

Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 538.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15201>

РОЛЬ ЭЛЕКТРЕТНОГО ЭФФЕКТА В ФОРМИРОВАНИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ПЛЕНКАХ СОПОЛИМЕРА ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА С ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНОМ

Ю. И. Сотова [✉], **Ю. А. Гороховатский**, **Д. Э. Темнов**

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена,

Санкт-Петербург, Россия

[✉] juliasotova1992@mail.ru

Аннотация. С целью выяснения механизма формирования пьезоэлектрического состояния, в работе изучено явление поляризации полимерных пленок сополимера поливинилиденфторида с тетрафторэтиленом (П(ВДФ-ТФЭ)) в поле коронного разряда при повышенной температуре. Для анализа процессов накопления и релаксации зарядов, происходящих в П(ВДФ-ТФЭ) при поляризации, применялась спектроскопия токов термостимулированной деполяризации. Полученные результаты позволили обнаружить взаимосвязь процессов формирования электретного и пьезоэлектрического состояний в П(ВДФ-ТФЭ), а также объяснить указанный механизм. На этой основе была разработана и опробована методика поляризации в поле коронного разряда, позволяющая снизить вероятность электрического пробоя, приводящего к механическим повреждениям пленок, а также улучшить ключевые характеристики исследованных объектов.

Ключевые слова: электретное состояние, поливинилиденфторид, тетрафторэтилен, пьезоэлектрический эффект, спектроскопия токов термостимулированной деполяризации

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации (проект № FSZN-2020-0026).

Для цитирования: Сотова Ю. И., Гороховатский Ю. А., Темнов Д. Э. Роль электретного эффекта в формировании пьезоэлектрического состояния в пленках сополимера поливинилиденфторида с тетрафторэтиленом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 2. С. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15201>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15201>

THE ROLE OF THE ELECTRET EFFECT IN THE FORMATION OF THE PIEZOELECTRIC STATE IN THE POLYVINYLIDENE FLUORIDE-TETRAFLUOROETHYLENE COPOLYMER FILMS

Yu. I. Sotova ✉, **Yu. A. Gorokhovatsky**, **D. E. Temnov**

Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia

✉ juliasotova1992@mail.ru

Abstract. In this work, the phenomenon of polarization of polyvinylidene fluoride-tetrafluoroethylene copolymer (P(VDF-TFE)) polymer films in the field of a corona discharge at elevated temperatures has been studied in order to elucidate the mechanism of formation of the piezoelectric state. The TSD spectroscopy was used to analyze the charge accumulation and relaxation processes occurring in the (P(VDF-TFE)) films during polarization. The results obtained made it possible to reveal an interrelationship of forming the electret and piezoelectric states in the (P(VDF-TFE)) as well as to explain the mentioned mechanism. On this basis a polarization procedure in the field of the corona discharge was developed and tested. This procedure permitted reducing the probability of electrical breakdown leading to mechanical damage of the films and allowed improving key characteristics of the objects under question.

Keywords: electret state, polyvinylidene fluoride, tetrafluoroethylene, piezoelectric effect, TSD spectroscopy

Funding: The research was supported by the Ministry of Education of Russian Federation as a part of a state task (project No. FSZN-2020-0026).

For citation: Sotova Yu. I., Gorokhovatsky Yu. A., Temnov D. E., The role of the electret effect in the formation of the piezoelectric state in the polyvinylidene fluoride-tetrafluoroethylene copolymer films, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 15 (2) (2022) 8–16. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15201>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Впервые пьезоэлектрические свойства в поливинилиденфториде (ПВДФ) были обнаружены японским физиком Х. Каваи в 1969 году [1]. Однако имеются определенные трудности изготовления пьезопленки из гомополимера ПВДФ, связанные с высоким коэрцитивным полем (порядка 10^8 В/м, что на два порядка выше, чем у пьезокерамики) [2], поэтому обычно в качестве пьезоэлементов используются пьезоэлектрические полимеры с более низкой величиной коэрцитивного поля – соединения на основе сополимеров винилиденфторида с трифторэтиленом П(ВДФ-ТрФЭ) и винилиденфторида с тетрафторэтиленом П(ВДФ-ТФЭ). Стоит отметить, что пьезоэлектрические свойства и в гомополимере ПВДФ, и в сополимерах на его основе проявляются лишь после неоднократной предварительной вытяжки, что приводит к удлинению в несколько раз, по сравнению с первоначальной длиной [3, 4].

ПВДФ проявляет полиморфизм и существует в пяти различных кристаллических модификациях, которые обозначаются как α -, β -, γ -, δ - и ϵ -фазы [5]. Наибольший интерес исследователей привлекает β -фаза, поскольку она обладает пьезоэлектрическими свойствами [6].

Существует несколько способов создания пьезоэлектрического состояния в полимерных пленках на основе ПВДФ. Один из традиционных – это поляризация пленки в поле коронного разряда при повышенной температуре. Популярность способа связана с тем, что при коронной поляризации достигаются большие значения полей (по сравнению с таковыми при контактной поляризации) [7]. Однако в ходе поляризации в поле коронного разряда при повышенной температуре происходит электрическое старение полимерных пленок: с увеличением температуры поляризации возрастает вероятность электрического пробоя, а это приводит к механическим повреждениям полимерных пленок.

Цель настоящего исследования состояла в поиске взаимосвязи процессов формирования электретного и пьезоэлектрического состояний в пленках П(ВДФ-ТФЭ), а также в модификации технологии создания пьезоэлектрического состояния в полимерных пленках на основе ПВДФ, которая бы позволяла снизить вероятность электрического пробоя выбранного объекта при сохранении либо возможном улучшении его ключевых свойств.

Образцы и методы исследования

Объектом исследования служила пленка сополимера П(ВДФ-ТФЭ) торговой марки Ф2МЭ толщиной 20 мкм, предварительно вытянутая механически. В образцах создавалось пьезоэлектрическое состояние под действием поля коронного разряда, но при разных условиях поляризации.

Для исследования процессов накопления и релаксации зарядов, происходящих в П(ВДФ-ТФЭ) при поляризации, применялся метод термостимулированных токов деполяризации (ТСД). Измерения ТСД проводились на установке TSC II фирмы «Сетарам» (г. Лион, Франция).

Измерение пьезомодуля d_{33} осуществлялось динамическим методом с помощью прибора D33meter (г. Янчжоу, Китай).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Традиционная процедура создания пьезоэлектрического состояния в сополимере П(ВДФ-ТФЭ) с помощью поля коронного разряда заключается в следующем: образец помещают в указанное поле при повышенной температуре, выдерживают в нем 10 мин (поддерживая постоянную температуру), а затем охлаждают до комнатной температуры в этом же поле. Ранее экспериментально было установлено, что для достижения лучших электретных характеристик поляризацию необходимо проводить в поле отрицательного коронного разряда [8].

Известно, что величина напряженности электрического поля, необходимого для получения пьезомодуля d_{33} высокого уровня, составляет 1,2 МВ/см [9]. Температуру поляризации мы варьировали от 50 до 80°C.

На рис. 1 представлены кривые ТСД в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных в поле отрицательного коронного разряда, при различной температуре поляризации. Из полученных данных видно, что при невысокой температуре поляризации (50 – 60°C) на кривых ТСД наблюдается один пик при температуре около 50 °С, а с увеличением температуры поляризации (70 и 80°C) на кривых появляются два сильно перекрывающихся пика (в районе 40 – 70°C). Изменение можно объяснить тем, что при поляризации пленок в поле отрицательного коронного разряда происходит захват гомозаряда глубокими приповерхностными ловушками. Сам гомозаряд в образце П(ВДФ-ТФЭ) не дает вклада в пьезоэффект, однако в образовавшемся внутреннем электрическом поле гомозаряда происходит ориентация полярных структур (они имеются в составе пьезоэлектрической β -фазы ПВДФ). По всей видимости, имеется два сорта полярных структур с различными энергиями активации. При поляризации в поле коронного разряда при темпера-

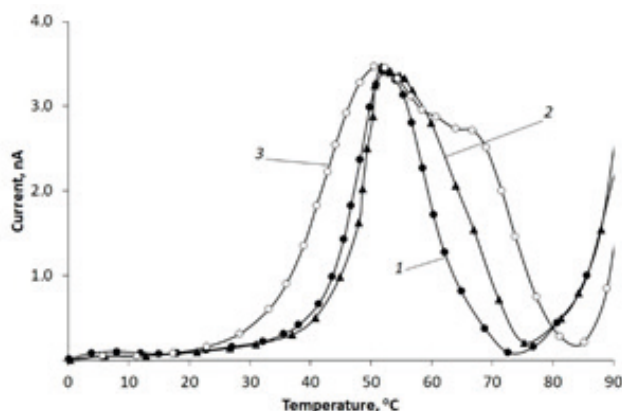


Рис. 1. Термостимулированные токи деполяризации в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных в поле отрицательного коронного разряда при различной температуре поляризации, °С: 50 (1), 70 (2) и 80 (3)



туре $50 - 70^\circ\text{C}$ во внутреннем электрическом поле гомозаряда ориентируются полярные структуры только одного сорта (с меньшей энергией активации, их пик тока расположен при температуре около 50°C), а увеличение температуры поляризации до 80°C приводит к ориентации обоих сортов полярных структур, что проявляется в появлении двух сильно перекрывающихся пиков на кривых ТСД (в температурном интервале $40 - 70^\circ\text{C}$).

В таком случае возникает возможность оценить величины энергии активации и частотного фактора для полярных структур в образцах П(ВДФ-ТФЭ), для которых характерна меньшая энергия активации (табл. 1); образцы подвергались поляризации при различных температурах. Вычисления были выполнены методом начального подъема пикового значения тока и методом варьирования скорости нагрева образцов [10].

Проведена также оценка величины энергии активации гомозаряда в случае отрицательной полярности коронирующего электрода (на рис. 1 высвобождение гомозаряда из приповерхностных ловушек проявляется нарастанием тока выше 80°C) методом начального подъема. Полученное значение составило $(1,90 \pm 0,09)$ эВ. Аналогичный расчет для случая положительной полярности коронирующего электрода дал значение энергии активации гомозаряда, равное $(1,20 \pm 0,06)$ эВ.

Анализ зависимости пьезомодуля d_{33} от температуры поляризации (рис. 2), приводит к заключению, что сразу после поляризации (кривая 1) значения пьезомодуля высокие (в интервале $24 - 26$ пКл/Н) и лишь незначительно зависят от температуры поляризации. Однако важной характеристикой пьезоэлектрических свойств выступает не только сама величина пьезомодуля, но и ее температурная стабильность.

Для проверки температурной стабильности полученных значений пьезомодуля d_{33} , пленки П(ВДФ-ТФЭ) выдерживали в термостате при температуре 70°C в течение двух с половиной часов. В результате было обнаружено, что пьезомодуль в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных при невысокой температуре ($50 - 70^\circ\text{C}$), значительно уменьшился после выдержки в термостате (см. кривую 2 на рис. 2).

Таким образом, эта величина, полученная при температуре поляризации ниже 70°C , оказывается нестабильной. Поляризация же при температуре $80 - 90^\circ\text{C}$ приводит к образованию стабильного значения пьезомодуля.

Таблица 1

Результаты определения ключевых характеристик полярных структур в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных при различных температурах

Метод определения W	Энергия активации W , эВ, при температуре поляризации		
	50°C	70°C	80°C
Метод начального подъема пикового значения тока	$0,82 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,04$	$0,83 \pm 0,04$
Метод варьирования скорости нагрева	$0,84 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,03$
Частотный фактор, найденный методом варьирования скорости нагрева, составлял для трех значений температуры поляризации $\omega = 10^{10} \text{ c}^{-1}$			

Примечания. 1. Приведены результаты для полярных структур, характеризующихся меньшей энергией активации (см. рис. 1 и пояснения в тексте). 2. Значения ω определены с точностью до половины декады.

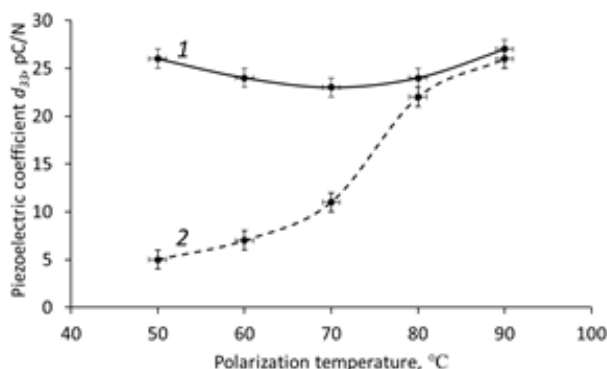


Рис. 2. Зависимости пьезомодуля d_{33} в пленках П(ВДФ-ТФЭ) от температуры поляризации, полученные сразу после поляризации (1) и через 2,5 ч последующего отжига при температуре 70°C (2)

Как уже было отмечено выше, выдерживание пленки в поле коронного разряда при повышенной температуре часто приводит к электрическим пробоям, и, как следствие, к ее механическому повреждению. С целью снижения вероятности электрического пробоя был использован метод поляризации во внутреннем поле гомозаряда: пленки П(ВДФ-ТФЭ) сначала подвергали поляризации при комнатной температуре в поле отрицательного коронного разряда в течение 10 мин (напряженность электрического поля составляла 1,2 МВ/см), затем прогревали (образец находился в разомкнутом состоянии, т. е. при отсутствии внешнего электрического поля) до различной температуры, после чего охлаждали до комнатной температуры. На рис. 3 приведены кривые токов ТСД в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных данным способом.

На графиках ТСД (рис. 3) видно, что с увеличением температуры прогрева растет значение максимума кривой и увеличивается площадь под ней. Следует отметить сходный вид кривых ТСД (по форме и положению пиков на температурной шкале) с низкотемпературными аналогами на рис. 1, что говорит о захвате гомозаряда глубокими приповерхностными ловушками и в данном случае, а также об ориентации полярных структур в образовавшемся внутреннем электрическом поле. Таким образом, с увеличением температуры прогрева растет подвижность полярных структур, их большее количество успевает сориентироваться, поэтому растут как значение максимума, так и площадь под кривой.

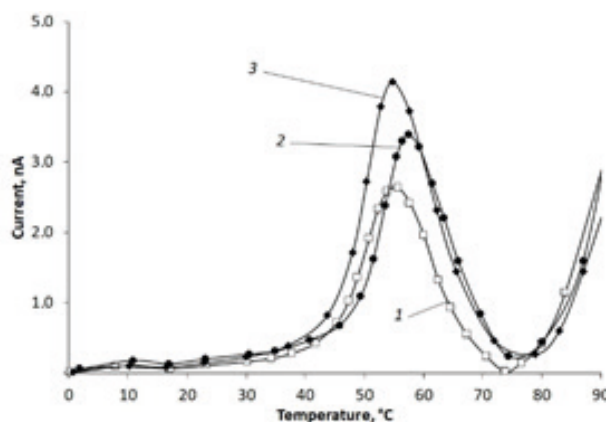


Рис. 3. Термостимулированные токи деполяризации в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных в поле отрицательного коронного разряда при комнатной температуре, а затем подвергнутых прогреву (в отсутствие электрического поля) до различной температуры, °С: 50 (1), 70 (2) и 80 (3)



В табл. 2 приведены результаты вычисления энергии активации и частотного фактора (с точностью до половины декады) полярных структур в пленках П(ВДФ-ТФЭ), поляризованных при комнатной температуре, а затем подвергнутых прогреву до разных температур и дальнейшему охлаждению до комнатной температуры (в разомкнутом состоянии, т. е. в отсутствие электрического поля), вычисленные методами начального подъема и варьирования скорости нагрева.

Таблица 2

Результаты определения ключевых характеристик полярных структур в пленках П(ВДФ-ТФЭ), прогретых до различной температуры после поляризации

Метод определения W	Энергия активации W , эВ, при температуре прогрева	
	70°C	90°C
Метод начального подъема пикового значения тока	$0,81 \pm 0,04$	$0,83 \pm 0,04$
Метод варьирования скорости нагрева	$0,83 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,03$
Частотный фактор, найденный методом варьирования скорости нагрева, составлял для двух значений температуры прогрева $\omega = 10^{10} \text{ с}^{-1}$		

Примечания. 1. Образцы пленок прогревали после поляризации в поле отрицательного коронного разряда при комнатной температуре. 2. Значения ω определены с точностью до половины декады.

Была проведена оценка значения энергии активации гомозаряда; высвобождение гомозаряда из приповерхностных ловушек в данном случае выражается в нарастании тока деполяризации после достижения 80°C (см. рис. 3). Значение, полученное методом начального подъема, составило $(1,90 \pm 0,09)$ эВ, как и в случае традиционного способа поляризации.

На рис. 4 приведены зависимости пьезомодуля d_{33} от температуры прогрева, проведенного сразу после поляризации (кривая 1) и спустя два с половиной часа выдержки в термостате при 70°C (кривая 2). Видно, что в первом случае пьезомодуль, измеренный сразу после ступенчатой процедуры (включает поляризацию при комнатной температуре, прогрев до заданной температуры, затем охлаждение до комнатной температуры) растет с увеличением температуры прогрева и достигает максимума (25 мКл/Н) при температуре прогрева 90°C. Однако во втором случае, когда процедура включает выдержку в термостате после прогрева до заданной температуры, пьезомодуль в образцах П(ВДФ-ТФЭ), прогретых до температуры 50 – 70°C, значительно снизился, а вот пьезомодуль образцов, прогретых до 80 – 90°C, практически не изменился. Оптимальной температурой прогрева оказалось значение 90°C. Именно оно дало максимальное значение пьезомодуля d_{33} (25 пКл/Н). Нагрев до более высокой температуры приводил уже к механической деформации образцов.

Таким образом, можно утверждать, что предложенный метод создания пьезоэлектрического состояния позволяет достигнуть в пленках П(ВДФ-ТФЭ) значения пьезомодуля, которое соизмеримо с получаемым традиционным способом; при этом вероятность электрического пробоя (и механического повреждения образца) значительно снижается.

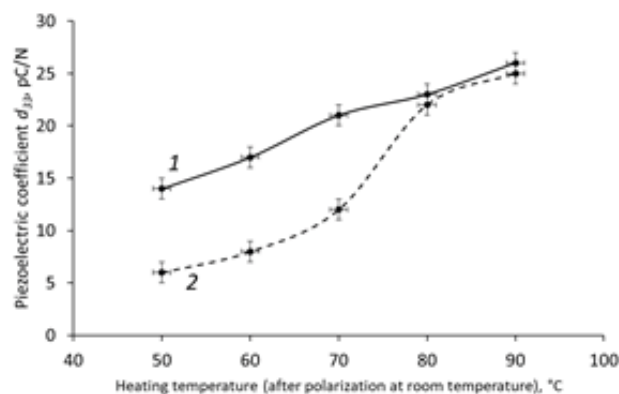


Рис. 4. Зависимости пьезомодуля d_{33} в поляризованных пленках П(ВДФ-ТФЭ) от температуры дальнейшего прогрева, полученные без последующего отжига (1) и через 2,5 ч последующего отжига при температуре 70°C (2).

Поляризация пленок проведена при комнатной температуре

Заключение

В результате проведенных исследований с помощью метода термоактивационной спектроскопии предложен механизм поляризации в полимерных пленках сополимера П(ВДФ-ТФЭ): при поляризации в поле коронного разряда происходит захват глубокими приповерхностными ловушками гомозаряда, который сам не вносит вклада в значение пьезомодуля. Однако во внутреннем электрическом поле гомозаряда возникает ориентация и имеет место удержание ориентированного состояния полярных структур. Увеличение температуры поляризации повышает вклад диполей с большей энергией активации (это наблюдается на кривых ТСД в виде двух сильно перекрывающихся пиков). Тем самым при поляризации пленок П(ВДФ-ТФЭ) в поле коронного разряда сосуществуют гомо- и гетерозаряды. При этом энергия активации полярных структур составляет $(0,82 \pm 0,03)$ эВ, а частотный фактор – 10^{10} с^{-1} (с точностью до половины декады). Значение энергии активации гомозаряда в случае отрицательной полярности коронирующего электрода намного превышает таковое для полярных структур и составляет $(1,90 \pm 0,09)$ эВ. Аналогичный расчет для случая положительной полярности коронирующего электрода дает значение энергии активации гомозаряда, равное $(1,20 \pm 0,06)$ эВ.

Таким образом установлено, что формирование электретного и пьезоэлектрического состояний в пленках П(ВДФ-ТФЭ) взаимосвязаны. Создание электретного состояния в этих объектах необходимо для появления и удержания пьезоэлектрических свойств.

Традиционный способ поляризации в поле коронного разряда при повышенной температуре часто приводит к электрическим пробоям, и, как следствие, к механическому повреждению полимерных пленок. Предложенный в настоящем исследовании способ поляризации во внутреннем поле гомозаряда значительно снижает вероятность электрического пробоя и позволяет достичь в пленках П(ВДФ-ТФЭ) значений пьезомодуля d_{33} , которые не уступают по своему уровню и температурной стабильности пьезомодулю d_{33} , полученному при поляризации данного объекта традиционным способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kawai H. The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) // Japanese Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 8. No. 6. Pp. 975–983.
2. Лушейкин Г. А. Новые полимерсодержащие пьезоэлектрические материалы // Физика твердого тела. 2006. Т. 48. № 6. С. 963–964.
3. Ting Y., Suprpto Y., Chiu C.-W., Gunawan H. Characteristic analysis of biaxially stretched PVDF thin films // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135. No. 36. P. 46677.

4. **Marandi M., Tarbutton J.** Additive manufacturing of single- and double-layer piezoelectric PVDF-TrFE copolymer sensors // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 34. Pp. 666–671.
5. **Begum S., Ullah H., Kausar A., Siddiq M., Aleem M. A.** Fabrication of epoxy functionalized MWCNTs reinforced PVDF nanocomposites with high dielectric permittivity, low dielectric loss and high electrical conductivity // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 167. 20 October. Pp. 497–506.
6. **Kalimuldina G., Turdakyn N., Abay I., Medeubayev A., Nurpeissova A., Adair D., Bakenov Z.** A review of piezoelectric PVDF film by electrospinning and its applications // *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 18. P. 5214.
7. **Sukumaran S., Chatbouri S., Rouxel D., Tisserand E., Thiebaud F., Ben Zineb T.** Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2021. Vol. 32. No. 7. Pp. 746–780.
8. **Гороховатский Ю. А., Темнов Д. Э., Сотова Ю. И.** Влияние реологических параметров на электретные свойства поливинилиденфторида // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2020. Т. 13. № 4. С. 39–46.
9. **Mahadeva S. K., Berring J., Walus K., Stoeber B.** Effect of poling time and grid voltage on phase transition and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) thin films using corona poling // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. Vol. 46. No. 28. P. 285305.
10. **Гороховатский Ю. А., Бордовский Г. А.** Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1991. 248 с.

REFERENCES

1. **Kawai H.**, The piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride), *Jap. J. Appl. Phys.* 8 (6) (1969) 975–983.
2. **Lushcheykin G. A.**, New polymer-containing piezoelectric materials, *Physics of the Solid State*. 48 (6) (2006) 1023–1025.
3. **Ting Y., Suprpto Y., Chiu C.-W., Gunawan H.**, Characteristic analysis of biaxially stretched PVDF thin films, *J. Appl. Polym. Sci.* 135 (36) (2018) 46677.
4. **Marandi M., Tarbutton J.**, Additive manufacturing of single- and double-layer piezoelectric PVDF-TrFE copolymer sensors, *Procedia Manuf.* 34 (2019) 666–671.
5. **Begum S., Ullah H., Kausar A., et al.**, Fabrication of epoxy functionalized MWCNTs reinforced PVDF nanocomposites with high dielectric permittivity, low dielectric loss and high electrical conductivity, *Comp. Sci. Technol.* 167 (20 October) (2018) 497–506.
6. **Kalimuldina G., Turdakyn N., Abay I., et al.**, A review of piezoelectric PVDF film by electrospinning and its applications, *Sensors*. 20 (18) (2020) 5214.
7. **Sukumaran S., Chatbouri S., Rouxel D., et al.**, Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 32 (7) (2021) 746–780.
8. **Gorokhovatskiy Yu. A., Temnov D. E., Sotova Yu. I.**, Rheological parameters effect on the electric properties of polyvinylidene fluoride, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 13 (4) (2020) 39–46 (in Russian).
9. **Mahadeva S. K., Berring J., Walus K., Stoeber B.**, Effect of poling time and grid voltage on phase transition and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) thin films using corona poling, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46 (28) (2013) 285305.
10. **Gorokhovatskiy Yu. A., Bordovskiy G. A.**, Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков [Thermal activation spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics], *Nauka, Moscow*, 1991 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОТОВА Юлия Ильинична – аспирантка кафедры общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

191186, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
juliasotova1992@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6792-2390

ГОРОХОВАТСКИЙ Юрий Андреевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

191186, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
gorokh-yu@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-5085-2525

ТЕМНОВ Дмитрий Эдуардович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

191186, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
tde@ Herzen.spb.ru
ORCID: 0000-0002-9560-4346

THE AUTHORS

SOTOVA Yulia I.

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russia
juliasotova1992@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6792-2390

GOROKHOVATSKY Yuriy A.

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russia
gorokh-yu@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-5085-2525

TEMNOV Dmitry E.

Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russia
tde@ Herzen.spb.ru
ORCID: 0000-0002-9560-4346

Статья поступила в редакцию 10.04.2022. Одобрена после рецензирования 12.04.2022. Принята 12.04.2022.

Received 10.04.2022. Approved after reviewing 12.04.2022. Accepted 12.04.2022.