

**FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> KRİSTALININ DİELEKTRİK NÜFUZLUĞUNUN DƏYİŞƏN ELEKTRİK CƏRƏYANININ TEZLİYİNDƏN VƏ TEMPERATURDAN ASILILIĞI****N.N. NİFTİYEV<sup>1</sup>, F.M. MƏMMƏDOV<sup>1,2</sup>, M.B. MURADOV<sup>3</sup>***Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti<sup>1</sup>**Az-1000, Bakı, Ü. Hacıbəyov, 68**AMEA Kataliz və Qeyri – üzvi Kimya İnstitutu<sup>2</sup>**Az-1143, Bakı, H. Cavid pr., 29**Bakı Dövlət Universiteti<sup>3</sup>**Az-1148, Bakı, Z. Xəlilov küç., 23**namiq7@bk.ru*

FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalının müxtəlif temperatur və tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissəsi tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, temperatur yüksəldikcə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin artması defektlərin konsentrasiyasının artması ilə bağlıdır. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz tezlik oblastında anomal dispersiya baş verir və yaşama müddətinə görə defektlərin paylanması  $n(\tau) \sim \tau^{-1,75}$  qanununa tabe olur. Tədqiq olunan temperaturalarda dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin tezlikdən asılı olaraq monoton azalmasının səbəbi FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında relaksasiya dispersiyasının baş verməsidir.

**Açar sözlər:** kristal, dielektrik nüfuzluğu, temperatur, cərəyan, tezlik, relaksasiya, dispersiya.

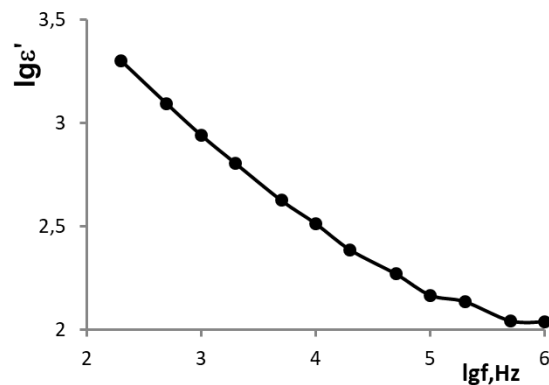
PACS: 73.40.Sx, 73.61.Le, 84.37.+q

Yarım maqnit yarımkeçirici birləşmələr, yarımkeçirici cihazlarda, xüsusən də spintronikada istifadə üçün böyük maraq doğurur. Bununla əlaqədar olaraq, maqnit yarımkeçirici materialların axtarışında aktivliyin artmasını qeyd etmək olar. Hal – hazırda AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub> tipli (A=Mn, Fe, Ni; B=Ga, In; və X=S, Se, Te) maqnit yarımkeçiricilərin alınması və fiziki xassələrinin öyrənilməsinə çox diqqət yetirilir [1-7]. Bu birləşmələrin əsasında lazerlər, işıq modulyatorları, fotodetektorlar, termorezistorlar, düzləndiricilər və s. funksional qurğular yaratmaq perspektivlidir. Bu materiallar əsasında fotohəssas strukturlar hazırlanmışdır [10-13]. FeIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> birləşməsindən nanokristal sintez edilmişdir [4]. FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> monokristalından istifadə edərək heteroqəçid yaradılmışdır [14]. Hal-hazırkı işdə qeyd edilən birləşmələr sinfinə aid FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun dəyişən elektrik cərəyanının tezliyindən və temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalını stexiometrik miqdarda yüksək təmizlikli elementlərdən (99,99) alınmışdır. Rentqenoqrafik metodla analiz nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristal qəfəs parametrləri  $a = 3,983$  Å və  $c = 38,811$  Å olan triqonal sinqoniyaya (fəza qrupu  $3ml$ ) kristallaşır [18]. Elektrik tutumunu ölçmək üçün qalınlığı  $\sim 1,5$ mm olan FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristal lövhələrə gümüş pastası vuraraq kondensatorlar hazırlanmış və ölçümlər E7-20 ( $25 \div 10^6$ Hz) rəqəmli immetans ölçü cihazından istifadə etməklə aparılmışdır. Kristallar 293 ÷ 400K temperatur intervalında tənzimləyə bilən kriostatda yerləşdirilmişdir. Temperatur ölçmələrinin dəqiqliyi  $\pm 0,5$ K təşkil edir. Nümunəyə 1V gərginlik verilmişdir.

Dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi  $\epsilon' = Cd/\epsilon_0 S$ , xəyali hissəsi isə  $\epsilon'' = tg\delta \cdot \epsilon'$  ifadələrindən hesablanmışdır.

Şəkil 1-də FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalı üçün 294,5 K temperaturda dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin

( $\epsilon'$ ) dəyişən elektrik cərəyanının tezliyindən ( $f$ ) asılılıq qrafiki verilmişdir.  $2 \cdot 10^2 \div 10^6$  Hz tezlik oblastında  $\epsilon'$ -in qiyməti 2000 ÷ 100 intervalında dəyişir.  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz tezliklərdə tezlik artdıqca  $\epsilon'$ -in azalması müşahidə edilir.  $2 \cdot 10^4 \div 10^6$  Hz tezlik intervalında isə  $\epsilon'$  daha yavaş sürətlə azalır.



Şəkil 1. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalı üçün 294,5 K temperaturda dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin dəyişən elektrik cərəyanının tezliyindən asılılığı.

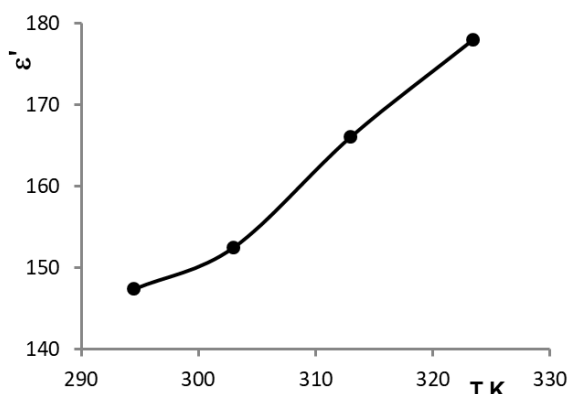
Yarımkeçiricilərdə defektlər arasında yüklərin baş verən sıçrayış mübadiləsi zamanı dielektrik nüfuzluğunun özünü necə aparmasına nəzəri olaraq [19] işində baxılmışdır. Xüsusilə defektlərində yüksək konsentrasiyaya malik olan yarımkeçiricilər üçün dielektrik nüfuzluğunun elektrik sahəsinin tezliyindən asılılığı aşağıdakı kimi ifadə olunur [19]:

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

Burada  $(\beta + 2) = -\gamma$ . Eyni zamanda defektlərin yaşama müddətinə görə paylanması

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

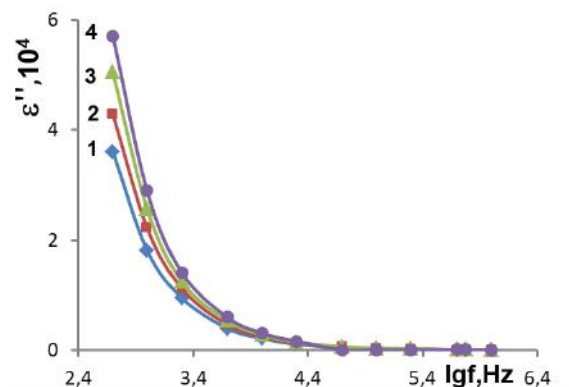
qanununa tabe olur. Buradan belə nəticəyə gəlmək olar ki, dərin mərkəzlərində yüksək konsentrasiyası olan yarımqeçiricilərdə dielektrik nüfuzluğunun dispersiyası müşahidə edilməlidir. (1) ifadəsindən görüldüyü kimi  $\beta > -2$  olduqda normal dispersiya və  $\beta < -2$  olduqda anomal dispersiya müşahidə edilməlidir ( $\beta = -2$  olduqda dispersiya baş vermir).  $\beta$  və  $\gamma$  – nin qiymətlərini  $\varepsilon'(f)$  təcrübə asılığından müəyyən etmək olar. Şəkil 1-dən görünür ki,  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz tezlik intervalında  $lg\varepsilon' \sim lgf$  asılılığı demək olar ki, düz xəttə yaxın bir meyl ilə xarakterizə olunur. Bu meyldən  $\gamma = -0,25$  qiyməti tapılmışdır. Bu halda  $\beta = -1,75$  olduğundan FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz tezlik oblastında anomal dispersiya baş verir və yaşama müddətinə görə defektlərin paylanması  $n(\tau) \sim \tau^{-1,75}$  qanununa tabe olur.



Şəkil 2. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında 10<sup>4</sup> Hz tezlikdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin temperaturdan asılılığı.

Şəkil 2-də FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında 10<sup>4</sup> Hz tezlikdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin temperaturdan asılılıq qrafiki göstərilmişdir. 294,5÷323,5 K temperatur intervalında  $\varepsilon'$  - in qiyməti 147÷180 həddində dəyişir. Temperatur yüksəldikcə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin qiymətinin artmasının səbəbi defektlərin konsentrasiyasının artmasıdır [20].

Şəkil 3-də FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalı üçün 294,5÷323,5 K temperatur intervalında dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin ( $\varepsilon''$ ) elektrik sahəsinin tezliyindən asılılıq qrafiki göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki,  $5 \cdot 10^2 \div 10^6$  Hz tezlik intervalında tezlik artıqca asılılıq monoton azalma xarakterinə malik olur və tezlik artdıqca  $\varepsilon''$  əhəmiyyətli dərəcədə dispersiyaya uğrayır. Təcrübədə müşahidə olunan dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin tezlikdən asılı olaraq monoton azalması FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında relaksasiya dispersiyasının baş verdiyini göstərir [2].



Şəkil 3. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalının müxtəlif temperaturalarda dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsinin dəyişən elektrik cərəyanının tezliyindən asılılığı. T, K: 1 - 294,5, 2 - 303, 3 - 313, 4 - 323,5.

Beləliklə, işdə FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalının müxtəlif temperatur və tezliklərdə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissəsi tədqid edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, temperatur yüksəldikcə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin artması əsasən defektlərin konsentrasiyasının artması ilə bağlıdır. FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalında  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz tezlik oblastında anomal dispersiya baş verir və yaşama müddətinə görə defektlərin paylanması  $n(\tau) \sim \tau^{-1,75}$  qanununa tabe olur. Tədqiq olunan temperaturalarda FeGa<sub>0,4</sub>In<sub>1,6</sub>Se<sub>4</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun xəyali hissəsi tezliklə tərs mütənəsb olaraq monoton azalır. Bu da kristalda relaksasiya dispersiyasının baş verdiyini göstərir.

[1] J. Gainza, O.N. Guinazu, E. Cespedes, H. Falcon, J.L. Martinez, J.A. Alonso. Tunable inversion degree of MnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> thiospinels prepared by high-pressure synthesis, and its implication in the optical and magnetic properties, Journal of Alloys and Compounds, 2023, v. 969, 172413, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172413>

[2] H.H. Нуфтиев, А.О. Даидемиров, Ф.М. Мамедов, М.Б. Мурадов. Диэлектрические свойства слоистых монокристаллов MnGaInSe<sub>4</sub> в переменном электрическом поле. Электронная обработка материалов, 2023, т. 59, в. 2, с.61 – 66. <https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.61>

[3] H.H. Нуфтиев, Ф.М. Мамедов, М.Б. Мурадов. Электропроводность монокристаллов MnGaInSe<sub>4</sub> на переменном токе. Письма в

журнал технической физики, 2020, том 46, в. 11. с.19 – 21.

[4] H. Kim, A.P. Tiwari, E. Hwang, Y. Cho, H.Hwang, S. Bak, Y. Hong, H. Lee. FeIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub> Nanocrystals: A Ternary Metal Chalcogenide Material for Ambipolar Field-Effect Transistors. Adv. Sci., 2018. <https://doi.org/10.1002/advs.201800068>

[5] B.R. Myoung, J.T. Lim, C.S. Kim. Investigation of magnetic properties on spin-ordering effects of FeGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> and FeIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, v. 438, p.121-125. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.04.056>

[6] Ф.М. Мамедов, H.H. Нуфтиев. Диэлектрические свойства слоистых монокристаллов FeGaInS<sub>4</sub> в переменном электрическом поле, ФТП, 2016, т. 50, в. 9, с.1225 - 1229.

- [7] S.V. Trukhanova, I.V. Bodnar, M.A. Zhafar. Magnetic and electrical properties of  $(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{CuIn}_5\text{S}_8)_x$  solid solutions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, v. 379, p.22-27.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.120>
- [8] C. Rincóna, T.E. Torresbde, V. Sagredo, S.J.Jiménez-Sandovalc, E. Mares-Jacintoc. The fundamental absorption edge in  $\text{MnIn}_2\text{Se}_4$  layer semi-magnetic semiconductor, *Physica B: Condensed Matter*, 2015, v. 477, p.123-128.  
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2015.08.004>
- [9] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, М.Б. Мурадов, Ф.М. Мамедов. Электрические свойства  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  на переменном токе, *Журнал технической физики*, 2012, т. 82, в. 4, с.147-149.
- [10] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. Фоточувствительные структуры на монокристаллах  $\text{MnIn}_2\text{S}_4$ : создание и свойства, *ФТП*, 2009, 43, в. 11, с.1549-1552.
- [11] И.В. Боднар, С.А. Павлюковец, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. Выращивание монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{S}_4$  и создание фоточувствительных структур на их основе, *ФТП*, 2009, т. 43, в.11, с.1553 - 1556.
- [12] И.В. Боднар, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. Выращивание монокристаллов  $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{FeIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$  и свойства фоточувствительных структур на их основе, *ФТП*, 2010, т. 44, в. 1, с.39-43.
- [13] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, М.А. Осипова, И.В. Боднар. Обнаружение твердых растворов  $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$  и создание фоточувствительных структур на их основе, *ФТП*, 2010, т. 44, в. 1, с.48-52.
- [14] З.Д. Ковалюк, В.Н. Катеринчук, В.В. Нетяга, А.В. Заслонкин. Гетеропереход на основе кристалла  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$  полученного методом Бриджмена, *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2007, т. 5, с.43 - 45.
- [15] K. Rushchanskii, H. Haeseler, D. Bercha. Band structure calculations on the layered compounds  $\text{FeGa}_2\text{S}_4$  and  $\text{NiGa}_2\text{S}_4$ , *J. of physics and chemistry of solids*, 2008, v. 63, p.2019- 2028.
- [16] M. Quintero, M. Morocoima, E. Guerrero, J.Ruiz. Temperature variation of lattice parameters and thermal expansion coefficients of the compound  $\text{MnGa}_2\text{Se}_4$ , *Physica status solidi (a)*, 2006, v. 146, p.587-593.
- [17] R. Sharma, A. Rastogi, S. Kohli and et al. Growth phasses in the formation of semiconducting manganese indium sulphide thin film and their effect on the optical absorption, *Physica B*, 2004, v. 351, p.45-52.
- [18] Ф.М. Мамедов, С.З. Имамалиева, И.Р. Амирасланов, М.Б. Бабанлы. Фазовая диаграмма системы  $\text{FeGa}_2\text{Se}_4\text{-FeIn}_2\text{Se}_4$  и кристаллическая структура  $\text{FeGaInSe}_4$ , *Конденсированные среды межфазные границы*, 2018, № 20, с.604-610.
- [19] П.В. Жуковский, Я. Партыка, П. Венгерэк, Ю.Шостак, Ю. Сидоренко, А. Родзик. Диэлектрические свойства соединений  $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}$ , 2000, *ФТП*, т. 34, в. 10, с.1174 -1177.
- [20] Н.Н. Нифтиев, О.Б. Тагиев, М.Б. Мурадов. Электрические свойства слоистых монокристаллов  $\text{FeIn}_2\text{Se}_4$  на переменном токе. *ФТП*, 2008, т. 42, в. 3, с.268-270.

**N.N. Niftiyev, F.M. Mammadov, M.B. Muradov**

**DEPENDENCE OF DIELEKTRIK CONSTANT OF CRISTALS  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  ON FREQUENCY OF ALTERNATING ELECTRIC CURRENTS AND TEMPERATURE**

The real and imaginary parts of the dielectric constant of the  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  crystal at different temperatures and frequencies were investigated. It was determined that the increase in the real part of the dielectric permeability as the temperature increases is due to the increase in the concentration of defects. In the  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  crystal, anomalous dispersion occurs in the frequency range of  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Hz, and the distribution of defects according to the lifetime obeys the law of  $n(\tau) \sim \tau^{-1.75}$ . The reason for the monotonous decrease of the imaginary part of the dielectric constant at the studied temperatures depending on the frequency is the occurrence of relaxation dispersion in the  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  crystal.

**Н.Н. Нифтиев, Ф.М. Мамедов, М.Б. Мурадов**

**ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КРИСТАЛЛОВ  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  ОТ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Исследованы действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости кристалла  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  при различных температурах и частотах. Установлено, что увеличение реальной части диэлектрической проницаемости с ростом температуры обусловлено увеличением концентрации дефектов. В кристалле  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$  anomalous дисперсия возникает в диапазоне частот  $2 \cdot 10^2 \div 10^4$  Гц, а распределение дефектов по времени жизни подчиняется закону  $n(\tau) \sim \tau^{-1.75}$ . Причиной монотонного уменьшения мнимой части диэлектрической проницаемости при исследованных температурах в зависимости от частоты является возникновение релаксационной дисперсии в кристалле  $\text{FeGa}_{0,4}\text{In}_{1,6}\text{Se}_4$ .