

## Электрические свойства $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ на переменном токе

© Н.Н. Нифтиев,<sup>1</sup> О.Б. Тагиев,<sup>2</sup> М.Б. Мурадов,<sup>3</sup> Ф.М. Мамедов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный педагогический университет,  
Az-1000, Баку, Азербайджан  
e-mail: namiq7@bk.ru

<sup>2</sup> Институт физики НАН Азербайджана,  
Az-1143, Баку, Азербайджан

<sup>3</sup> Бакинский государственный университет,  
Az-1148, Баку, Азербайджан

<sup>4</sup> Институт проблемы химии НАН Азербайджана,  
Az-1143, Баку, Азербайджан

(Поступило в Редакцию 18 августа 2011 г.)

Приведены результаты исследования частотных и температурных зависимостей емкости и сопротивления полупроводников  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе. При определенных температурах в интервале частот  $2.5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$  Hz наблюдаются резонансные явления. Определены диэлектрические проницаемости кристаллов и энергии активации носителей тока. 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.

$\text{FeIn}_2\text{S}_4$  относится к классу тройных соединений типа  $\text{AB}_2\text{X}_4$  (где А — Mn, Fe, Co, Ni; В — Ga, In; X — S, Se, Te), ряд из которых получен и в настоящее время интенсивно изучается [1–16]. Эти соединения перспективны для создания на их основе лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и других функциональных устройств, управляемых магнитным полем.

Физические свойства  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  изучались в нескольких работах [1–4,8–12]. В [1,4] исследованы структурные и магнитные свойства  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ . Установлено, что ниже температуры Нееля  $T_N = 4.2$  K эти кристаллы являются антиферромагнитными. В работе [8] исследованы электрические свойства  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  в статическом поле. Выявлен эффект переключения. Работы [9,10] посвящены получению и изучению электрохимических свойств нанокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$ . На основе  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  созданы фоточувствительные структуры [11,12]. Однако электрические свойства этих кристаллов на переменном токе не исследованы. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований электрических свойств  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе.

Поликристаллы  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  получены прямым сплавлением элементов высокой чистоты (99.99%) в стехиометрических количествах. Рентгенографическим методом установлено, что поликристаллы обладают шпинельной структурой с параметром кристаллической решетки  $a = 10.62$  Å [1,3]. Для измерения электрических свойств из слитка кристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  изготавливались пластинки толщиной  $\sim 0.5$  mm, на которые наносились обкладки из серебряной пасты. Конденсаторы помещались в криостат, регулируемый в интервале температур от 293 до 400 K. Точность измерения температуры составляла  $\pm 0.5$  K. Измерения емкости и сопротивления проводились с помощью цифровых измерителей импедан-

са Е7-20 (частоты  $25 - 10^6$  Hz). На образец подавалось измерительное напряжение 1 V.

На рис. 1 приведены зависимости емкости ( $C$ ) конденсатора с полупроводником  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  от частоты ( $f$ ) при различных температурах. Из формулы

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d$$

Рассчитана диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) и установлено, что в температурном интервале 293–373 K на частотах  $5 \cdot 10^3 - 10^6$  Hz значение  $\epsilon$  изменяется в пределах 300–2800. Из рисунка видно, что вначале емкость при температурах 293–323 K в области частот  $5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$  Hz медленно уменьшается, далее в интервале частот  $2.5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$  Hz происходит резонансное явление. А потом с повышением температуры резонансное явление исчезает. Резонансное явление можно объяснить с помощью барьерной модели [17], так как в дефектных кристаллах кроме высокоомных прослоек с зёрнами локальных барьеров могут быть запирающие низкоомные слои, локализованные на различ-

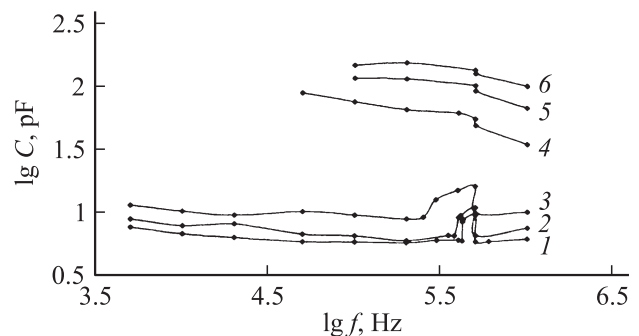
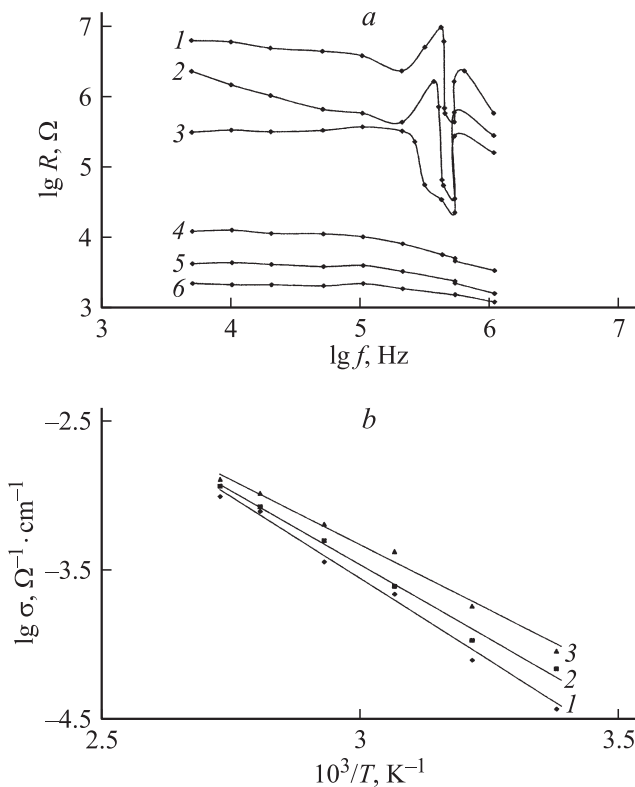


Рис. 1. Зависимости емкости от частоты измерений при различных температурах  $T$ , K: 1 — 293, 2 — 308, 3 — 323, 4 — 348, 5 — 363, 6 — 373.



**Рис. 2.** *a* — зависимости сопротивления от частоты измерений при различных температурах  $T$ , К: 1 — 293, 2 — 308, 3 — 323, 4 — 348, 5 — 363, 6 — 373; *b* — температурные зависимости электропроводности кристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе при различных значениях частоты  $f$ , Гц: 1 —  $5 \cdot 10^4$ , 2 —  $2 \cdot 10^5$ , 3 —  $10^6$ .

ных неоднородностях типа дислокаций, электрических доменов и т.д. Запирающие слои являются активными элементами, ибо их толщина и степень обеднения зависят от напряженности и частоты электрического поля. Частота  $\nu$  ( $\nu$  — частота колебаний носителей заряда в волне концентрации) определяется толщиной слоя  $d$  и дрейфовой скоростью [7]:

$$2d = v_{dr}/\nu.$$

В этом случае частота  $f$  в переменном внешнем электрическом поле близка к величине  $\nu$  и наблюдается явление резонанса. Исчезание резонансного явления можно объяснить так: с ростом температуры частота  $\nu$  повышается и отличается от внешней частоты  $f$  и резонансное явление не происходит.

На рис. 2, *a* показана зависимость сопротивления от частоты при различных температурах. Видно, что в интервале частот  $2.5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$  Гц и при температурах 293–323 К наблюдаются резонансные пики. С увеличением температуры эти пики исчезают. Это явление мы уже объяснили выше.

На рис. 2, *b* приведены температурные зависимости электропроводности кристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе при значениях частоты  $5 \cdot 10^4$  Гц (кривая 1),

$2 \cdot 10^5$  Гц (кривая 2),  $10^6$  Гц (кривая 3). В исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом, при этом проводимость определяется по формуле [18]

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

где  $\Delta E$  — энергия активации,  $k$  — постоянная Больцмана. При исследуемых частотах зависимость  $\lg \sigma \sim 10^3/T$  дает прямые с различными наклонами. По наклонам этих зависимостей определены энергии активации ( $\Delta E$ ). При частотах  $5 \cdot 10^4 - 10^6$  Гц значение  $\Delta E$  изменяется в интервале 0.44–0.35 эВ. Здесь величина энергии активации зависит от частоты. Такую зависимость можно объяснить тем, что в кристаллах при существующих запирающих слоях время релаксации ( $\tau$ ) может различно зависеть от частоты [17]. Если эта зависимость сильная, тогда энергия активации проводимости зависит от частоты. Определив время релаксации по закону Аррениуса [19]

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

мы видим, что с ростом частоты  $5 \cdot 10^4 - 10^6$  Гц время релаксации уменьшается в интервале  $10^2 - 10^{-2}$  с и получается, что  $\Delta E$  и  $f$  зависят от времени релаксации. Тогда величина энергии активации есть функция частоты.

Таким образом, исследованы частотные и температурные зависимости электрических емкости и сопротивления кристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе. При температурах 293–323 К в интервале частот  $2.5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$  Гц происходит резонансное явление сопротивления и емкости. Установлено, что в исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом. Определены диэлектрическая проницаемость кристаллов и энергия активации носителей тока. Установлено, что частотная зависимость энергии активации связана с уменьшением времени релаксации запирающих слоев при увеличении частоты.

## Список литературы

- [1] Kanomata T., Ido H., Kaneko T. // J. Phys. Soc. Japan. 1973. Vol. 34. N 2. P. 554.
- [2] Бабаева Б.К. Тройные полупроводники и их применение. Кишинев: Штиинца, 1976. С. 96.
- [3] Рустамов П.Г., Бабаева Б.К., Аллазов М.Р. // Журн. неорган. химии. 1979. Т. 24. № 8. С. 2208.
- [4] Schlein S., Aoran W. // J. of Sol. Stat. Chem. 1972. Vol. 4. N 2. P. 286.
- [5] Бекимбетов Р.Н., Рудь Ю.В., Тауров М.А. // ФТП. 1987. Т. 21. Вып. 6. С. 1051.
- [6] Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б., Нифтиев Г.М. // Неорган. матер. 1996. Т. 32. № 3. С. 291.
- [7] Бекимбетов Р.Н. // Неорган. матер. 2002. Т. 38. № 8. С. 953.

- [8] *Нифтиев Н.Н., Алиджанов М.А., Тагиев О.Б., Мурадов М.Б.* // Укр. физ. журн. 2002. Т. 47. № 11. С. 1054.
- [9] *Lu Q., Hu J., Tang K., Qian Y., Zhou G., Liu X.* // J. Chem. Lett. 1999. Vol. 6. P. 481.
- [10] *Xiangying C., Zhongjie Z., Jianwei L., Yitai Q.* // J. of Cryst. Growth. 2005. Vol. 277. P. 524.
- [11] *Боднарь И.В., Павлюковец С.А., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В.* // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 11. С. 1553.
- [12] *Боднарь И.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Теруков Е.И.* // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 1. С. 39.
- [13] *Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 19. С. 72.
- [14] *Torres T., Sagredo V., De Chalbaud L.M., Atolini G., Bolzoni F.* // Physica B: Condens. Matter. 2006. Vol. 384. N 1–2. P. 100.
- [15] *Sagredo V., Moron M.C., Betacourt L., Delgado G.E.* // J. of Magn. Mater. 2007. Vol. 312. N 2. P. 294.
- [16] *Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б.* // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 1. С. 17.
- [17] *Орешкин П.Г.* // Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. С. 448.
- [18] *Мотт Н., Дэвис Э.* Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1. С. 368.
- [19] *Поплавко Ю.М.* Физика диэлектриков. М.: Высшая школа, 1980. С. 400.