УДК 537.226.4 *Оригинальная статья*

Дисперсионные зависимости параметров переключения поляризации медьсодержащих кристаллов триглицинсульфата

Н.Н. Большакова, И.К. Галкин, А.И. Иванова, Е.М. Семенова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
171100, Россия, Тверь, ул. Желябова 33
galkin.ik@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.594

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментального исследования концентрационных и дисперсионных зависимостей характеристик процессов переполяризации медьсодержащих кристаллов триглицинсульфата. Показано, что с повышением концентрации примеси в кристаллах триглицинсульфат : Cu^{2+} значения относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей, переключаемой поляризации и коэффициента униполярности кристаллов имеют тенденцию к увеличению, а величины коэрцитивного поля, поля смещения и тангенса угла диэлектрических потерь – к уменьшению. Существенное влияние на процессы их переключения оказывает частота переменного поля, с ростом которой наблюдается трансформация петель диэлектрического гистерезиса. С увеличением частоты от 50 Гц до 2 кГц переключаемая поляризация кристаллов уменьшаются в среднем в 2,5 раза. При этом более существенное влияние частота поля оказывает на процессы переполяризации беспримесного триглицинсульфата. Изменение частоты переполяризующего поля от 50 Гц до 2 кГц приводит к уменьшению величины коэффициента диэлектрической вязкости кристаллов триглицинсульфат : Cu^{2+} в среднем в 3 раза, что вызвано отключением основных механизмов их переключения.

Ключевые слова: дисперсионные зависимости, триглицинсульфат, гистерезисные свойства, переключаемая поляризация, диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая вязкость, доменная структура.

Большакова Наталья Николаевна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Галкин Иван Константинович – студент 2 курса магистратуры физико-технического факультета ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Original paper

Dispersion dependences of polarization switching parameters of copper-containing triglycine sulfate crystals

N.N. Bolshakova, I.K. Galkin, A.I. Ivanova, E.M. Semenova
Tver State University, Tver, Russia
galkin.ik@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.594

Abstract: The paper presents results of an experimental study of the concentration and dispersion dependences of repolarization characteristics of copper-containing triglycine sulfate crystals. It is shown that with an increase in the impurity concentration in triglycine sulfate : Cu^{2+} crystals, the values of the relative and effective permittivities, switchable polarization, and unipolarity coefficient tend to increase, while the magnitudes of the coercive field, bias field, and dielectric loss tangent tend to decrease. The switching processes are significantly affected by the frequency of the alternating field, with an increase in which a transformation of the dielectric hysteresis loops is observed. As the

© Н.Н. Большакова, И.К. Галкин, А.И. Иванова, Е.М. Семёнова, 2026

frequency increases from 50 Hz to 2 kHz, the switchable polarization of the crystals decreases by an average of 2,5 times. At the same time, the frequency of the repolarizing field has a more significant effect on the repolarization processes of pure triglycine sulfate. A change in the repolarizing field frequency from 50 Hz to 2 kHz leads to a decrease in the dielectric viscosity coefficient of triglycine sulfate : Cu^{2+} crystals by an average of 3 times, which is caused by the switching off of the main switching mechanisms.
Keywords: dispersion dependences, triglycine sulfate, hysteresis properties, switchable polarization, permittivity, dielectric viscosity, domain structure.

Nataly N. Bolshakova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University, ORCID: 0009-0007-8077-6050
Ivan K. Galkin – 2nd year graduate student, Faculty of Physics and Engineering, Tver State University ORCID: 0009-0005-3244-5068
Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0002-5517-2294
Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0003-2755-6933

Поступила в редакцию/received: 20.07.2026; после рецензирования/revised: 15.08.2026; принята/accepted 24.08.2026.

1. Введение

Монокристаллы триглицинсульфата (ТГС) представляют собой пример классического сегнетоэлектрика. Интерес к исследованию кристаллов ТГС в настоящее время возрастает в связи с разработкой нанокомпозитов на его основе, что направлено на улучшение характеристик сегнетоэлектриков, включая смещение температуры фазового перехода, рост диэлектрической проницаемости и усиление гистерезисных эффектов за счет добавления наночастиц [1-3].

Известны многие тепловые эффекты, которые легли в основу создания тепловых приемников излучения, но лишь термоэлектрический, болометрический, оптико-акустический и пироэлектрический нашли практические применения. Пироэлектрики относятся к классу материалов, изменяющих поляризацию при изменении их температуры. Наиболее чувствительными являются активные элементы инфракрасных приёмников излучения, изготовленные из кристаллов триглицинсульфата [4].

Модификация кристаллов ТГС в процессе выращивания производится с целью направленного создания в этих кристаллах необходимых сегнетоэлектрических свойств. Вводимые при росте кристаллов примеси могут создавать в них как точечные дефекты, так и объемные комплексы. Влияние примесей на физические свойства кристаллов зависит от их концентрации, знака заряда хелата и изменения отношения сил связей в структуре кристалла [5]. Монокристаллы группы триглицинсульфата выращиваются из водных растворов. Это позволяет осуществлять их легирование в процессе роста. Наиболее распространенным лигандом является медь. Вхождение примеси в кристалл зависит от условий выращивания. Например, концентрация

ионов Cu^{2+} в кристалле увеличивается с ростом температуры. Распределение примесей по пирамидам роста происходит неравномерно и зависит от их содержания в растворе [6]. Настоящая работа поставлена с целью получения информации о влиянии концентрации примеси и частоты переполяризующего поля на диэлектрические свойства, процессы переполяризации и гистерезисные явления в медьсодержащих кристаллах триглицинсульфата.

2. Объекты и методы исследования

Исследования проведены на образцах монокристаллов ТГС, легированных ионами меди различных концентраций. Содержание примесей определялись в кристалле методом химического анализа. На образцы в виде плоскопараллельных пластин полярного среза наносились серебряные электроды. Кристаллы подвергались высокотемпературному отжигу при $T = 373$ К в течение 6 часов с последующим медленным охлаждением. Образцы имели толщины от 0,85 мм до 1,5 мм. Концентрации примеси в кристалле изменялись в диапазоне $(4{,}2\text{-}8{,}7)\times10^{-3}$ мас.%.

Электроемкость образцов измерена с помощью измерителя иммитанса Е7-20. Петли диэлектрического гистерезиса получены методом Сойера-Тауэра на частотах 25-2000 Гц [7, 8]. Расчеты диэлектрических проницаемостей и параметров петель диэлектрического гистерезиса проведены по стандартным методикам. Визуализация доменной структуры кристаллов ТГС : Cu^{2+} осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM6610LV в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 1,5-5,0 кВ [9, 10]. Погрешности при определении характеристик переключения не превышали 10%.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Осциллограммы петель диэлектрического гистерезиса, полученные для кристаллов ТГС : Cu^{2+} при температуре 293 К и частоте переполяризующего поля 50 Гц, представлены на рис. 1.

Видно, что петли диэлектрического гистерезиса как в случае беспримесного кристалла ТГС, так и ТГС : Cu^{2+}, имеющих различные содержания примеси, прямоугольны и практически не искажены. Сдвиг петель гистерезиса по оси абсцисс свидетельствует о присутствии в кристалле полей смещения. По оси ординат петли гистерезиса смещены относительно нулевого уровня. Это соответствует униполярному состоянию образцов, т.е. преимущественной ориентации доменов одного из направлений вектора спонтанной поляризации. При высоких концентрациях примеси меди петли диэлектрического гистерезиса для

кристаллов ТГС сохраняют прямоугольность, и их искажений не наблюдается. При этом заметно возрастает сдвиг петель относительно нулевого уровня по оси ординат, свидетельствующий о существенной униполярности кристаллов.

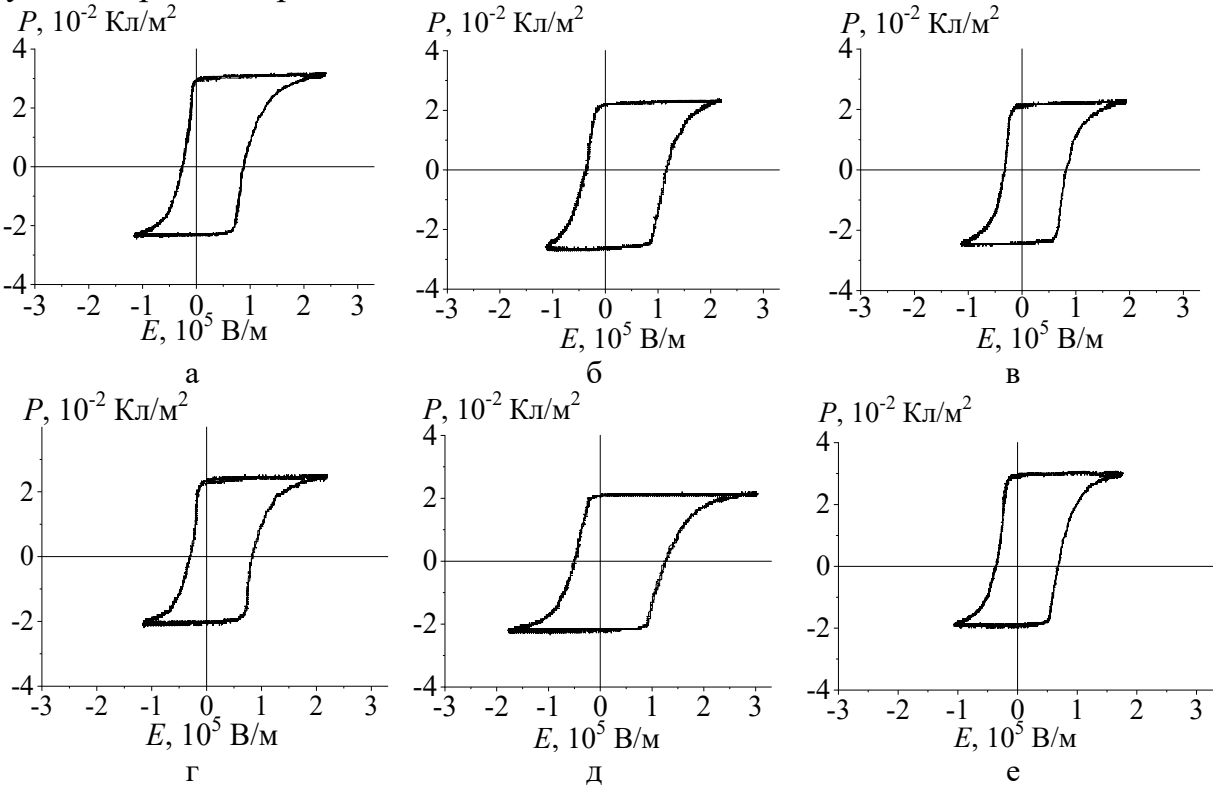


Рис. 1. Оцифрованные осциллограммы петель диэлектрического гистерезиса, полученные для кристаллов ТГС, содержащих примесь меди в различных концентрациях ($\times 10^{-3}$ мас.%): а – 0,0; б – 4,2; в – 7,4; г – 7,7; д – 8,1; е – 8,7.

В Таблице 1 приведены характеристики переключения кристаллов: относительная ε и эффективная ε_{eff} диэлектрические проницаемости, переключаемая поляризация P, коэрцитивное поле E_c, поле смещения E_{df}, коэффициент униполярности η и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Таблица 1. Гистерезисные характеристики кристаллов ТГС : Cu^{2+}.

№	Cu^{2+}, $\times 10^{-3}$ мас.%	ε	ε_{eff}, 10^4	P, 10^{-2} Кл м$^{-2}$	E_c, $\times 10^3$ В·м$^{-1}$	E_{df}, $\times 10^3$ В·м$^{-1}$	η	$tg\delta$
1	0	45	4,6	2.6	50	26	0,06	0,17
2	4,2	60	2,3	2,4	71	81	0,07	0,15
3	7,4	59	2,8	2,4	62	50	0,08	0,16
4	7,7	65	2,6	2,6	62	52	0,12	0,13
5	8,1	67	1,5	2,1	92	76	0,1	0,13
6	8,7	47	3,3	2,7	60	33	0,5	0,14

Из приведённых результатов следует, что с ростом концентраций примеси в кристаллах ТГС : Cu^{2+} величины относительной и эффективной

диэлектрических проницаемостей, переключаемой поляризации и коэффициента униполярности кристаллов имеют тенденцию к увеличению, а значения напряженностей коэрцитивного поля, поля смещения и тангенса угла диэлектрических потерь – к уменьшению. Это может быть связано с увеличением дефектности кристалла вследствие внедрения примеси в процессе его роста.

Существенное влияние на процессы переключения примесных кристаллов ТГС оказывает частота переполяризующего поля. На рис. 2 представлена дисперсионная трансформация петли диэлектрического гистерезиса для кристалла ТГС в поле 12×10^4 В $\cdot$ м$^{-1}$. Видно, что с увеличением частоты поля, величины переключаемой поляризации образца уменьшаются. При этом изменяется и форма петли гистерезиса – нарушается её прямоугольность. Аналогичные изменения наблюдаются и для петель диэлектрического гистерезиса остальных изученных кристаллов.

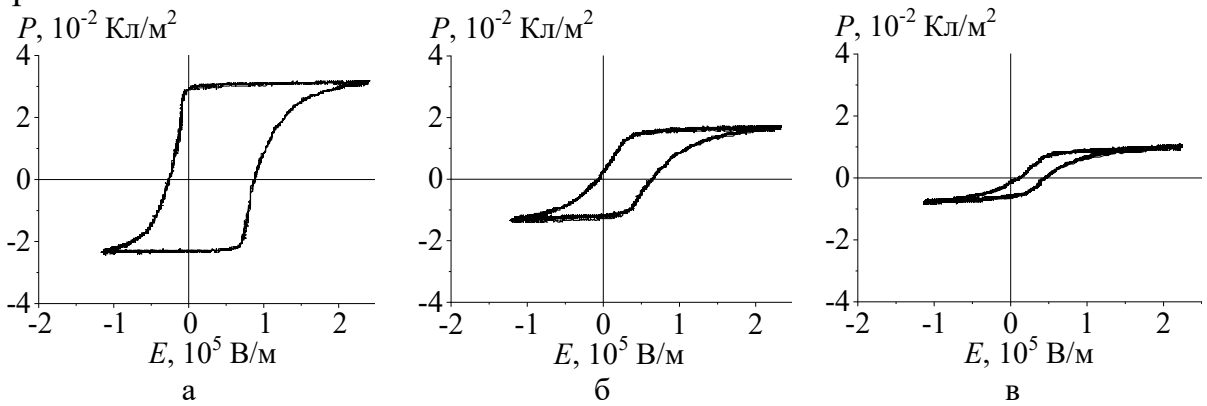


Рис. 2. Трансформация петли диэлектрического гистерезиса для кристалла ТГС в переменном поле 12×10^4 В $\cdot$ м$^{-1}$ различной частоты: а – 50 Гц, б – 500 Гц, в – 1500 Гц.

Соответствующие дисперсионные зависимости переключаемой поляризации для кристаллов группы ТГС показаны на рис. 3.

Из зависимостей $P(f)$ следует, что с увеличением частоты переполяризующего поля от 25 Гц до 2 кГц величины переключаемой поляризации кристаллов ТГС : Cu^{2+} уменьшаются в среднем на 65%.

Приложение к кристаллу электрического поля выводит его поляризацию P_0 из равновесного состояния, возврат к которому происходит за некоторое время релаксации τ, зависящее от коэффициента диэлектрической вязкости кристалла β и напряженности поля E: $\tau = \beta \cdot E^{-1}$ [11]. В случае переменного поля $E = E_0 \cdot \sin \omega t$ поляризация кристалла осциллирует с той же частотой ω, отставая по фазе на угол φ, тангенс которого равен $\omega \cdot \beta \cdot E_0^{-1}\sqrt{2}$.. Зависимость амплитудного значения поляризации P_A сегнетоэлектрика от ω и β отражает гистерезисные явления и определяется выражением:

$$P_A = P_0(\sqrt{1+2\omega^2\beta^2E^{-2}})^{-1},$$

которое позволяет определить коэффициент диэлектрической вязкости кристалла β.

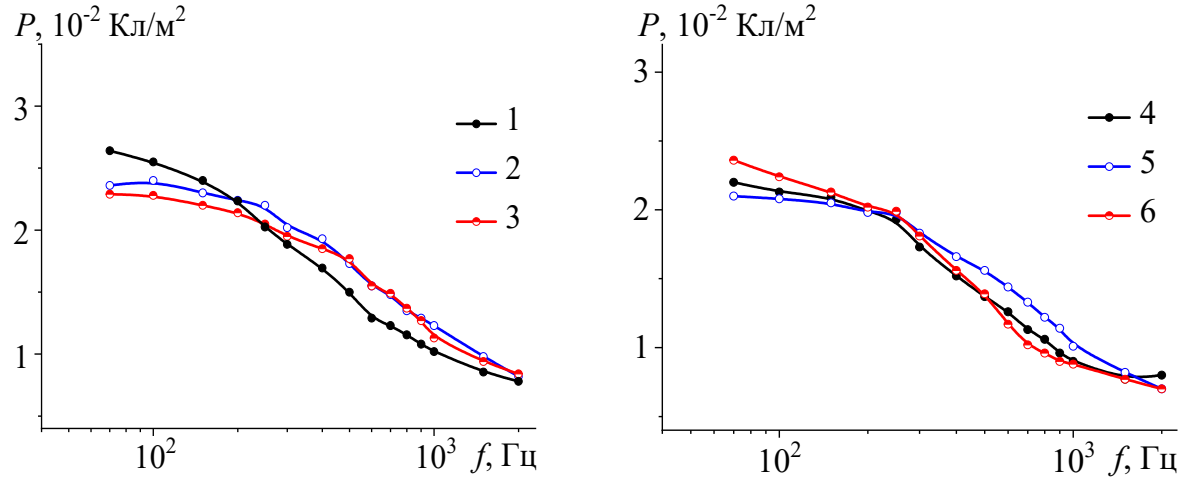


Рис. 3. Дисперсионные зависимости переключаемой поляризации, полученные для кристаллов ТГС с различными концентрациями примеси меди ($\times10^{-3}$ мас.%): 1 – 0,0; 2 – 4,2; 3 – 7,4; 4 – 7,7; 5 – 8,1; 6 – 8,7.

На рис. 4 представлены дисперсионные зависимости коэффициентов диэлектрической вязкости для кристаллов ТГС : Cu^{2+}.

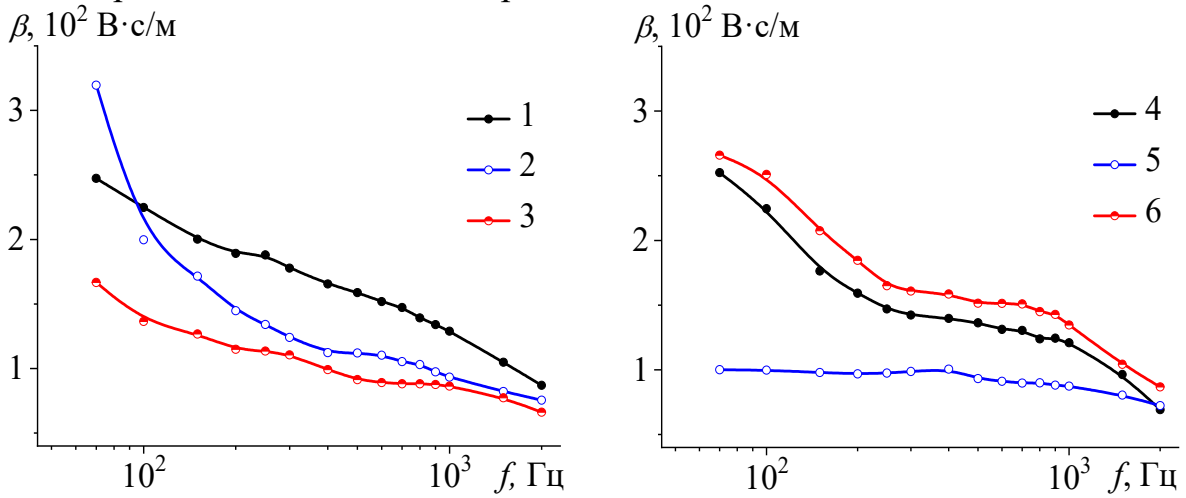


Рис. 4. Дисперсионные зависимости коэффициента диэлектрической вязкости, полученные для кристаллов ТГС с различными концентрациями примеси меди ($\times10^{-3}$ мас.%): 1 – 0,0; 2 – 4,2; 3 – 7,4; 4 – 7,7; 5 – 8,1; 6 – 8,7.

Видно, что с увеличением частоты переполяризующего поля от 50 Гц до 2 кГц величины коэффициентов диэлектрической вязкости кристаллов ТГС : Cu^{2+} монотонно убывают в среднем в 3 раза. Определяющую роль в этом играет поведение доменной структуры образцов. С ростом частоты переключающего кристалл поля из процессов переполяризации выключаются основные механизмы: зародышеобразование, движение доменных стенок и схлопывание

доменов. Сохраняются только колебания доменных стенок около положения равновесия, что согласуется с результатами исследований, представленных в работе [12].

Процессы переключения сегнетоэлектрических кристаллов определяются поведением их доменной структуры. Кристалл триглицинсульфата относится к одноосным чистым сегнетоэлектрикам, поэтому его доменная структура поляризационно-оптическим методом непосредственно не выявляется. Домены в кристаллах ТГС : Cu^{2+} визуализированы с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) на свежем сколе образца.

Известно [13, 14], что структура кристаллов беспримесного ТГС в основном состоит из доменов линзовидной формы, расположенных в матрице домена, имеющего противоположное направление вектора спонтанной поляризации. Эти домены распределены по объему образца в достаточной степени равномерно. Поверхностная картина матрицы основного домена составляет ~50%.

Доменная структура кристаллов ТГС : Cu^{2+} (см. рис. 5) имеет существенные отличия. В матрице основного домена выявляются линзовидные микродомены, которые занимают ~ 30% визуализированной поверхности образца, а также ламелеобразные домены замкнутой формы.

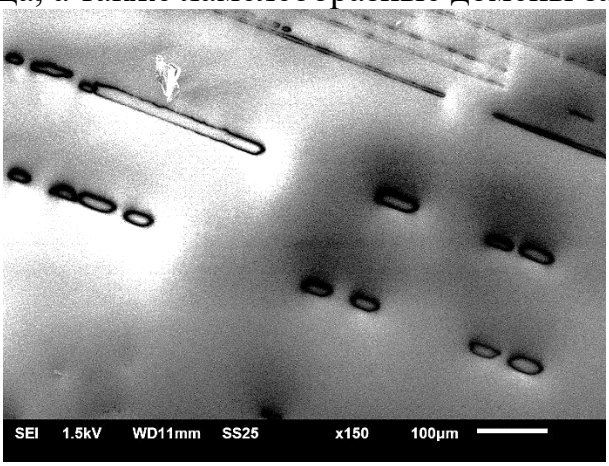
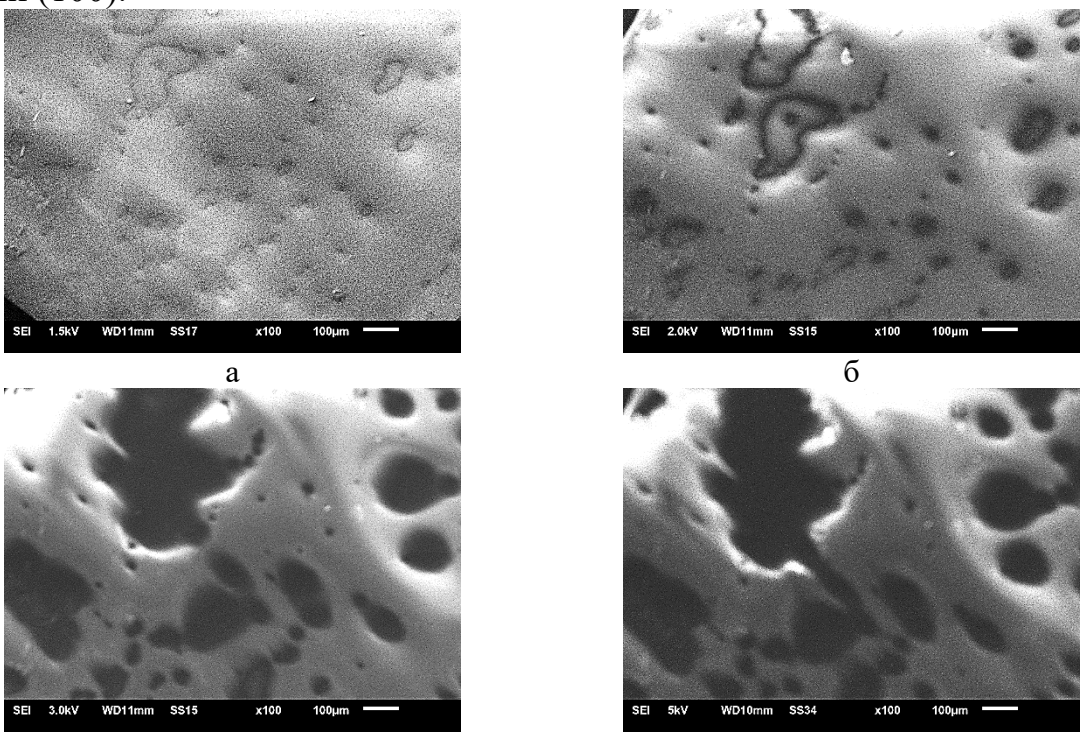


Рис. 5. РЭМ изображение доменной структуры кристалла ТГС : Cu^{2+} ($C = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ мас.%).

На рис. 6 представлены изображения доменной структуры того же кристалла, полученные при различных значениях кинетической энергии бомбардирующих поверхность образца электронов. Видно, что увеличение энергии от $2{,}4 \cdot 10^{-19}$ до $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ Дж (рост ускоряющего напряжения от 1,5 до 2 кВ) сопровождается увеличением размеров как микрозародышей, так и ламелеобразных доменов (см. рис. 6 а, б). При дальнейшем увеличении кинетической энергии электронов происходит объединение линзообразных и ламелеобразных доменов (см. рис. 6 в, г).

Поведение характеристик переключения и диэлектрических свойств

кристаллов ТГС : Cu^{2+} связаны с особенностями вхождения этой примеси в кристаллическую решетку при их выращивании. В кристаллах ТГС : Cu^{2+} [6] домены стремятся расположиться перпендикулярно слоям нарастания грани (100).



а б в г

Рис. 6. РЭМ изображения доменной структуры кристалла ТГС : Cu^{2+}, полученные при различных ускоряющих напряжениях (кВ) а – 1,5; б – 2,0; в – 3,0; г – 5,0 [15].

Примесь меди входит в кристаллическую решетку ТГС, создавая планарный, незаряженный хелатный комплекс. Неспаренный электрон иона меди взаимодействует с двумя эквивалентно расположенными атомами азота и образует с ними плоское хелатное соединение $\left[CuGl_2\right]^0$ в плоскости (101). Возникающие в этой плоскости механические напряжения существенно влияют на динамику доменных процессов.

4. Заключение

Проведённые исследования показали, что петли диэлектрического гистерезиса для составов ТГС : Cu^{2+} прямоугольны, не имеют искажений, а кристаллы обладают естественной униполярностью. С повышением концентрации примеси в кристаллах ТГС : Cu^{2+} значения относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей, переключаемой поляризации и коэффициента униполярности кристаллов имеют тенденцию к увеличению, а величины коэрцитивного поля, поля смещения и тангенса угла диэлектрических потерь – к уменьшению.

Возрастание частоты переполяризующего кристаллы ТГС : Cu^{2+} поля

приводит к трансформации петель диэлектрического гистерезиса. С увеличением частоты от 200 до 800 Гц размеры петель гистерезиса по оси ординат уменьшаются в 1,7-2 раза. С дальнейшим ростом частоты поля до 2 кГц существенно уменьшаются их площади и размеры. Рост частоты переполяризующего поля от 25 Гц до 2 кГц вызывает уменьшение величины переключаемой поляризации кристаллов ТГС : Cu^{2+} в среднем на 60%. При этом более существенное влияние частота переполяризующего поля оказывает на процессы переключения кристаллов беспримесного ТГС. С изменением частоты переполяризующего поля от 50 Гц до 2 кГц величины коэффициентов диэлектрической вязкости кристаллов ТГС : Cu^{2+} монотонно убывают в среднем в 3 раза, что вызвано отключением основных механизмов их переполяризации.

Исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета.

Библиографический список:

1. **Baryshnikov, S.V.** Linear and nonlinear dielectric properties of ceramics obtained from barium titanate nanopowder / S.V. Baryshnikov, A.Y. Milinsky, E.V. Stukova // Glass and Ceramics. – 2024. – V. 81. – I. 3-4. – P. 152-156. DOI: 10.1007/s10717-024-00674-1.
2. **Гайнутдинов, Р.В.** Применение сканирующей емкостной силовой микроскопии для выявления примесных фаз в сегнетоэлектрике триглицинсульфат / Р.В. Гайнутдинов, А.Л. Толстихина, А.К. Лашкова и др. // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – № 11. – С. 1692-1698. DOI: 10.21883/JTF.2019.11.48330.119-19
3. **Барышников, С.В.** Диэлектрические свойства композитов на основе триглицинсульфата и наночастиц титаната бария / С.В. Барышников, А.Ю. Милинский, А.Э. Львов, Е.В. Стукова, // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2025. – Т. 18. – № 1. – С. 9-17. DOI: 10.18721/JPM.18101.
4. **He, H.** Advances in lead-free pyroelectric materials: a comprehensive review / H. He, X. Lu, E. Hanc et al. // Journal of Materials Chemistry C. – 2020. – V. 8. – I. 5. – P. 1494-1516. DOI: 10.1039/C9TC05222D.
5. **Ranu** CMOS compatible pyroelectric materials for infrared detectors // Ranu, U. Bharathi, R. Sinha, P.B. Agarwal // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2022. – V. 140. – Art. № 106375. – 19 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106375.
6. Physics of ferroelectrics: a modern perspective; ed by K.M. Rabe, C.H. Ahn, J.-M. Triscone. **–** Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. **–** XII + 388 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34591-6.
7. **Богомолов, А.А.** Физика сегнетоэлектрических явлений / А.А. Богомолов, В.В. Иванов. – Тверь: ТвГУ, 2014. – 160 с.
8. **Печерская, Е.А.** Применение метода Сойера-Тауэра и его модификаций для измерения электрических параметров сегнетоэлектриков / Е.А. Печерская // Измерительная техника. – 2007. **–** №. 10. – С. 54-58.
9. **Иванова, А.И.** Температурные наблюдения эволюции доменной структуры триглицинсульфата методами РЭМ / А.И. Иванова, Р.М. Гречишкин, Н.Н. Большакова, В.А. Беляков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 9. – С. 49-53. DOI: 10.7868/S0207352815090073.
10. **Коханчик, Л.С.** Изменение состояния поверхности сегнетоэлектрических доменов при облучении электронами в РЭМ / Л.С. Коханчик**,** Б.К. Пономарев // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2005. – Т. 69. – №. 4. – С. 454-458.
11. **Nakatani, N.** Observation of ferroelectric domain structure in TGS / N. Nakatani // Ferroelectrics. – 2011. – V. 413. – I. 1. – P. 238-265. DOI: 10.1080/00150193.2011.554269.
12. **Bolshakova, N.** Domain structure realignment processes and Barkhausen effect in TGS crystals / N.Bolshakova, V. Rudyak // Ferroelectrics. – 1994. – V. 157. – I. 1. – P. 123-128. DOI:

10.1080/00150199408229493.
13. **Golitsyna, O.M.** Evolution of the domain structure of triglycine sulphate single crystal in the vicinity of phase transition / O.M. Golitsyna, S.N. Drozhdin, V.O. Chulakova et al. // Ferroelectrics. – 2017. – V. 506. – I. 1. – P. 127-135. DOI: 10.1080/00150193.2017.1282286.
14. **Михайлов, М.А.** Процессы переключения примесных кристаллов триглицинсульфата / М.А. Михайлов, А.А. Шемякин, Н.Н. Большакова, Е.Н. Гординская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14 – № 2. – С. 171-174.
15 **Большакова, Н.Н.** Переполяризационные свойства медьсодержащих кристаллов триглицинсульфата / Н.Н. Большакова, Н.Ю. Дружинина, А.И. Иванова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 50-60. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.050.

References:

1. Baryshnikov S.V., Milinsky A.Y., Stukova E.V. Linear and nonlinear dielectric properties of ceramics obtained from barium titanate nanopowder, *Glass and Ceramics*, 2024, vol. 81, issue 3-4, pp. 152-156. DOI: 10.1007/s10717-024-00674-1.
2. Gainutdinov R.V., Tolstikhina A.L., Lashkova A.K. et al. Application of scanning capacitance force microscopy for detecting impurity phases in ferroelectric triglycine sulfate, *Technical Physics*, 2019, vol. 64, issue 11, pp. 1602-1608. DOI: 10.1134/S1063784219110094.
3. Baryshnikov S.V., Milinsky A.Yu., Lvov A.E., Stukova E.V. Dielektricheskie svojstva kompozitov na osnove triglitsinsul'fata i nanochastits titanata bariya [Dielectric properties of composites based on triglycine sulfate and barium titanate nanoparticles], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.]*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 9-17. DOI: 10.18721/JPM.18101. (In Russian).
4. He H., Lu X., Hanc E. et al. Advances in lead-free pyroelectric materials: a comprehensive review, *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, vol. 8 issue 5, pp. 1494-1516. DOI: 10.1039/C9TC05222D.
5. Ranu, Bharathi U., Sinha R., Agarwal P.B. CMOS compatible pyroelectric materials for infrared detectors, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, vol. 140, art. no. 106375, 19 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106375.
6. *Physics of ferroelectrics: a modern perspective*, ed by K.M. Rabe, C.H. Ahn, J.-M. Triscone. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007, XII + 388 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34591-6.
7. Bogomolov A.A., Ivanov V.V. *Fizika segnetoelektricheskikh yavlenij* [Physics of ferroelectric phenomena], Tver, TSU Publ., 2014, 160 p. (In Russian).
8. Pecherskaya E.A. The use of the Sawyer-Tower method and its modifications to measure the electrical parameters of ferroelectric materials, *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, issue 10, pp. 1101-1107. DOI: 10.1007/s11018-007-0205-1.
9. Ivanova A.I., Grechishkin R.M., Bolshakova N.N., Belyakov V.A. Temperature observation of the evolution of the domain structure of triglycine sulphate by SEM, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2015, vol. 9, issue 5, p. 908-912. DOI: 10.1134/S1027451015050079.
10. Kokhanchik L.S., Ponomarev B.K. Change in surface state of ferroelectric domains under electron irradiation in SEM, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2005, vol. 69, issue 4, pp. 515-520.
11. Nakatani N. Observation of ferroelectric domain structure in TGS, *Ferroelectrics,* 2011, vol. 413, issue 1, pp. 238-265. DOI: 10.1080/00150193.2011.554269.
12. Bolshakova N., Rudyak V. Domain structure realignment processes and Barkhausen effect in TGS crystals. *Ferroelectrics*, 1994, vol. 157, issue 1, pp. 123-128. DOI: 10.1080/00150199408229493.
13. Golitsyna O.M., Drozhdin S.N., Chulakova V.O. et al. Evolution of the domain structure of triglycine sulphate single crystal in the vicinity of phase transition. *Ferroelectrics,* 2017, vol. 506, issue 1, pp. 127-135. DOI: 10.1080/00150193.2017.1282286.
14. Mihailov M.A., Shemyakin A.A., Bolshakova N.N., Gordinskaya E.N. Protsessy pereklyucheniya primesnykh kristallov triglitsinsul'fata [Switching processes in impurity-doped triglycine sulfate crystals]. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya [Fundamental problems of radioengineering and device construction],* 2014, vol. 14, no. 2, pp. 171-174. (In Russian).
15. Bolshakova N.N., Druginina N.Yu., Ivanova A.I. et al. Perepolyarizatsionnye svojstva medsoderzhashchikh kristallov triglitsinsulfata [Repolarization properties of copper-containing crystals of triglycine sulfate], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2022, issue 14, pp. 50-60. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.050. (In Russian).