

ПЕРЕПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ КРИСТАЛЛОВ ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТА

Н.Н. Большакова¹, Н.Ю. Дружинина², А.И. Иванова¹, Д.Н. Павлова¹, Б.Б. Педько¹,
Е.М. Семенова¹

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33

ФГКВООУ ВО «Военная академия воздушно-космической обороны им. Маршала

Советского Союза Г.К. Жукова» Минобороны РФ

170022, Россия, Тверь, ул. Жигарева, 50

semenova_e_m@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.050

Аннотация: В работе представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных при регистрации петель диэлектрического гистерезиса и полевых зависимостей переключаемой поляризации исходных и отожженных кристаллов триглицинсульфата, легированных медью в диапазоне концентраций $(4,2-8,7) \cdot 10^{-3}$ вес.%. Экспериментально установлено, что петли диэлектрического гистерезиса для исследуемых кристаллов не имеют искажений. Показано, что значения относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей и переключаемой поляризации для кристаллов ТГС: Cu^{2+} увеличиваются с ростом концентрации примесей. Полевые зависимости эффективной диэлектрической проницаемости имеют экстремумы: до отжига образцов максимумы кривых $\epsilon_{eff}(E)$ соответствуют полям порядка $(20-40) \cdot 10^3$ В·м⁻¹, а для отожженных эти поля составляют $\sim(15-30) \cdot 10^3$ В·м⁻¹. Отжиг образцов увеличивает подвижность доменных стенок, что способствует преобразованию линзовидных зародышей доменов в ламели.

Ключевые слова: триглицинсульфат, переполяризация, доменная структура, процессы переключения, гистерезис, диэлектрическая проницаемость.

1. Введение

В целенаправленном поиске новых сегнетоэлектриков особое место занимают работы по исследованию кристаллов с дозированным количеством дефектов [1, 2]. Вводимые при росте кристаллов примеси могут изменять его свойства, создавая в кристалле, 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 [3-5].

Монокристаллы группы триглицинсульфата выращиваются из водных растворов, что позволяет осуществлять их легирование в процессе роста с целью стабилизации поляризации, позволяющей использовать их в качестве преобразователей инфракрасного излучения [6-9]. 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. Настоящая работа поставлена с целью получения информации о

диэлектрических и переполаризационных свойствах естественно-состаренных и отожженных медьсодержащих кристаллов триглицинсульфата.

2. Объекты и методы исследования

Исследования выполнены на образцах медьсодержащих монокристаллов триглицульфата различных концентраций, которые определялись в кристалле методом химического анализа. На образцы в виде плоскопараллельных пластин полярного среза наносились серебряные электроды. Кристаллы подвергались высокотемпературному отжигу при $T = 100^\circ\text{C}$ в течение 6 часов с последующим медленным охлаждением. В Таблице 1 приведены сведения об объектах исследования.

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

№	Концентрация примеси	Толщина образца d , мм	Площадь поверхности образца S , мм ²
	Cu^{2+} , 10^{-3} вес. %		
1	4,2	2,1	55
2	7,4	1,4	41
3	7,7	1,1	57
4	8,1	0,8	35
5	8,6	1,2	40
6	8,7	1,5	54

Емкость образцов измерена с помощью измерителя иммитанса Е7-30. Петли диэлектрического гистерезиса получены методом Сойера-Тауэра на частоте 50 Гц. Расчеты диэлектрических проницаемостей и характеристик петли гистерезиса проведены по стандартным методикам [4]. Изучение доменной структуры кристаллов ТГС: Cu^{2+} выполнено с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM6610LV в режиме вторичных электронов [10]. Наблюдение осуществлялось на свежих сколах полярной поверхности.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены типичные петли диэлектрического гистерезиса, полученные для кристаллов ТГС: Cu^{2+} при $T = 25^\circ\text{C}$. Установлено, что до отжига образцов ТГС: Cu^{2+} , имеющих различные концентрации примеси, петли диэлектрического гистерезиса прямоугольны и практически не искажены. По оси абсцисс различия в величинах коэрцитивных полей незначительны, что свидетельствует о практическом отсутствии полей смещения.

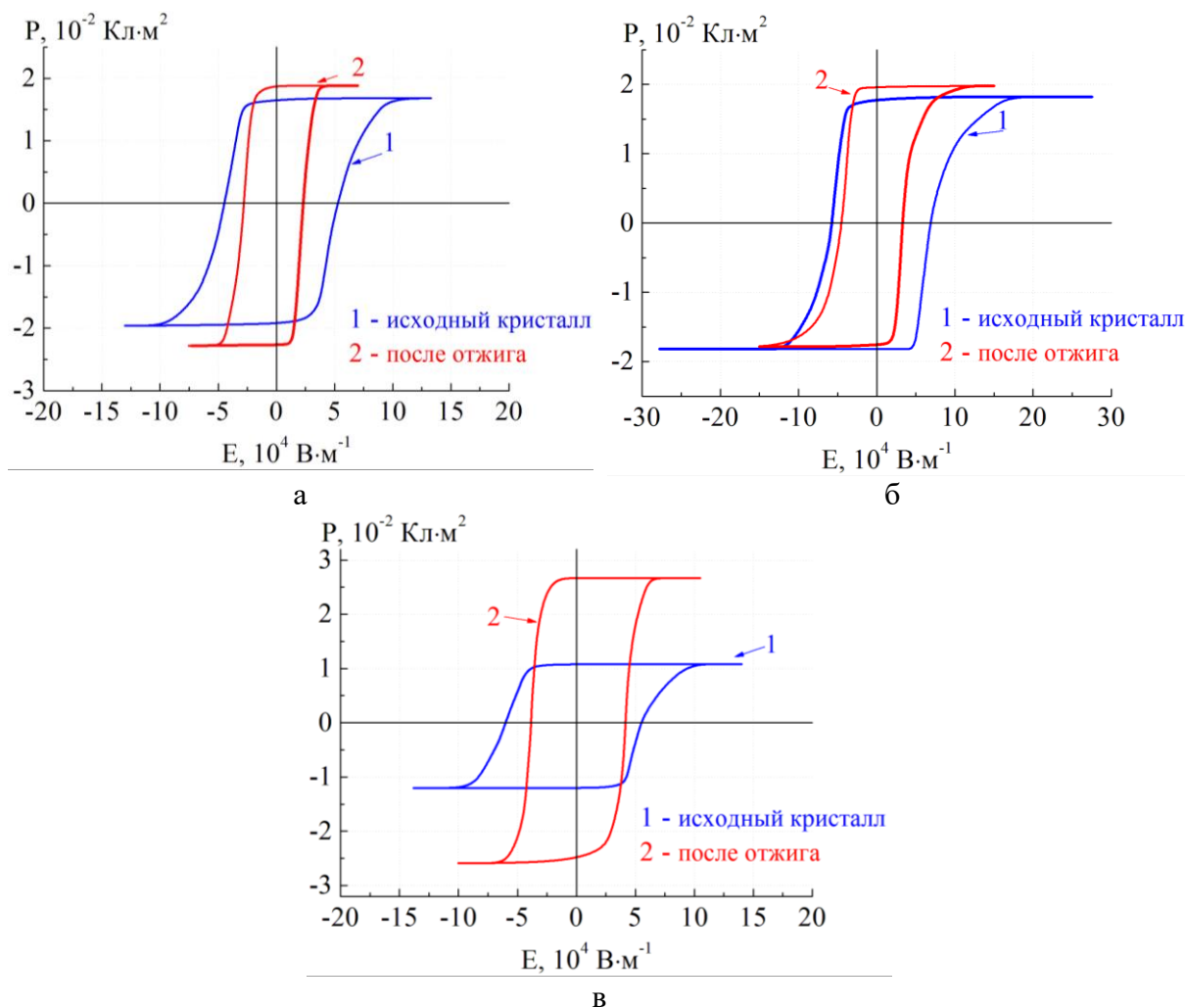


Рис. 1. Вид петель диэлектрического гистерезиса для кристаллов ТГС: Cu^{2+} :
а – $4,2 \cdot 10^{-3}$ вес.%; б – $7,7 \cdot 10^{-3}$ вес.%; в – $8,7 \cdot 10^{-3}$ вес.%.

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. После отжига кристаллы сохраняют незначительную униполярность, при этом появляются заметные поля смещения (см. рис. 1 а-в), прямоугольность петель гистерезиса не нарушается. В Таблице 2 приведены результаты измерений и расчета диэлектрических проницаемостей и характеристик петли гистерезиса для исследуемых кристаллов при температуре $25^{\circ}C$ [4].

Анализ табличных данных показывает, что в случае естественно униполярных кристаллов с увеличением концентрации примеси значение коэффициента униполярности и эффективной диэлектрической проницаемости возрастают, а переключаемой поляризации уменьшаются. Для отожженных образцов значения относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей и переключаемой поляризации

увеличиваются с ростом концентрации примесей. Однозначной концентрационной зависимости коэрцитивного поля, тангенса угла диэлектрических потерь и коэффициента униполярности для исследуемых кристаллов не прослеживается. Отжиг приводит к увеличению значений ε_{eff} в среднем на 30%. Различия значений относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей связано с вкладом доменной структуры в процессы переключения образцов.

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

Характеристики	Состояние образцов	Концентрации Cu^{2+} , 10^{-3} вес.%					
		4,2	7,4	7,7	8,1	8,6	8,7
ε	исходный	40	50	50	40	50	40
	после отжига	42	31	30	34	45	54
$\varepsilon_{eff}, 10^3$	исходный	16	20	75	30	50	50
	после отжига	17	42	80	62	53	67
$P, 10^{-2}, Кл·м^{-2}$	исходный	1,8	2,0	1,8	2,0	1,2	1,2
	после отжига	2,1	2,2	2,1	2,5	2,3	2,5
$E_c, 10^4, В·м^{-1}$	исходный	4,9	6,4	6,3	7,2	4,8	5,6
	после отжига	2,6	4,6	3,9	6,3	4,4	4,0
η	исходный	0,3	0,2	0,1	0,4	0,5	0,5
	после отжига	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2
$tg\delta$	исходный	0,08	0,11	0,07	0,05	0,07	0,07
	после отжига	0,09	0,13	0,11	0,13	0,11	0,12

Величины переключаемой поляризации в результате отжига образцов возрастают в среднем на 24%, а коэрцитивного поля уменьшаются на 27%. С ростом содержания меди в кристалле значения коэффициента униполярности для естественно униполярных образцов имеют тенденцию к возрастанию.

Отжиг приводит к уменьшению коэффициента униполярности и увеличению тангенса угла диэлектрических потерь кристаллов в среднем на 9%.

На рис. 2 приведены результаты исследования процессов переполаризации кристаллов ТГС: Cu^{2+} в переменных полях различной напряженности, где представлены типичные полевые зависимости переключаемой поляризации. Видно, что для образца ТГС, содержащего 4,2 вес. % примеси меди в интервале полей $(0,9-15) \cdot 10^3 В \cdot м^{-1}$ кривые $P(E)$ монотонно возрастают. Это свидетельствует о включении в процесс переполаризации всё новых доменов. В более высоких полях зависимости $P(E)$ выходят на насыщение, что соответствует поляризованному состоянию образца.

Полевые зависимости переключаемой поляризации для кристалла ТГС: Cu^{2+} , содержащего $7,7 \cdot 10^{-3}$ вес.% примеси, показаны на рис. 2 б. Ход

зависимости $P(E)$ для этого образца (до его отжига) не имеет существенных отличий от приведенной на рис. 2 а. В этом случае зависимость $P(E)$ выходит на насыщение в полях, превышающих $35 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. После отжига образца монотонный рост кривой $P(E)$ наблюдается в полях $(1,8-30) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

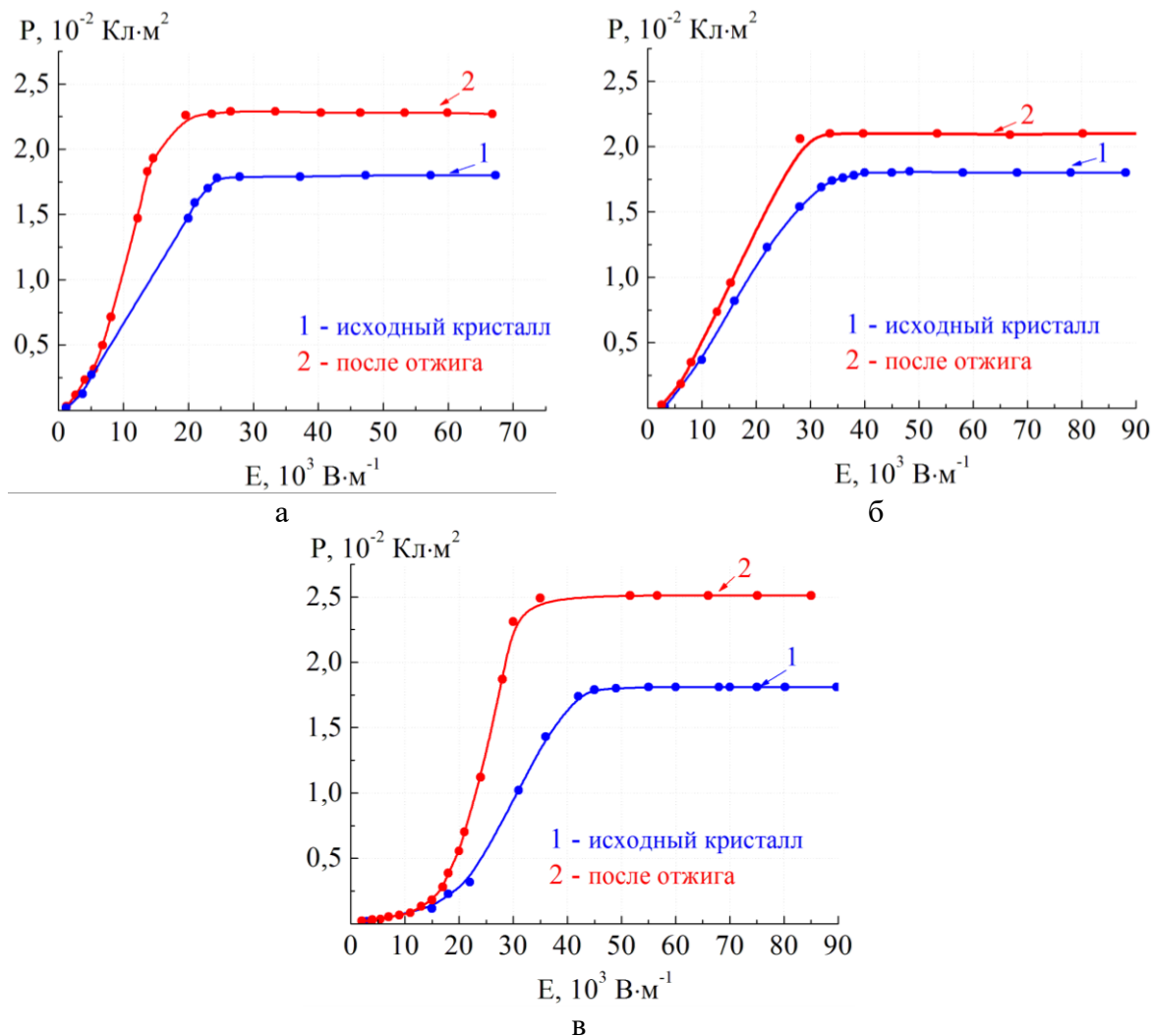


Рис. 2. Полевые зависимости переключаемой поляризации, полученные для кристаллов ТГС: Cu^{2+} : а – $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ вес.}\%$; б – $7,7 \cdot 10^{-3} \text{ вес.}\%$; в – $8,7 \cdot 10^{-3} \text{ вес.}\%$.

В случае неотожженного образца №б величина переключаемой поляризации возрастает при напряженностях переполаризующего поля от $1,3 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ до $40 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. В результате его отжига монотонный рост кривой $P(E)$ наблюдается в полях $(1,3-30) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Результаты расчета эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} для кристаллов ТГС: Cu^{2+} приведены на рис. 3. Из полевых зависимостей ϵ_{eff} , полученных для образца №1 до и после его отжига (см. рис. 3 а), видно, что в интервале полей порядка $(4-15) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ кривые $\epsilon_{\text{eff}}(E)$ монотонно

возрастают и в полях $(15-20) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ проходят через максимумы. С дальнейшим увеличением поля наблюдается уменьшение значений эффективной диэлектрической проницаемости.

Полевые зависимости эффективной диэлектрической проницаемости для образца ТГС, содержащего $7,7 \cdot 10^{-3}$ вес% меди, приведены на рис. 3 б. Кривые $\varepsilon_{\text{эф}}(E)$ резко возрастают в интервале полей $(3-25) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, а максимумы соответствуют полям порядка $30 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ и $40 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

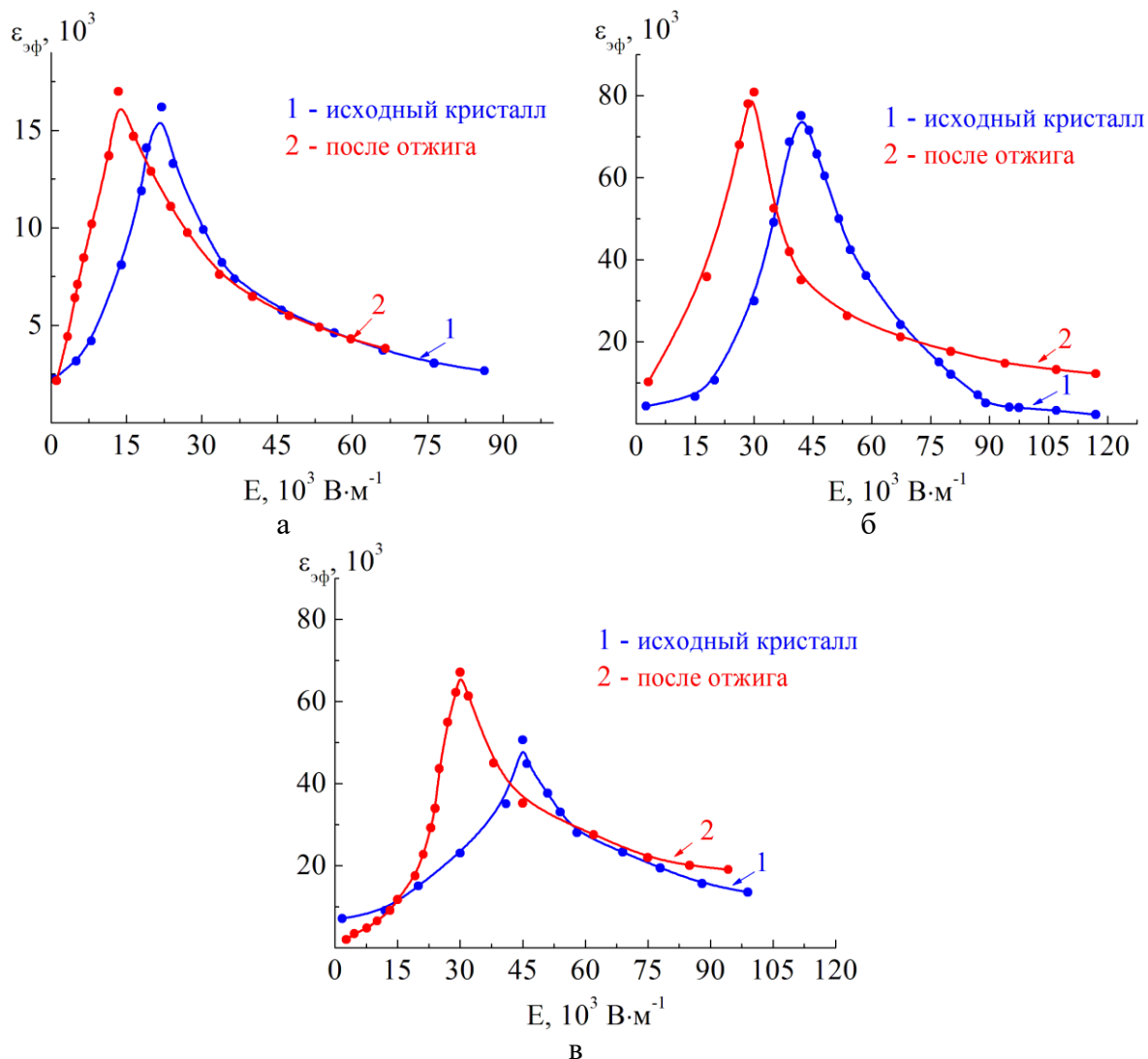


Рис. 3. Полевые зависимости эффективной диэлектрической проницаемости, полученные для кристалла ТГС: Cu^{2+} : а $4,2 \cdot 10^{-3}$ вес.%; б $7,7 \cdot 10^{-3}$ вес.%; в $8,7 \cdot 10^{-3}$ вес.%.

Полевые зависимости эффективной диэлектрической проницаемости образца №6 приведены на рис. 3 в. До отжига зависимость $\varepsilon_{\text{эф}}(E)$ монотонно возрастает в интервале полей $(2-45) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. После отжига максимум кривой $\varepsilon_{\text{эф}}(E)$ смещается в область более низких полей и соответствует напряжённости переполяризующего поля $\sim 30 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Увеличение значений эффективной диэлектрической проницаемости кристаллов ТГС: Cu^{2+} в интервале полей до достижения ϵ_{max} можно связать с ролью доменного механизма в процессах переключения. С ростом напряженности электрического поля в процесс переполяризации включаются всё новые домены. Это вносит вклад в увеличение значений диэлектрической проницаемости. В высоких полях происходит стабилизация доменной структуры, что приводит к уменьшению ее значений.

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 на свежем сколе образца.

Известно [1-5], 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. Матрица основного домена составляет ~50% объёма образца.

Доменная структура кристаллов ТГС: Cu^{2+} (см. рис. 4) имеет существенные отличия. В матрице основного домена выявляются линзовидные микродомены, которые занимают ~30% объема образца, а также ламелеобразные домены замкнутой формы (см. рис. 4 а).

Бомбардировка поверхности образца электронами с кинетической энергией $4,8 \cdot 10^{-16}$ Дж (ускоряющее напряжение 3 кВ) сопровождается увеличением размеров как микророзродышей, так и ламелеобразных доменов. При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения происходит объединение линзообразных и ламелеобразных доменов (см. рис. 4 в, г).

Влияние отжига кристаллов на их доменную структуру иллюстрирует рис. 4 г-е. Исходная доменная структура отожжённого кристалла представлена матрицей основного домена, рядами микророзродышей и ламелеобразными доменами, занимающими порядка 30% объема образца (см. рис. 4 г). Образование рядов зародышей свидетельствует о высоком значении (порядка коэрцитивного) внутреннего поляризующего поля кристалла. Отжиг увеличивает подвижность доменных стенок кристалла, что способствует преобразованию линзовидных зародышей доменов в ламели (см. рис. 4 д, е). Полученные закономерности согласуются с приведенными в работах [10-12].

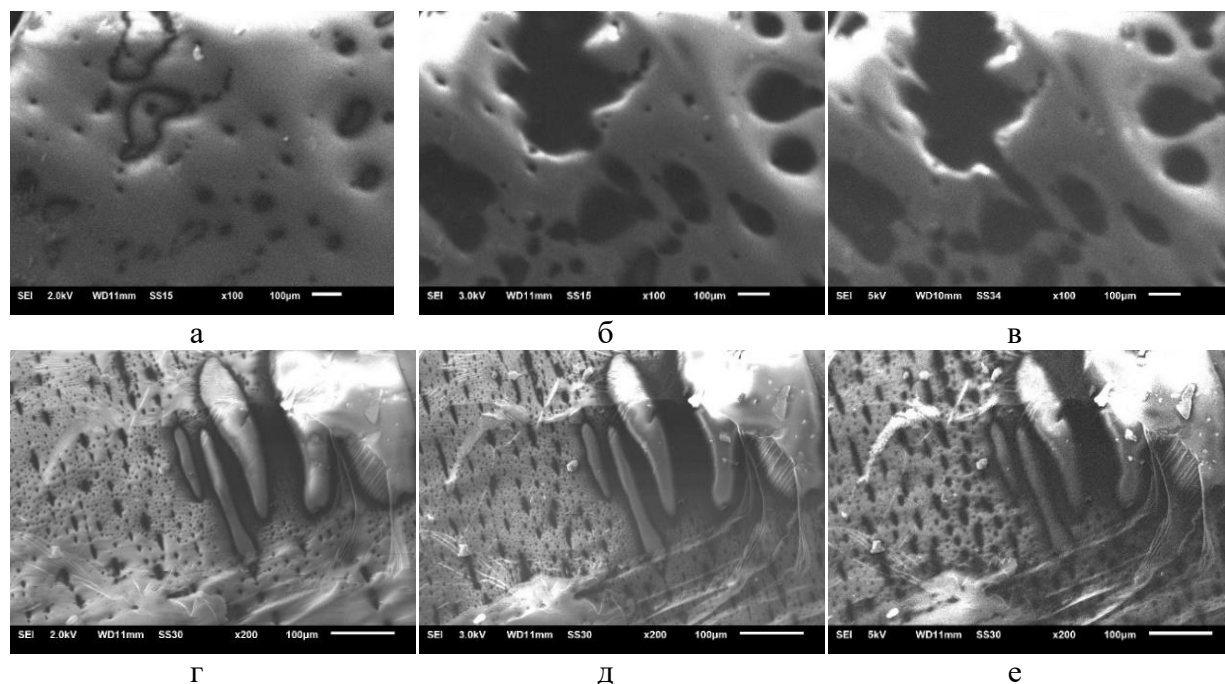


Рис. 4. Изображения доменной структуры кристалла ТГС: Cu^{2+} , полученные с помощью РЭМ при различных ускоряющих напряжениях: а, г – 2,0; б, д – 3,0; в, е – 5,0 кВ; а,б,в – до отжига кристаллов; г,д,е – после отжига.

Монокристаллический триглицинсульфат и его изоморфы перспективны для использования в качестве преобразователей инфракрасного излучения. Структурная модификация кристаллов в процессе выращивания производится с целью стабилизации их доменной структуры при сохранении характеристик переключения.

Поведение характеристик переключения и диэлектрических свойств кристаллов ТГС: Cu^{2+} связаны с особенностями вхождения этих примесей в кристаллическую решетку при их выращивании. В кристаллах ТГС: Cu^{2+} домены стремятся расположиться перпендикулярно слоям нарастания грани (100). 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 $[CuGl_2]^0$ в плоскости (101) с координационным числом 4.

4. Заключение

Показано, что петли диэлектрического гистерезиса для кристаллов ТГС: Cu^{2+} не имеют искажений. При этом, после отжига кристаллы сохраняют незначительную униполярность, прямоугольность петель гистерезиса не нарушается.

Значения относительной и эффективной диэлектрических проницаемостей и переключаемой поляризации для кристаллов ТГС: Cu^{2+}

увеличиваются с ростом концентрации примесей. Однозначной концентрационной зависимости коэрцитивного поля, тангенса угла диэлектрических потерь и коэффициента униполярности для исследуемых кристаллов не прослеживается.

Полевые зависимости переключаемой поляризации для исследованных кристаллов монотонно возрастают до полей порядка $(20-40) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, в более высоких полях они выходят на насыщение. После отжига кристаллов интервал монотонного роста кривых $P(E)$ смещается в область более низких полей.

Полевые зависимости эффективной диэлектрической проницаемости для кристаллов ТГС: Cu^{2+} имеют экстремумы. До отжига образцов максимумы кривых $\varepsilon_{\text{eff}}(E)$ соответствуют полям порядка $(20-40) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, а для отожженных образцов эти поля составляют порядка $(15-30) \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Доменная структура кристалла состоит из матрицы основного домена и ламелеобразных доменов, занимающих порядка 30% объема образца. Отжиг образцов увеличивает подвижность доменных стенок и способствует преобразованию линзовидных зародышей доменов в ламели.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета. Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007).

Библиографический список:

1. **Ehses, K.H.** The influence of defects on the critical behaviour of TGS and TGSE / K.H. Ehse, H. Wern // *Ferroelectrics*. – 1984. – V. 54. – I. 1. – P. 277-280. DOI: 10.1080/00150198408215869.
2. **Pandian, M.S.** Unidirectional crystal growth of L-alanine doped triglycine sulphate crystals along [010] polar direction in ferroelectric and paraelectric temperature ranges, and their comparative characterizations / M.S. Pandian, S. Verma, P. Karuppasamy et al. // *Materials Research Bulletin*. – 2021. – V. 134. – Art. № 111118. – 9 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.111118.
3. **Bekzika, B.** Crystal growth and domain structure of triglycine sulphate doped with Pt(II) / B. Bekzika, M. Havbánková // *Journal of Experimental and Industrial Crystallography. Crystal Research and Technology*. – 1987. – V. 22. – № 6. – P. 753-760. DOI: 10.1515/9783112485644-001.
4. **Большакова, Н.Н.** Термоиндуцированные доменные процессы в хромсодержащих кристаллах триглицинсульфата / Н.Н. Большакова, Е.В. Вахтеров, А.И. Иванова, Б.Б. Педько, Е.М. Семенова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 65-75. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.065.
5. **Batra, A.K.** Growth and optical characterization of doped triglycine sulfate (TGS) crystals / A.K. Batra, A. Alomari, P. Guggilla et al. // *Advanced Science, Engineering and Medicine*. – 2016. – V. 8. – № 9. – P. 689-694. DOI: 10.1166/asem.2016.1914.
6. **Novotny, J.** Growth of triglycine sulfate single crystals doped with Pt (IV) and L-alanin / J. Novotny, Z. Podvalova, J. Zelinka // *Crystal Growth & Design*. – 2003. – V. 3. – I. 3. – P. 393-395. DOI: 10.1021/cg034027g.
7. **Muralidharan, R.** Effect of rare-earth dopants on the growth and properties of triglycine sulphate single crystals / R. Muralidharan, R. Mohankumar, P.M. Ushasree, R. Jayavel, P. Ramasamy // *Journal of crystal growth*. – 2002. – V. 234. – I. 2-3. – P. 545-550. DOI: 10.1016/S0022-0248(01)01723-7.
8. **Muralidharan, R.** Investigations on the electrical and mechanical properties of triglycine sulphate single crystals modified with some rare earth metal ions / R. Muralidharan, R. Mohankumar, R. Dhanasekaran et al. // *Materials Letters*. – 2003. – V. 57. – I. 21. – P. 3291-3295. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00050-8.

9. **Mihaylova, E.** Ferroelectric behaviour of rare earth doped TGS / E. Mihaylova, S.T. Stoyanov // *Physica status solidi (a)*. – 1996. – V. 154. – I. 2. – P. 797-802. DOI: 10.1002/pssa.2211540233.
10. **Иванова, А.И.** Температурные наблюдения эволюции доменной структуры триглицинсульфа 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.
11. **Ikeda, S.** SEM imaging of ferroelectric domains / S. Ikeda, Y. Uchikawa // *Microscopy*. – 1980. – V. 29. – I. 3. – P. 209-217. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jmicro.a050236>.
12. **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.

References:

1. Ehses K.H., Wern H. The influence of defects on the critical behaviour of TGS and TGSE, *Ferroelectrics*, 1984, vol. 54, issue 1, pp. 277-280. DOI: 10.1080/00150198408215869.
2. Pandian M.S., Verma S., Karuppasamy P. et al. Unidirectional crystal growth of L-alanine doped triglycine sulphate crystals along [010] polar direction in ferroelectric and paraelectric temperature ranges, and their comparative characterizations, *Materials Research Bulletin*, 2021, vol. 134, art. no. 111118, 9 p. DOI: 10.1016/j.materresbull.2020.111118.
3. Bekzika B., Havbáňková M. Crystal growth and domain structure of triglycine sulphate doped with Pt(II), *Journal of Experimental and Industrial Crystallography. Crystal Research and Technology*, 1987, vol. 22, no. 6, pp. 753-760. DOI: 10.1515/9783112485644-001.
4. Bolshakova N.N., Vahterov E.V., Ivanova A.I., Ped'ko B.B., Semenova E.M. Termoinducirovannyye domennyye protsessy v khromsoderzhashchikh kristallakh triglitsinsulfata [Thermal-induced domain processes in triglycine sulfate crystals with chromium impurities], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 65-75. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.065. (In Russian).
5. Batra A.K., Alomari A., Guggilla P. et al. Growth and optical characterization of doped triglycine sulfate (TGS) crystals, *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 2016, vol. 8, no. 9, pp. 689-694. DOI: 10.1166/asem.2016.1914.
6. Novotny J., Podvalova Z., Zelinka J. Growth of triglycine sulfate single crystals doped with Pt (IV) and L-alanine, *Crystal Growth & Design*, 2003, vol. 3, issue 3, pp. 393-395. DOI: 10.1021/cg034027g.
7. Muralidharan R., Mohankumar R., Ushasree P.M., Jayavel R., Ramasamy P. Effect of rare-earth dopants on the growth and properties of triglycine sulphate single crystals, *Journal of crystal growth*, 2002, vol. 234, issue 2-3, pp. 545-550. DOI: 10.1016/S0022-0248(01)01723-7.
8. Muralidharan R., Mohankumar R., Dhanasekaran R. et al. Investigations on the electrical and mechanical properties of triglycine sulphate single crystals modified with some rare earth metal ions, *Materials Letters*, 2003, vol. 57, issue 21, pp. 3291-3295. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00050-8.
9. Mihaylova E., Stoyanov S.T. Ferroelectric behaviour of rare earth doped TGS, *Physica status solidi (a)*, 1996, vol. 154, issue 2, pp. 797-802. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.2211540233>.
10. 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, pp. 908-912. DOI: 10.1134/S1027451015050079.
11. Ikeda S., Uchikawa Y. SEM imaging of ferroelectric domains, *Microscopy*, 1980, vol. 29, issue 3, pp. 209-217. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jmicro.a050236>.
12. Nakatani N. Observation of ferroelectric domain structure in TGS, *Ferroelectrics*, 2011, vol. 413, issue 1, pp. 238-265. DOI: 10.1080/00150193.2011.554269.

Original paper

REPOLARIZATION PROPERTIES OF COPPER-CONTAINING CRYSTALS OF TRIGLYCINE SULFATE

N.N. Bolshakova¹, N.Yu. Druginina², A.I. Ivanova¹, D.N. Pavlova¹, B.B. Ped'ko¹, E.M. Semenova¹

¹*Tver State Technical University, Tver, Russia*

²*Military Academy of Air and Space Defence named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.050

Abstract: The paper presents the results of the analysis of experimental dielectric hysteresis loops and field dependens of polarization switching of initial and annealed crystals of triglycine sulfate, doped

copper (the concentration range (4,2–8,7) 10^{-3} wt.%). It has been experimentally established that their dielectric hysteresis loops do not have distortions. It has been found that the relative and effective permittivities and switchable polarization increase with increasing impurity concentration in crystals of TGS: Cu^{2+} . The field dependences of the effective permittivity have extrema: before annealing the samples, the maxima of the $\epsilon_{eff}(E)$ curves correspond to a field value of about $(20-40) \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, and for annealed samples these fields have a value of $\sim(15-30) \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Annealing of the samples increases the mobility of domain walls, which promotes the transformation of lenticular nuclei of domains into lamellae.

Keywords: triglycine sulfate, repolarization, domain structure, switching processes, hysteresis, permittivity.

Большакова Наталья Николаевна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Дружинина Наталья Юрьевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем ФГКВБОУ ВО «Военная академия воздушно-космическая обороны им. Маршала Советского Союза Г.К. Жукова» Минобороны РФ

Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Павлова Дарья Николаевна – студентка 4 курса направления 27.03.05 Инноватика, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Педько Борис Борисович – к.ф.-м.н., декан физико-технического факультета, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Nataly N. Bolshakova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Nataly Yu. Druginina – Ph. D., Docent, Military Academy of Air and Space Defense named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent, Applied Physics Department, Tver State University

Dariya N. Pavlova – 4th year student, Innovation Specialty, Tver State University

Boris B. Ped'ko – Ph. D., Dean of the Faculty of Physics and Technology, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 12.09.2022; после рецензирования/ revised: 08.10.2022; принята/accepted 10.10.2022.