

УДК 537.226.82+537.226.4

Оригинальная статья

Температурная эволюция диэлектрических характеристик пленок PVDF и P(VDF-TrFE), изготовленных методом 4D-печати

А.В. Солнышкин¹, Н.В. Востров¹, С.И. Гудков^{1,2}, А.Н. Белов³

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

²ФГБУН Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 6

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники»

124498, Россия, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1

a.solnyshkin@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.720

Аннотация: В работе исследованы пленки поливинилиденфторида и его сополимера с трифторэтиленом. Образцы изготавливались методом послойного наплавления раствора. Часть изготовленных пленок подвергалась поляризации в поле коронного разряда. Для изготовленных пленок было проведено исследование зависимостей диэлектрической проницаемости от температуры. Исследование показало, что для пленок поливинилиденфторида на зависимостях диэлектрической проницаемости от температуры не наблюдается максимум, так как предполагаемая температура сегнетоэлектрического фазового перехода имеет большее значение, чем температура плавления. Максимум на температурной зависимости диэлектрической проницаемости для поляризованных пленок сополимера винилиденфторида с трифторэтиленом смещен на 10°C в высокотемпературную область по сравнению с максимумом для неполяризованных пленок. При этом диэлектрическая проницаемость неполяризованных пленок имеет большие значения в сравнении с соответствующей величиной для поляризованных образцов. Это связано с увеличением доли β -фазы после поляризации, а также с внутренним электрическим полем, обусловленным объемным зарядом, образующимся в процессе поляризации на границах раздела фаз.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический полимер, аддитивные технологии, 4D-печать, 3D-печать, фазовый переход, диэлектрическая проницаемость, температура Кюри.

1. Введение

Поливинилиденфторид (PVDF – polyvinylidene fluoride) и его сополимер с трифторэтиленом (P(VDF-TrFE) – poly(vinylidene fluoride-co-tetrafluoroethylene)) привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным сегнетоэлектрическим свойствам. Эти материалы обладают переключаемой спонтанной поляризацией, а также значительным пиро- и пьезоэлектрическим откликом, что делает их перспективными кандидатами для различных применений, таких как устройства энергонезависимой памяти, функциональные элементы датчиков и микроэлектромеханических систем (MEMS – microelectromechanical systems) [1-4].

Развитие аддитивных технологий способствует росту интереса, проявляемого к данному методу при создании функциональных полимерных слоев [5, 6]. Одним из преимуществ использования полимерных сегнетоэлектрических материалов является возможность

© А.В. Солнышкин, Н.В. Востров, С.И. Гудков, А.Н. Белов, 2024

создания на их основе сложных трехмерных структур с использованием 3D-печати. В частности, пьезоэлектрические датчики, имеющие такую структуру, могут выигрывать у коммерческих плоских датчиков из-за увеличенного электромеханического отклика [7]. При этом актуальным остается исследование свойств полимерных пленок, изготовленных аддитивным методом производства. Так, использование пленок PVDF и P(VDF-TrFE) в пьезоэлектрических приложениях требует знания динамики изменения характеристик сегнетоэлектрических пленок при изменении температуры. В связи с этим в настоящей работе была изучена температурная эволюция диэлектрических характеристик пленок полимера PVDF и сополимера P(VDF-TrFE), синтезированных методом 4D-печати.

2. Объекты исследования и методика эксперимента

Ранее нами исследовались пленки PVDF, изготовленные методом FDM 3D-печати (FDM – fused deposition modeling, русс. моделирование методом послойного наплавления нити) [8]. В настоящей работе объектами исследования являлись пленки полимера PVDF и сополимера P(VDF-TrFE) 72/28 мол.%, синтезированные методом послойного наплавления раствора. Для изготовления пленок использовался модифицированный 3D-принтер Anycubic Chiron. Раствор изготавливался путем размешивания в течение часа гранулята PVDF (или P(VDF-TrFE)) в растворителе, представляющем собой смесь диметилсульфоксида и ацетона в соотношении 4/1, при температуре 100°C. Далее раствор помещался в специальные картриджи 3D-принтера. Процесс печати осуществлялся на разогретую алюминиевую пластину. Для испарения растворителя образцы выдерживались при температуре 100°C в течение 2 часов. В результате были получены образцы полимера PVDF и сополимера P(VDF-TrFE) 72/28 мол.% толщиной 7-15 мкм в зависимости от условий печати. Часть пленок полимера PVDF и сополимера P(VDF-TrFE) подвергалась предварительной поляризации в поле коронного разряда. Для этого образцы помещались на разогретую до 100°C латунную подложку. Данная подложка также служила нижним электродом. В качестве верхнего электрода выступала игла, размещенная на расстоянии 50 мм над латунной подложкой. Напряжение между электродами составляло 15 кВ. Для осуществления диэлектрических измерений на поверхности пленок методом термического напыления наносились алюминиевые электроды. Диаметр электродов составлял 10 мм. Исследования микроструктуры поверхности поляризованных и неполяризованных полимерных пленок выполнены с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ). Измерение диэлектрических характеристик пленок PVDF и P(VDF-TrFE), изготовленных методом 4D-печати, осуществлялось с использованием измерителя иммитанса E7-30.

Частота измерительного сигнала составляла 1 кГц.

3. Результаты исследования и их обсуждение

В пленках PVDF и P(VDF-TrFE), изготовленных методом 4D-печати и не подвергавшихся дополнительной обработке, наблюдается существование двух фаз: неполярной α -фазы и полярной β -фазы (см. рис. 1 а, в). Полярная β -фаза представлена стержнеобразными кристаллами, хаотично расположенными в матрице неполярной α -фазы. При этом доля кристалличности достаточно невелика. В процессе поляризации пленок в поле коронного разряда происходит значительное увеличение доли кристалличности (см. рис. 1 б, г). Таким образом, кроме ориентирующего воздействия поле коронного разряда приводит к переходу неполярной α -фазы в полярную β -фазу.

Результаты исследования зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры $\varepsilon(T)$ для поляризованных и неполяризованных пленок PVDF, изготовленных методом 4D-печати, представлены на рис. 2. Известно, что для объемных пленок PVDF предполагаемая температура сегнетоэлектрического фазового перехода имеет большее значение, чем температура плавления [9, 10]. Это исключает возможность наблюдения сегнетоэлектрического фазового перехода в пленках, находящихся в кристаллической β -фазе. В связи с этим температурные исследования диэлектрических характеристик выполнены до температур, имеющих величину близкую к температуре плавления β -фазы PVDF. Из рис. 2 видно, что значения диэлектрической проницаемости как поляризованных, так и неполяризованных пленок PVDF возрастают при повышении температуры вплоть до температуры плавления. При этом величина относительной диэлектрической проницаемости для неполяризованных пленок имеет большие значения на всем интервале температур, чем соответствующие значения для поляризованных пленок.

Результаты исследования зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для пленок P(VDF-TrFE) представлены на рис. 3. Диэлектрическая проницаемость неполяризованных пленок P(VDF-TrFE) монотонно возрастает с увеличением температуры. При температуре около 110°C относительная диэлектрическая проницаемость достигает своего максимального значения ($\varepsilon \approx 44,8$). Этот максимум свидетельствует о переходе из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу, а сегнетоэлектрическая температура Кюри T_c для неполяризованных пленок P(VDF-TrFE) составляет около 110°C.

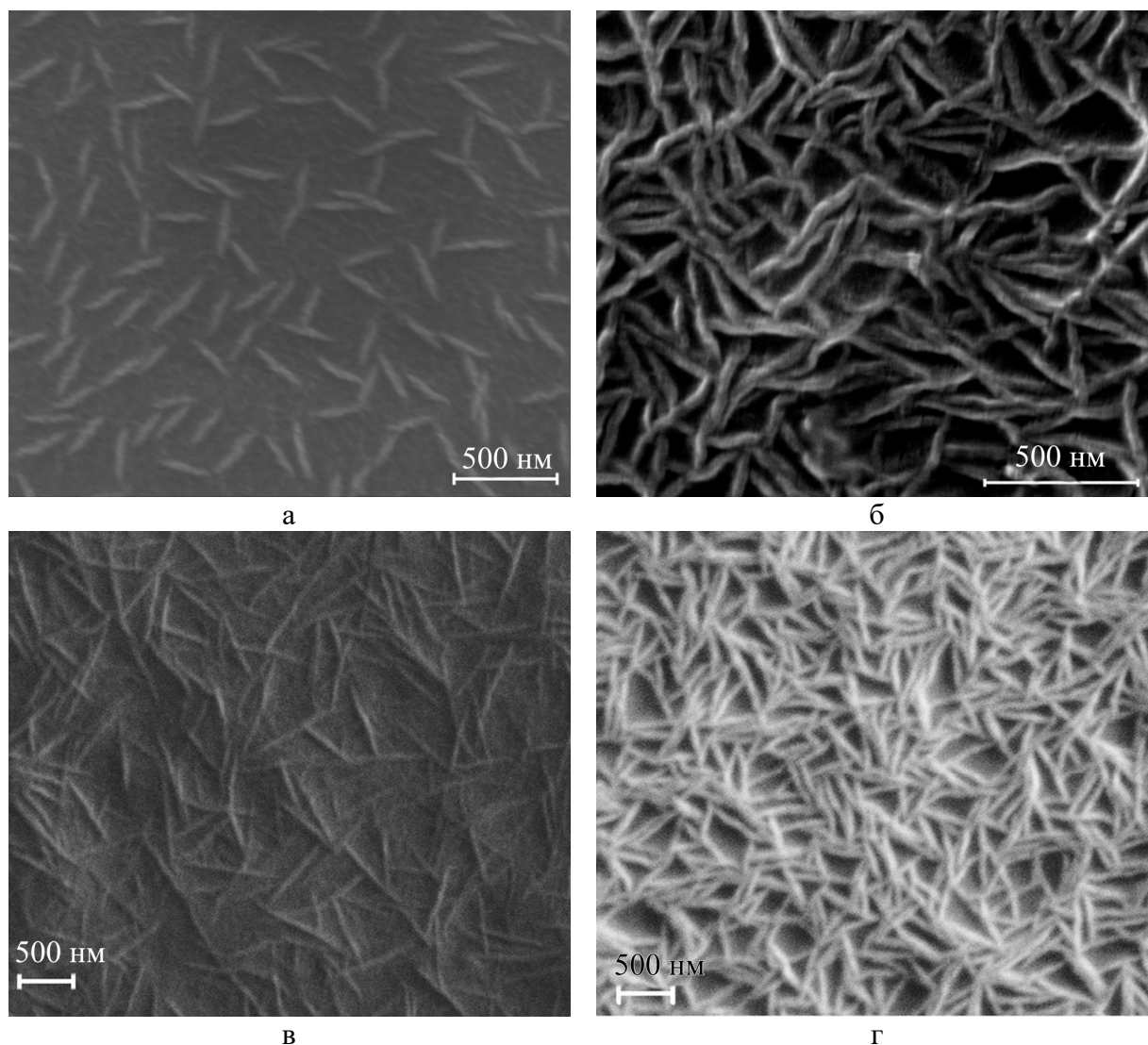


Рис. 1. Изображения поверхности неполяризованных (а, в) и поляризованных (б, г) пленок PVDF (а, б) и P(VDF-TrFE) (в, г), полученные с использованием РЭМ.

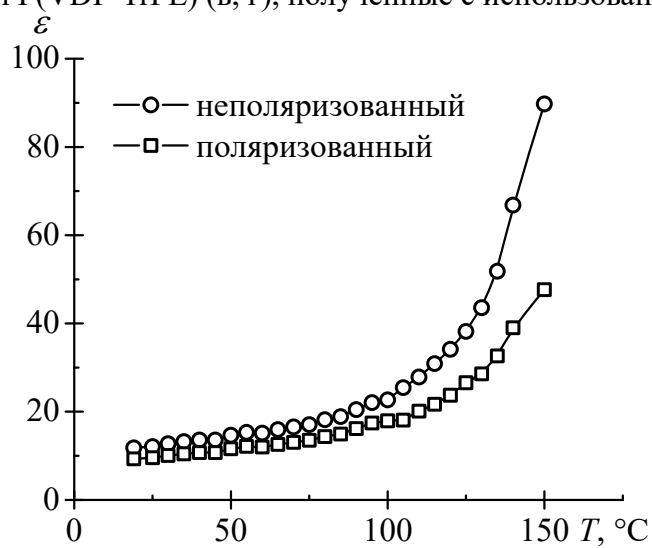


Рис. 2. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости для неполяризованных и поляризованных пленок PVDF, изготовленных методом 4D-печати.

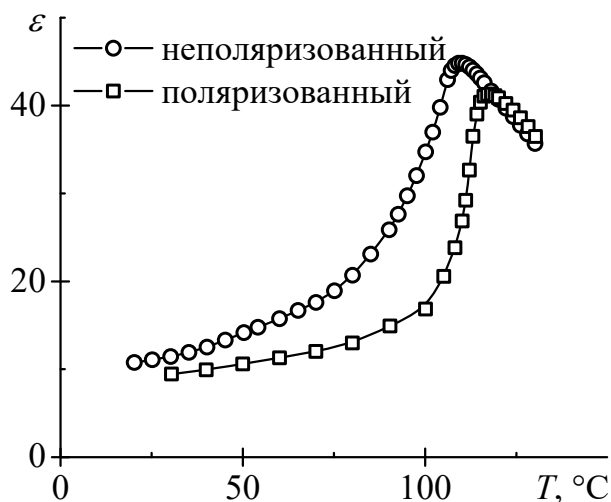


Рис. 3. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости для неполяризованных и поляризованных пленок P(VDF-TrFE), синтезированных методом 4D-печати.

Исследование температурной зависимости диэлектрических характеристик поляризованных образцов пленок сополимера P(VDF-TrFE) показало, что значения относительной диэлектрической проницаемости возрастают при увеличении температуры так же, как для неполяризованных пленок (см. рис. 3). Значения относительной диэлектрической проницаемости поляризованных образцов не превышают соответствующие значения для неполяризованных пленок во всем температурном интервале до температуры Кюри. Максимальное значение относительной диэлектрической проницаемости для поляризованной пленки составляет около 41,3. При этом из рис. 3 видно, что максимум температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости для поляризованных пленок смещен на 10°C в высокотемпературную область. Выше этой температуры зависимости для поляризованных и неполяризованных пленок практически совпадают. Таким образом, распад поляризованного состояния в поляризованных пленках происходит раньше, чем значения ϵ достигнут значений соответствующей величины для неполяризованных образцов.

Меньшие значения относительной диэлектрической проницаемости поляризованных образцов в сравнении со значениями аналогичной величины для неполяризованных пленок могут быть результатом процесса поляризации. Причиной могут служить два фактора. Во-первых, поляризация образцов при температурах, близких к температуре сегнетоэлектрического фазового перехода, приводит к увеличению доли полярной β -фазы [11]. Во-вторых, понижение диэлектрической проницаемости связано с внутренним электрическим полем, которое препятствует колебанию диполей и способствует устойчивому

поляризованному состоянию. Это поле обусловлено объемным зарядом, который образуется во время поляризации пленок на межфазных границах, в частности между α -фазой и β -фазой.

Для пленок сополимера P(VDF-TrFE) были построены зависимости $1/\chi(T)$, представленные на рис. 4 (χ – диэлектрическая восприимчивость, $\chi = \varepsilon - 1$).

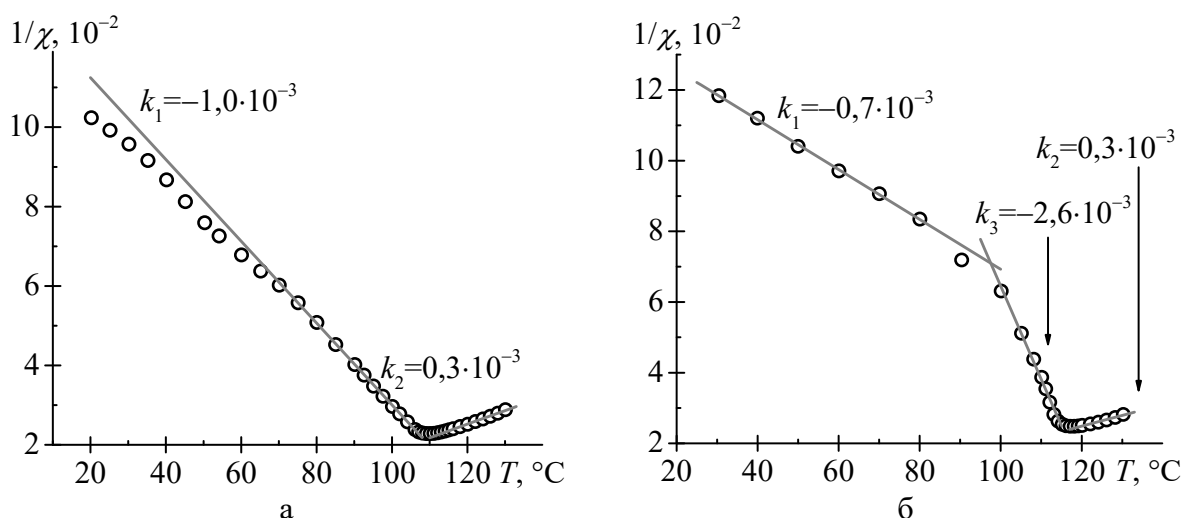


Рис. 4. Температурная зависимость обратной диэлектрической восприимчивости для неполяризованных (а) и поляризованных (б) пленок P(VDF-TrFE).

Известно, что сегнетоэлектрический фазовый переход в пленках сополимера P(VDF-TrFE) является фазовым переходом первого рода [12, 13]. Это является справедливым и для пленок, изготовленных методом 4D-печати. Отношение коэффициента наклона прямой k_1 на зависимости $1/\chi(T)$ для неполяризованных пленок в сегнетоэлектрической фазе к коэффициенту наклона прямой k_2 при температурах выше T_c составляет около -3,3, что характеризует данный фазовый переход как фазовый переход первого рода. Отсутствие явно выраженного скачка на зависимостях $1/\chi(T)$ связано, вероятнее всего, с тем, что дальний порядок кристаллической фазы нарушается аморфной фазой и чередованием мономеров VDF и TrFE в полимерной цепи.

С использованием закона Кюри-Вейсса

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_c} \quad (1)$$

была рассчитана константа Кюри C . Величина константы Кюри для неполяризованных пленок P(VDF-TrFE) составила 3100 К, а для поляризованных – 3500 К. Эти значения согласуются с известными значениями для пленок сополимера P(VDF-TrFE) и являются типичными для сегнетоэлектриков типа порядок-беспорядок [14, 15].

4. Заключение

Исследование температурной эволюции диэлектрических характеристик пленок полимера PVDF и сополимера P(VDF-TrFE), изготовленных методом 4D-печати, показало, что величина диэлектрической проницаемости поляризованных образцов имеет меньшие значения, чем соответствующая величина для неполяризованных образцов. Уменьшение диэлектрической проницаемости связано с увеличением доли β -фазы в пленках после проведения процесса поляризации, а также с внутренним электрическим полем, обусловленным объемным зарядом на границах раздела фаз и препятствующим колебанию диполей. Для пленок PVDF отсутствует возможность наблюдения сегнетоэлектрического фазового перехода, так как предполагаемая температура перехода имеет большие значения в сравнении с температурой плавления. Температура сегнетоэлектрического фазового перехода поляризованных пленок P(VDF-TrFE) смещена в высокотемпературную область на 10°C по сравнению с соответствующей величиной для неполяризованных пленок. Постоянная Кюри пленок сополимера P(VDF-TrFE) составляет 3100-3500 К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00224, <https://rscf.ru/project/23-22-00224/>).

Библиографический список:

1. **Guo, M.** Flexible robust and high-density FeRAM from array of organic ferroelectric nano-lamellae by self-assembly / M. Guo, J. Jiang, J. Qian et al. // *Advanced Science*. – 2019. – V. 6. – I. 6. – Art. № 1801931. – 9 p. DOI: 10.1002/advs.201801931.
2. **Melnikov, A.R.** Application of pyroelectric sensors based on PVDF films for EPR spectra detection by heat release / A.R. Melnikov, S.B. Zikirin, E.V. Kalneus et al. // *Sensors*. – 2021. – V. 21. – I. 24. – Art. № 8426. – 12 p. DOI: 10.3390/s21248426.
3. **Ducrot, P.H.** Optimization of PVDF-TrFE processing conditions for the fabrication of organic MEMS resonators / P.H. Ducrot, I. Dufour, C. Ayela // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – Art. № 19426. – 7 p. DOI: 10.1038/srep19426.
4. **Kim, H.** Integrated 3D printing and corona poling process of PVDF piezoelectric films for pressure sensor application / H. Kim, F. Torres, Y. Wu et al. // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – V. 26. – № 8. – Art. № 085027. – 15 p. DOI: 10.1088/1361-665X/aa738e.
5. **Белов, А.Н.** Планарная струйная печать локализованных структур Ni/P(VDF-TrFE)/Ni для пьезо- и пирозлектрических матриц / А.Н. Белов, Н.В. Востров, Г.Н. Пестов и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2023. – Вып. 15. – С. 637-648. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.637.
6. **Hon, K.K.B.** Direct writing technology – advances and developments / K.K.B. Hon, L. Li, I.M. Hutchings // *CIRP Annals*. – 2008. – V. 57. – I. 2. – P. 601-620. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.006.
7. **Bodkhe, S.** One-step solvent evaporation-assisted 3D printing of piezoelectric PVDF nanocomposite structures / S. Bodkhe, G. Turcot, F.P. Gosselin et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – V. 9. – I. 24. – P. 20833-20842. DOI: 10.1021/acsami.7b04095.
8. **Востров, Н.В.** Исследование физических свойств тонких пленок ПВДФ, изготовленных методом 4D-печати / Н.В. Востров, А.В. Солнышкин, И.М. Морсаков и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2022. – Вып. 14. – С. 561-571. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.561.
9. **Mai, M.** The thickness dependence of the phase transition temperature in PVDF / M. Mai, V. Fridkin, B. Martin et al. // *Physica B: Condensed Matter*. – 2013. – V. 421. – P. 23-27. DOI:

10.1016/j.physb.2013.04.002.

10. **Tashiro, K.** Phase transition at a temperature immediately below the melting point of poly(vinylidene fluoride) from I: A proposition for the ferroelectric Curie point / K. Tashiro, K. Takano, M. Kobayashi et al. // *Polymer*. – 1983. – V. 24. – I. 2. – P. 199-204. DOI: 10.1016/0032-3861(83)90133-7.

11. **Xia, W.M.** A crystal phase transition and its effect on the dielectric properties of a hydrogenated P(VDF-co-TrFE) with low TrFE molar content / W.M. Xia, Y.J. Gu, C.Y. You et al. // *RSC Advances*. – 2015. – V. 5. – I. 130. – P. 107557-107565. DOI: 10.1039/C5RA22904A.

12. **Ruf, R.** The ferroelectric phase transition of P(VDF-TrFE) polymers / R. Ruf, S. Bauer, B. Ploss // *Ferroelectrics*. – 1992. – V. 127. – I. 1. – P. 209-214. DOI: 10.1080/00150199208223372.

13. **Быстров, В.С.** Компьютерное моделирование свойств ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ) нанопленок при фазовом переходе и эмиссионная спектроскопия их поляризации / В.С. Быстров, Е.В. Парамонова, Ю.Д. Дехтяр и др. // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2011. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 273-297. DOI: 10.17537/2011.6.273.

14. **Furukawa, T.** Phenomenological aspect of a ferroelectric vinylidene fluoride/trifluoroethylene copolymer / T. Furukawa // *Ferroelectrics*. – 1984. – V. 57. – I. 1. – P. 63-72. DOI: 10.1080/00150198408012752.

15. **Menegotto, J.** Dielectric relaxation spectra in ferroelectric P(VDF-TrFE) copolymers / J. Menegotto, L. Ibos, A. Bernes et al. // *Ferroelectrics*. – 1999. – V. 228. – I. 1. – P. 1-22. DOI: 10.1080/00150199908226122.

References:

1. Guo M., Jiang J., Qian J. et al. Flexible robust and high-density FeRAM from array of organic ferroelectric nano-lamellae by self-assembly, *Advanced Science*, 2019, vol. 6, issue 6, art. no. 1801931, 9 p. DOI: 10.1002/adv.201801931.

2. Melnikov A.R., Zikirin S.B., Kalneus E.V. et al. Application of pyroelectric sensors based on PVDF films for EPR spectra detection by heat release, *Sensors*, 2021, vol. 21, issue 24, art. no. 8426, 12 p. DOI: 10.3390/s21248426.

3. Ducrot P.H., Dufour I., Ayela C. Optimization of PVDF-TrFE processing conditions for the fabrication of organic MEMS resonators, *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, art. no. 19426, 7 p. DOI: 10.1038/srep19426.

4. Kim H., Torres F., Wu Y. et al. Integrated 3D printing and corona poling process of PVDF piezoelectric films for pressure sensor application, *Smart Materials and Structures*, 2017, vol. 26, no. 8, art. no. 085027, 15 p. DOI: 10.1088/1361-665X/aa738e.

5. Belov A.N., Vostrov N.V., Pestov G.N. et al. Planarnaya struinaya pechat' lokalizovannykh struktur Ni/P(VDF-TrFE)/Ni dlya p'ezo- i piroelektricheskikh matrits [Planar jet printing of localized Ni/P(VDF-TrFE)/Ni structures for piezo- and pyroelectric matrixes], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 637-648. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.637. (In Russian).

6. Hon K.K.B., Li L., Hutchings I.M. Direct writing technology – advances and developments, *CIRP Annals*, 2008, vol. 57, issue 2, pp. 601-620. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.006.

7. Bodkhe S., Turcot G., Gosselin F.P. et al. One-step solvent evaporation-assisted 3D printing of piezoelectric PVDF nanocomposite structures, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9, issue 24, pp. 20833-20842. DOI: 10.1021/acsami.7b04095.

8. Vostrov N.V., Solnyshkin A.V., Morsakov I.M. et al. Issledovanie fizicheskikh svoystv tonkikh plenok PVDF, izgotovlennykh metodom 4D-pechati [Investigation of the physical properties of PVDF thin films obtained by 4D printing], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 561-571. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.561. (In Russian).

9. Mai M., Fridkin V., Martin B. et al. The thickness dependence of the phase transition temperature in PVDF, *Physica B: Condensed Matter*, 2013, vol. 421, pp. 23-27. DOI: 10.1016/j.physb.2013.04.002.

10. Tashiro K., Takano K., Kobayashi M. et al. Phase transition at a temperature immediately below the melting point of poly(vinylidene fluoride) from I: A proposition for the ferroelectric Curie point, *Polymer*, 1983, vol. 24, issue 2, pp. 199-204. DOI: 10.1016/0032-3861(83)90133-7.

11. Xia W.M., Gu Y.J., You C.Y. et al. A crystal phase transition and its effect on the dielectric properties of a hydrogenated P(VDF-co-TrFE) with low TrFE molar content, *RSC Advances*, 2015, vol. 5, issue 130, pp. 107557-107565. DOI: 10.1039/C5RA22904A.

12. Ruf R., Bauer S., Ploss B. The ferroelectric phase transition of P(VDF-TrFE) polymers, *Ferroelectrics*, 1992, vol. 127, issue 1, pp. 209-214. DOI: 10.1080/00150199208223372.

13. Bystrov V.S., Paramonova E.V., Dekhtyar Y.D. et al. Computational studies of PVDF and P(VDF-TrFE) nanofilms polarization during phase transition revealed by emission spectroscopy, *Mathematical Biology and*

Bioinformatics, 2011, vol. 6, no. 2, pp. t14-t35. DOI: 10.17537/2011.6.t14.

14. Furukawa T. Phenomenological aspect of a ferroelectric vinylidene fluoride/trifluoroethylene copolymer, *Ferroelectrics*, 1984, vol. 57, issue 1, pp. 63-72. DOI: 10.1080/00150198408012752.

15. Menegotto J., Ibos L., Bernes A. et al. Dielectric relaxation spectra in ferroelectric P(VDF-TrFE) copolymers, *Ferroelectrics*, 1999, vol. 228, issue 1, pp. 1-22. DOI: 10.1080/00150199908226122.

Original paper

**Temperature evolution of dielectric characteristics of PVDF and P(VDF-TrFE) films produced
by 4D printing**

A.V. Solnyshkin¹, N.V. Vostrov¹, S.I. Gudkov^{1,2}, A.N. Belov³

¹*Tver State University, Tver, Russia*

²*Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.720

Abstract: In this work, films of polyvinylidene fluoride, copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene have been studied. The samples were made by direct ink writing technology. Some of the produced films were polarized in the corona discharge field. The dependences of the relative permittivity on temperature were studied for the films. The study showed that for polyvinylidene fluoride films, no maximum is observed in the dependences of the permittivity on temperature, since the assumed temperature of the ferroelectric phase transition is higher than the melting temperature. The maximum in the temperature dependence of permittivity for polarized copolymer of vinylidene fluoride and trifluoroethylene films is shifted by 10°C toward higher temperatures compared to the maximum for non-polarized films. In this case, the permittivity of non-polarized films has higher values compared to the corresponding value for polarized samples. This is due to an increase in the proportion of the β -phase after polarization, as well as to the internal electric field caused by the space charge formed during the polarization process at the phase boundaries.

Keywords: *ferroelectric polymer, additive technologies, 4D printing, 3D printing, phase transition, permittivity, Curie temperature.*

Солнышкин Александр Валентинович – д.ф.-м.н., профессор кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Востров Никита Владимирович – младший научный сотрудник управления научных исследований ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Гудков Сергей Игоревич – к.ф.-м.н., младший научный сотрудник управления научных исследований ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»; ведущий инженер ФГБУН «Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН»

Белов Алексей Николаевич – д.т.н., профессор Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Alexander V. Solnyshkin – Dr. Sc., Professor, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Nikita V. Vostrov – Junior Researcher, Management of Scientific Research, Tver State University

Sergey I. Gudkov – Ph. D., Junior Researcher, Management of Scientific Research, Tver State University; Lead Engineer, Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS

Alexey N. Belov – Dr. Sc., Professor, Institute of Integrated Electronics named after Academician K.A. Valiev, National Research University of Electronic Technology

Поступила в редакцию/received: 11.08.2024; после рецензирования/revised: 02.09.2024; принята/accepted 07.09.2024.