

УДК 538.956;53.092

PACS 77.80.b, 62.20.Fe

DOI 10.24144/2415-8038.2018.43.21-27

О. В. Шуста¹, О. Г. Сливка¹, В. С. Шуста¹, В. А. Калитин¹,І. Петришинець²¹Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Україна
e-mail: vshusta@ukr.net²Словацька академія наук, вул. Ватсонова, 47, Кошце, 04001, Словаччина

ФАЗОВА p, T -ДІАГРАМА ШАРУВАТИХ КРИСТАЛІВ $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$

Наведено результати досліджень температурних залежностей аномалій діелектричної проникності в околі фазових переходів шаруватих кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при дії зовнішнього гідростатичного тиску. Встановлено, що дія гідростатичного тиску зменшує температурну ширину проміжкової (неспіврозмірної) фази. На фазовій p, T -діаграмі кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ можливе існування потрійної точки з координатами $p \approx 1390$ МПа, $T \approx 115$ К, яка розділяє параелектричну, неспівмірну та антисегнетоелектричну фази.

Ключові слова: антисегнетоелектрики, фазові переходи, діелектричні властивості, гідростатичний тиск, фазова діаграма, потрійна точка.

Вступ

Кристали CuCrP_2S_6 належать до шаруватих квазідвоірних фосфоровмісних халькогенідів типу $\text{Cu}^{\text{I}}\text{M}^{\text{III}}\text{P}_2\text{S}_6$ ($\text{M}=\text{In}, \text{Cr}$) для яких є характерним наявність різних типів спонтанного дипольного упорядкування, що зумовлює реалізацію фазових переходів в сегнети-, антисегнетоелектричні та неспівмірні фази а також фази дипольного скла [1,2,5,7,8]. Крім того інтерес до їх досліджень зріс в зв'язку з перспективністю їх використання в якості мультифероїчних матеріалів для наступного покоління магнітоелектричних енергонезалежних запам'ятовуючих пристроїв [9].

Рентгеноструктурні дослідження [2,5,6] кристалів CuCrP_2S_6 свідчать, що симетрія параелектричної фази є $C2/c$, а симетрія антисегнетоелектричної $-Pc$. Спонтанна поляризація обумовлена дипольним упорядкуванням при фазовому переході. Механізм упорядкування пов'язаний з динамікою двох підґраток: релаксація катіонів Cu^+ у двоїчному потенціалі та зміщення катіонів Cr^{3+} в шарах.

Згідно даних калориметричних та ультразвукових досліджень [3,4,7] в

кристалах CuCrP_2S_6 ідентифіковано два ФП – при $T_{c1} \approx 190$ К та $T_{c2} \approx 150$ К, які розділяють три фази: неполярну параелектричну ($T > T_{c1}$), антиполярну антисегнетоелектричну ($T < T_{c2}$) та проміжкову квазі-антиполярну в інтервалі температур $T_{c2} < T < T_{c1}$. Згодом діелектричні дослідження [10] та дослідження краю фундаментального поглинання [11] дали змогу встановити, що проміжкова фаза є неспівмірною. Про це свідчили зміни температурної залежності діелектричної проникності при ФП 2-го роду з параелектричної в проміжкову фазу та паралельний зсув енергетичного положення краю фундаментального поглинання. Ізоморфна заміна атомів Cr на 10 мол.% атомів In в кристалах CuCrP_2S_6 суттєво не змінює температурну поведінку діелектричних властивостей [1,8]. Температура фазового переходу в антисегнетоелектричну фазу незначно зменшується, при цьому сходінка на температурній залежності ϵ' в кристалах $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ стає більш розмитою.

Відомо, що зовнішні впливи (електричне поле, механічні напруження та гідростатичний тиск суттєво можуть змінювати структуру проміжкових фаз в

сегнетоелектриках. При цьому на діаграмах стану можливе існування полікритичних точок (точка Ліфшиця [12], потрійна точка [13]).

Основна мета даного дослідження за допомогою вивчення температурних залежностей діелектричних властивостей кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при дії високого гідростатичного тиску встановити фазову p, T -діаграму та проаналізувати її особливості.

Методика експерименту

Досліджувані кристали $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ були отримані методом газотранспортних реакцій. Електроємність C і тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ досліджуваних кристалів вимірювалися за допомогою LCR METER HP4262A на частоті 1 МГц. Залежності $\epsilon(T)$ і $\text{tg}\delta(T)$ отримані в динамічному режимі охолодження та нагріву зі швидкістю зміни температури 0,5 К/мін. Температура зразка контролювалась мідь-константовою термопарою з точністю 0,1 К. В якості електричних контактів використовувалась срібна паста типу “Дегуса-200”. Контакти наносились перпендикулярно до шарів кристалу. Зразок для вимірювань розташовувався в камері високого тиску з капіляром із робочою рідиною - бензин “Галоша”. Тиск в камері високого тиску визначався механічним манометром з точністю ± 50 атм. Інформацію про топографію поверхні та композиційний склад досліджуваних кристалів отримано за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM).

Експериментальні результати

На рис.1 наведені зображення поверхні квазідвовимірних монокристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ отримане за допомогою скануючого електронного мікроскопі JSM-7001FSEM і проведено їх точковий аналіз методом енергодисперсійної рентгенофлуоресцентної спектроскопії. Отриманий хімічний аналіз кристалів показав, що їх склад складає: Cu - 16,87 моль. %; In 3,06 моль. %; Cr – 12,43 моль. %; P - 16,41 моль. %; S - 51,23 моль. %, що

дуже добре узгоджується із теоретичними розрахунками.

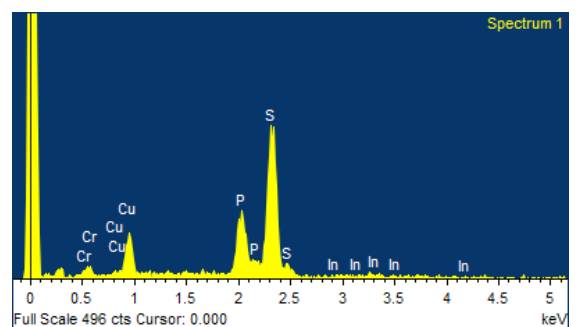
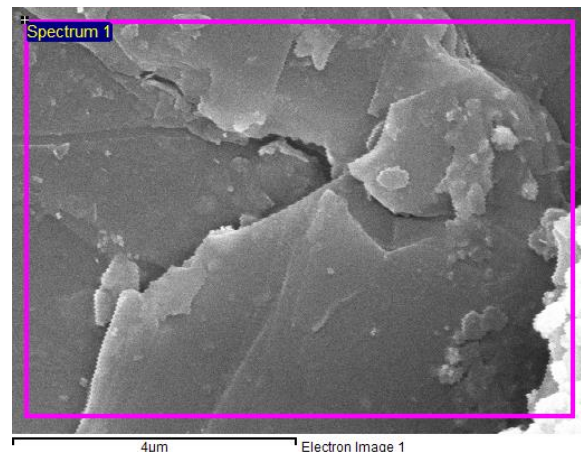


Рис.1. Зображення поверхні та рентгенофлуоресцентний EDX-спектр шаруватих кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$.

Температурні залежності діелектричних властивостей в шаруватих кристалах $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при різних значеннях гідростатичного тиску отримані в режимі нагрівання зображені на рис. 2.

Збільшення гідростатичного тиску приводить до зростання величини дійсної частини діелектричної проникності в усьому досліджуваному інтервалі температур. При цьому максимумами температурної залежності $\epsilon'(T)$ зсуваються в область менших тисків. При атмосферному тиску на температурній залежності дійсної частини діелектричної проникності кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ (крива 1.) спостерігається розмита стрибкоподібна сходинка, що охоплює температурний інтервал 10 К і відповідає відомому фазовому переходу із неспівмірної в антисегнетоелектричну фазу[1]. Середина цієї сходинки відповідає температурі $T_{c2} \approx 146\text{K}$, що добре узгоджується із результатами роботи [1,8].. Злам температурної залежності,

відповідний температурі ФП параелектрична - неспівмірна фаза при атмосферному тиску спостерігається при температурі $T_{c1} \approx 177$ К, що теж узгоджується із результатами роботи [1,8]. В області ФП першого роду T_{c2} кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ також спостерігається стрибкоподібна поведінка на температурній залежності діелектричних втрат $\varepsilon''(T)$ (рис.2).

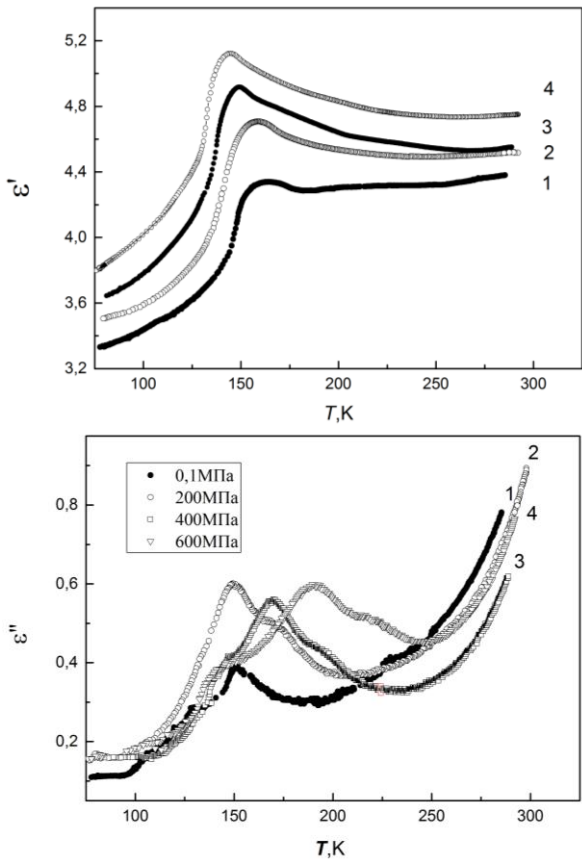


Рис.2. Температурна залежність дійсної ε' та уявної ε'' частини діелектричної проникності кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при різних значеннях гідростатичного тиску p , МПа: 0,1-; 2-200; 3-400; 4-600.

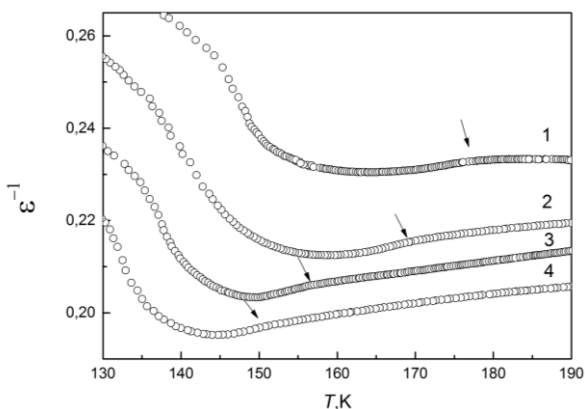


Рис.3. Температурна залежність оберненої діелектричної проникності ε^{-1} кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при різних значеннях гідростатичних тисках відповідно рис.4.34

Обговорення результатів

Приведені на рис.2. температурні залежності уявної діелектричної проникності свідчать про складну поведінку діелектричних властивостей в параелектричній фазі. Це підтверджує той факт, що із-за відносно сильної диполь-дипольної взаємодії неполярна фаза не проявляє себе як звичайний тип параелектричної фази [2]. Із рис.2 видно, що ФП в антисегнетоелектричну фазу передує максимум уявної діелектричної проникності, який зсувається в сторону високих температур при зростанні тиску. Максимум діелектричних втрат характерний для релаксаційних процесів в сегнетоелектриках і може слугувати додатковим аргументом, що стрибковий рух атомів міді спочатку випадково “заморожується” в ближньому оточенні (склоподібна та неспіврозмірна проміжкова фаза), а потім здійснюється антиполярне упорядкування.

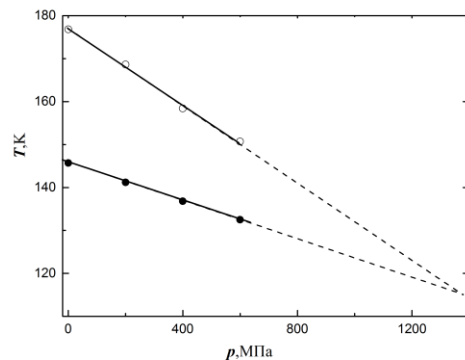


Рис.4. Фазова p, T -діаграма кристалу $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$. Світлі та темні кружечки температура фазового переходу із параелектричної в неспівмірну та неспівмірної в антисегнетоелектричну фази відповідно.

При зростанні тиску стрибкоподібна аномалія в області ФП першого роду T_{c2} незначно розмивається і зсувається в область менших температур із баричним коефіцієнтом $dT_{c2}/dp = -0,045$ К/МПа. Розмитий злом при T_{c1} (див. рис.3) також зсувається в сторону низьких температур із коефіцієнтом $dT_{c1}/dp = -0,022$ К/МПа. При цьому температурний інтервал проміжкової фази зменшується. Фазова p, T -діаграма отримана нами на основі досліджень баричної поведінки діелектричних властивостей приведена на

рис.4. Екстраполяція ліній фазових переходів в область високих тисків дає підстави говорити про реалізацію на фазовій p,T -діаграмі в області тисків $p \approx 1390$ МПа полікритичної потрійної точки, що розділяє фазові переходи в співмірну та неспівмірну фази.

Висновки

Вперше досліджено вплив високого гідростатичного тиску на діелектричні властивості кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$.

Виявлено індукований гідростатичним тиском ефект зменшення

температурного інтервалу існування проміжкової (неспівмірної) фази в кристалах CuCrP_2S_6 і експериментальним шляхом визначено коефіцієнти баричної зміни температури ФП першого роду T_{c2} із коефіцієнтом $dT_{c2}/dp = -0,045$ К/МПа та температури переходу другого роду T_{c1} із коефіцієнтом $dT_{c1}/dp = -0,022$ К/МПа. На фазовій p,T -діаграмі кристалів $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ можлива реалізація полікритичної потрійної точки з координатами $p \approx 1390$ МПа, $T \approx 115$ К, що розділяє фазові переходи в співмірні та неспівмірні фази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dziaugys A., Shvartsman V. V., Macutkevicius J., Banys J., Vysochanskii Yu., and Kleemann W. Phase diagram of mixed $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Cr}_{1-x})\text{P}_2\text{S}_6$ crystals // *Physical Review B*.-2012.-v. 85.- P.134105_1-134105_6.
2. Cajipe V. B., Ravez J., Maisonneuve V., Simon A., Payen C., Von Der Muhll R. and Fischer J. E. Copper ordering in lamellar CuMP_2S_6 (M= Cr, In): Transition to an antiferroelectric or ferroelectric phase // *Ferroelectrics*. - 1996. - V. 185. - P. 135-138.
3. Banys J., Samulionis V., Cajipe V.B., Vysochanskii Yu. Dielectric properties of ferroelectrics $\text{CuInP}_2\text{Se}_6$ and CuCrP_2S_6 . // *Ferroelectrics* – 2001 – Vol.257, pp.163-168.
4. V. Samulionis, J. Banys and Yu. Vysochanskii, Ultrasonic and piezoelectric investigation of phase transitions in layered $\text{Cu}(\text{Cr}_x\text{In}_{1-x})\text{P}_2\text{S}_6$ crystals.-2007.- *Ferroelectrics*, 348, P.124-130.
5. V.Maisonneuve, C.Payen and V.B.Cajipe. On CuCrP_2S_6 : Copper disorder, stacking distortion and magnetic ordering// *J. of Solid State Chemistry*.-116, 1995.-P.208-210.
6. Colombet P., Leblanc A., Danot M., Rouxel J. Structural aspect and magnetic properties of lamellar compound $\text{Cu}_{0.5}\text{Cr}_{0.5}\text{PS}_3$ // *J. of Solid State Chemistry*.-116,1995.-P.208-210
7. Moriya K, Kariya N., Inaba A., Matsuo T., Prits I., Vysochanskii Yu.M. Low-temperature calorimetric study of phase transitions in CuCrP_2S_6 // *Sol.State.Com.* - 2005.-136. P.173-176.
8. Maior M.M., Motrja S.F., Gurzan M.I., Prits I.P., Vysochanskii Yu.M. Dipole Glassy State in Layered Mixed Crystals of $\text{Cu}(\text{In},\text{Cr})\text{P}_2(\text{S}, \text{Se})_6$ System // *Ferroelectrics*. - 2008. - V. 376. - P. 9-16.
9. F. Liu, L. You, K. L. Seyler, X. Li, P. Yu, J. Lin, X. Wang, J. Zhou, H. Wang, H. He, S. T. Pantelides, W. Zhou, P. Sharma, X. Xu, P. M. Ajayan, J. Wang and Z. Liu. Discovery of Two-Dimensional Multiferroicity in van der Waals CuCrP_2S_6 Layers.-2016.-*Nature Communications*.- **7**.-p.12357-12368.
10. Ю.М.Височанський, І.П.Студеняк, В.В.Митровці, Щ.Щ.Молнар, Д.Ш.Ковач, О.А.Мікайло, В.Кажіпе. Дослідження природи проміжкової квазі-антиполярної фази в кристалах CuCrP_2S_6 .-1999.-*Вісник УжНУ.Серія Фізика*.-№5.-С.68-77.
11. I. P. Studenyak, O.A.Mykajlo, Yu. M.Vysochanskii and V. B. Cajipe. Optical absorption studies of phase transitions in CuCrP_2S_6 layered antiferroelectrics.- *J. Phys.: Condens. Matter* **15** (2003) 6773–6779
12. Slivka A.G., Gerzanich E.I., Guranich P.P., Shusta V.S. Phase p,T,x -diagram and peculiarities of physical properties of $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{SexS}_{1-x})_6$ ferroelectric crystals

near Lifshitz point // Ferroelectrics.-
1990.-v.103.-P.71-82
13. P.P. Guranich, R.R. Rosul, A.G. Slivka, Z.
Czapla/Pressure behaviour of

birefringence in $[(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_3]_4\text{Cd}_3\text{Cl}_{10}$
crystal// Solid State Communications 152
(2012) 1821–1823.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2018.

A. V. Шуста¹, А. Г. Сливка¹, В. С. Шуста¹, В. А. Калитин¹,
И. Петришинець²

¹Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000, Украина,
e-mail: vshusta@ukr.net

²Словацкая академия наук, ул. Ватсонова, 47, 04001, Кошице, Словакия

ФАЗОВАЯ p, T -ДИАГРАММА СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$

Приведены результаты исследований температурных зависимостей аномалий диэлектрической проницаемости в окрестности фазовых переходов слоистых кристаллов $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ при действии внешнего гидростатического давления. Установлено, что действие гидростатического давления уменьшает температурную ширину промежуточной фазы. На фазовой p, T -диаграмме кристаллов $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ возможно существование тройной точки с координатами $p \approx 1390$ МПа, $T \approx 115$ К, которая разделяет параэлектрическую, несоизмеримую и антисегнетоэлектрическую фазы.

Ключевые слова: сегнетоэлектричество, антисегнетоэлектричество, фазовые переходы, диэлектрические свойства, гидростатическое давление, фазовая диаграмма, тройная точка

A.V. Shusta, A.G. Slivka, V.S. Shusta, V.A.Kalytyn, I. Petryshynets

¹Uzhhorod national university, Voloshyn, str. 54, 88000, Uzhhorod, Ukraine,
e-mail: vshusta@ukr.net

²Slovak Academy of Sciences, Watsonova, str., 47, 04001, Kosice, Slovensko

PHASE p, T -DIAGRAM OF LAYERED $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ CRYSTALS

Purpose: Recently interest of CuCrP_2S_6 crystals studies has grown significantly. This is due to the promising use of them as multiferrous materials for the next generation of magnetoelectric non-volatile storage devices.

According to data from calorimetric and ultrasound studies, two phase transitions were identified in CuCrP_2S_6 crystals at $T_{c1} \approx 190$ K and $T_{c2} \approx 150$ which divide three phases: the nonpolar paraelectric ($T > T_{c1}$), the antipolar anti-ferroelectric ($T < T_{c2}$) and the intermediate quasi-antipolar in the temperature range $T_{c2} < T < T_{c1}$.

Dielectric studies and studies of the fundamental absorption edge have made it possible to establish that the intermediate phase is incommensurable. This was evidenced by the brakes on the temperature dependence of the dielectric constant at the second kind phase transition from the paraelectric to the intermediate phase and the parallel shift of the energy position of the edge of the fundamental absorption.

The isomorphic substitution of Cr atoms by 10 mol% of In atoms in crystals of CuCrP_2S_6 does not significantly change the temperature behavior of dielectric properties.

The temperature of the phase transition to the anti-ferroelectric phase is slightly reduced, the step on the temperature dependence of ϵ' in $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ crystals becomes blurrier.

The main objective of this study is to determine the phase p, T -diagram and analyze its features by studying the temperature dependences of the dielectric properties of $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ crystals under the influence of high hydrostatic pressures.

Methods: Studied $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ crystals were grown by the gas transport reaction method. For the dielectric measurement polished plate like crystals were used. All measurements were performed in a direction perpendicular to the layers. The complex dielectric permittivity ϵ^* was measured using an HP4262A capacitance bridge at the frequency 1 MHz. All measurements have been performed on cooling and heating mode with a temperature rate 0.5 K/min. Silver paste has been used for contacting. Hydrostatic pressure was applied a high-pressure chamber, its value being controlled within ± 1 MPa. Scanning electron microscopy (SEM) studies combined with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were performed using a SEM JEOL 7000F microscope.

Results: Studies of a complex dielectric permittivity ϵ^* of $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ crystals with different values of hydrostatic pressure were performed in a wide temperature range $77 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ and a pressure of $0 \text{ MPa} < p < 600 \text{ MPa}$. An increase in hydrostatic pressure results in an increase in the value of the real of the dielectric constant throughout the studied temperature range. With increasing pressure, the jump-like anomaly in the region of the first kind Phase transition T_{c2} is blurred and shifted to a lower temperature region with a coefficient $dT_{c2}/dp = -0,045 \text{ K/MPa}$. At the same time, the temperature interval of the intermediate phase decreases. The blurred break at T_{c1} also shifts towards low temperatures with a coefficient $dT_{c1}/dp = -0,022 \text{ K/MPa}$.

Conclusions: The influence of hydrostatic pressure on the temperature behavior of dielectric properties of CuCrP_2S_6 layered crystals is studied in the vicinity of the phase transition of crystals. It was observed that under the influence of the hydrostatic pressure the intermediate (incommensurate) phase existence temperature interval was reduced. Coefficients of the baric variation of the temperatures of the first kind phase transition T_{c2} and of the second kind phase transition T_{c1} were determined. On the phase p, T diagram of $\text{CuCr}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{P}_2\text{S}_6$ crystals an implementation of a polycrystal triple point that separates phase transitions into comparative and incommensurate phases is possible.

Keywords: antiferroelectrics, phase transitions, dielectric properties, hydrostatic pressure, phase diagram, triple point.

PACS: 77.80.b

REFERENCES

1. Dziaugys A., Shvartsman V. V., Macutkevic J., Banys J., Vysochanskii Yu., and Kleemann W. (2012), "Phase diagram of mixed $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Cr}_{1-x})\text{P}_2\text{S}_6$ crystals", *Phys.Rev B*, vol. 85, pp.134105-1-134105-6.
2. Cajipe V. B., Ravez J., Maisonneuve V., Simon A., Payen C., Von Der Muhll R. and Fischer J. E. (1996), "Copper ordering in lamellar CuMP_2S_6 (M= Cr, In): Transition to an antiferroelectric or ferroelectric phase", *Ferroelectrics*, V. 185, pp. 135-138.
3. Banys J., Samulionis V., Cajipe V.B., Vysochanskii Yu. (2001), "Dielectric properties of ferroelectrics CuInP_2S_6 and CuCrP_2S_6 ", *Ferroelectrics*, vol.257, pp.163-168.
4. V. Samulionis, J. Banys and Yu. Vysochanskii (2007), "Ultrasonic and piezoelectric investigation of phase transitions in layered $\text{Cu}(\text{Cr}_x\text{In}_{1-x})\text{P}_2\text{S}_6$ crystals", *Ferroelectrics*, vol.348, P.124-130.
5. V. Maisonneuve, C. Payen and V. B. Cajipe. (1995) "On CuCrP_2S_6 : Copper disorder, stacking distortion and magnetic ordering", *J. of Solid State Chemistry*, 116, pp.208-210.
6. Colombet P., Leblanc A., Danot M., Rouxel J. (1995), "Structural aspect and magnetic properties of lamellar compound $\text{Cu}_{0.5}\text{Cr}_{0.5}\text{PS}_3$ ", *J. of Solid State Chemistry*, 116, pp.208-210
7. Moriya K, Kariya N., Inaba A., Matsuo T., Prits I., Vysochanskii Yu.M. (2005),

- "Low-temperature calorimetric study of phase transitions in CuCrP_2S_6 ", *Sol.State.Com*, 136, pp.173-176.
8. Maior M.M., Motrja S.F., Gurzan M.I., Prits I.P., Vysochanskii Yu.M.(2008), "Dipole Glassy State in Layered Mixed Crystals of $\text{Cu}(\text{In,Cr})\text{P}_2(\text{S, Se})_6$ System", *Ferroelectrics*, v. 376, pp 9-16.
 9. F. Liu, L. You, K. L. Seyler, X. Li, P. Yu, J. Lin, X. Wang, J. Zhou, H. Wang, H. He, S. T. Pantelides, W. Zhou, P. Sharma, X. Xu, P. M. Ajayan, J. Wang and Z. Liu.(2016) , "Discovery of Two-Dimensional Multiferroicity in van der Waals CuCrP_2S_6 Layers", *Nature Communications.*, 7, pp.12357-12368.
 10. Yu. Vysochanskii, I.P.Studenyak, V.V.Mytrovcij, A.A.Molnar, Gy.Sh.Kovacs, O.A.Mykajlo, V.Cajipe (1999), "The nature of intermediate quasi-antipolar phase in CuCrP_2S_6 crystals" [Doslidzennya prirody promizhkovoi kvazi-antipoljarnoi fazi v krystalah CuCrP_2S_6], Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. Issue 5., pp.68-77.
 11. I. P. Studenyak, O.A.Mykajlo, Yu. M.Vysochanskii and V. B. Cajipe. (2003), "Optical absorption studies of phase transitions in CuCrP_2S_6 layered antiferroelectrics", *J. Phys.: Condens. Matter* ,15, pp. 6773–6779
 12. Slivka A.G., Gerzanich E.I., Guranich P.P., Shusta V.S. (1990), "Phase p,T,x-diagram and peculiarities of physical properties of $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{Se}_x\text{S}_{1-x})_6$ ferroelectric crystals near Lifshitz point", *Ferroelectrics*,v.103, pp.71-82
 13. P.P.Guranich, R.R.Rosul, A.G.Slivka, Z. Czaplá (2012), "Pressure behaviour of birefringence in $[(\text{CH}_3)_2\text{CHNH}_3]_4\text{Cd}_3\text{Cl}_{10}$ crystal", *Solid State Communications*, 152, pp.1821–1823.