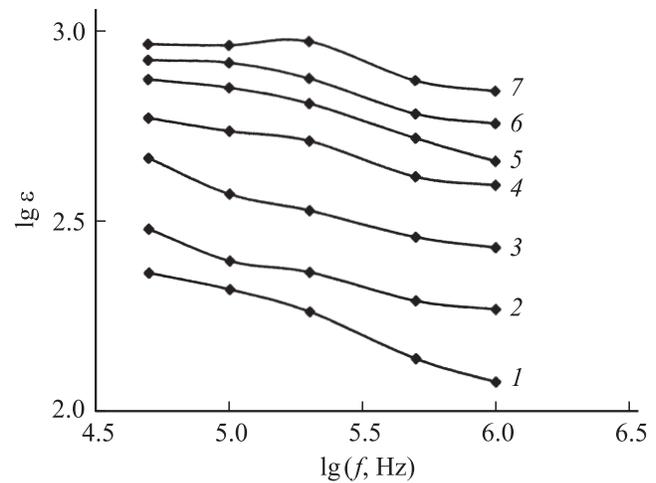
На рис. 3 приведены зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от частоты  $f$  для монокристаллов  $\text{FeGaInS}_4$  при различных температурах. Установлено, что в температурном интервале 296–376 К на частотах  $10^4$ – $10^6$  Гц значение  $\epsilon$  изменяется в пределах 200–1000. Из рисунка видно, что при температурах 296–341 К диэлектрические проницаемости с ростом

частоты уменьшаются, а при высоких температурах (356–376 К) с повышением частоты вначале  $\epsilon$  остается постоянной, затем медленно уменьшается. Известно, что в диэлектриках и полупроводниках с повышенной проводимостью и параллельной схемой замещения величина  $\epsilon$  характеризуется формулой [15]

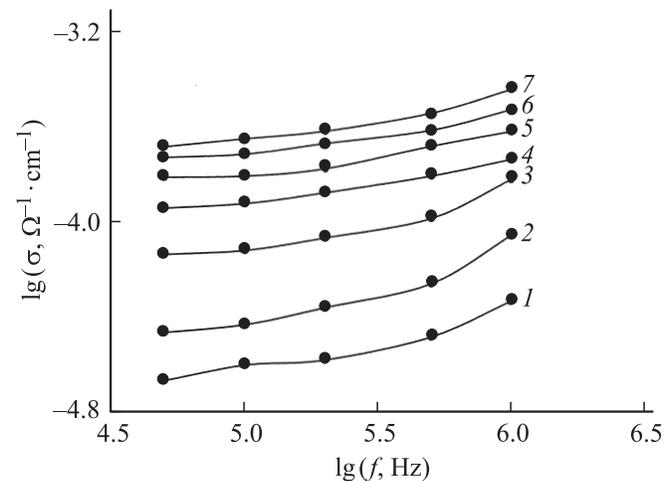
$$\epsilon = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega \operatorname{tg} \delta},$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  — частота,  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь.

В полупроводниках электропроводность увеличивается в основном за счет увеличения концентрации носителей тока с ростом температуры. Поскольку  $\epsilon$  пропорционально  $\sigma$ , а  $\operatorname{tg} \delta$  с температурой изменяется слабее, постольку с ростом  $\sigma$  растет и  $\epsilon$ .



**Рис. 3.** Зависимости диэлектрической проницаемости  $\text{FeGaInS}_4$  от частоты измерений при различных температурах  $T$ , К: 1 — 296, 2 — 311, 3 — 326, 4 — 341, 5 — 356, 6 — 366, 7 — 376.



**Рис. 4.** Зависимости электропроводности  $\text{FeGaInS}_4$  от частоты измерений при различных температурах  $T$ , К: 1 — 296, 2 — 311, 3 — 326, 4 — 341, 5 — 356, 6 — 366, 7 — 376.

На рис. 4 приведены зависимости проводимости от частоты для монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub>. Видно, что при исследуемых температурах вначале с ростом частоты электропроводность увеличивается, далее в интервале частот  $2 \cdot 10^5 - 10^6$  Гц электропроводность растет более быстро. С повышением частоты увеличение электропроводности объясняется в работах [11,15].

Следует отметить, что полученные в этой статье результаты похожи на результаты нашей работы [11]. Оба соединения FeGaInS<sub>4</sub> и FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> относятся к магнитным полупроводникам типа AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub> и являются слоистыми монокристаллами. Значения электропроводности этих материалов в статическом электрическом поле имеют малое различие [3,5]. В исследуемой температурной области значения  $\varepsilon$ , а при высоких частотах ( $10^5 - 10^6$  Гц) и формы кривых для зависимостей  $\varepsilon \propto 10^3/T$ , у обоих монокристаллов различаются. Частотная зависимость энергии активации для FeGaInS<sub>4</sub> сильнее, чем для FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> [11].

Таким образом, исследованы температурные и частотные зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости слоистых монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> на переменном электрическом токе. Определены диэлектрические проницаемости монокристаллов и энергии активации диэлектрической проницаемости и проводимости. В исследуемой области электропроводность обусловлена активационным механизмом проводимости. Дано объяснение энергии активации в зависимости от частоты.

## Список литературы

- [1] Р.Н. Бекимбетов, Ю.В. Рудь, М.А. Таиров. ФТП, **21**, 1051 (1987).
- [2] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, Г.М. Нифтиев. Неорг. матер., **32**, 291 (1996).
- [3] Н.Н. Нифтиев, М.А. Алиджнаов, О.Б. Тагиев, М.Б. Мурадов. ФТП, **37**, 173 (2003).
- [4] A. Memo, W. Kwarteng-Acheampong, H. Heauseler. Mater. Res. Bull., **38**, 1057 (2003).
- [5] Н.Н. Нифтиев. ФТП, **38**, 522 (2004).
- [6] N.N. Niftiev, O.B. Tagiyev, F.M. Mamedov. Fizika, **11**, 54 (2005).
- [7] T. Torres, V. Sagredo, L.M. de Chalbaund, G. Attolini, F. Bolzoni. Phys. Condens. Matter, **384**, 100 (2006).
- [8] F.J. Manjon, A. Segura, M. Amboage, J. Pellicer, J.F. Sancer-Royo et al. Phys. Status Solidi B, **244**, 229 (2006).
- [9] V. Sagredo, M.C. Moron, L. Betancourt, G.E. Delgado. J. Magn. Mater., **312**, 294 (2007).
- [10] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев. ФТП, **41**, 17 (2007).
- [11] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, М.Б. Мурадов. ФТП, **42**, 268 (2008).
- [12] C. Batistony, L. Gastaldi, G. Mattogno et al. Sol. St. Commun., **61**, 43 (1987).
- [13] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982) т. 1.
- [14] П.Г. Орешкин. *Физика полупроводников и диэлектриков* (М., Высш. шк., 1977).
- [15] Ю.М. Поплавко. *Физика диэлектриков* (Высш. шк., 1980).

Редактор Т.А. Полянская

## Electrical properties of the laminated FeGaInS<sub>4</sub> single-crystal at alternating current

N.N. Niftiev, O.B. Tagiev\*, M.B. Muradov<sup>+</sup>, F.M. Mamedov

Azerbaijan State Pedagogical University,  
AZ-1000 Baku, Azerbaijan

\* Institute of Physics,  
National Academy of Sciences of Azerbaijan,  
AZ-1143 Baku, Azerbaijan

<sup>+</sup> Baku State University,  
AZ-1148 Baku, Azerbaijan