

05,06,12

## Исследование магнитоэлектрического эффекта в композитной пленке на основе PVDF с добавлением наночастиц SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>

© А.А. Игнатов<sup>1</sup>, В.В. Савин<sup>1</sup>, В.Д. Сальников<sup>1</sup>, В.Г. Колесникова<sup>1</sup>, АЛ.В. Панина<sup>1,2</sup>, В.В. Родионова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия

E-mail: AAlgnatov@stud.kantiana.ru

Поступила в Редакцию 20 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 23 ноября 2024 г.

Принята к публикации 25 ноября 2024 г.

Исследованы магнитоэлектрические (МЭ) свойства композитных пленок на основе пьезо-полимера PVDF с добавлением наночастиц гексаферрита SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> (10 wt.%). Представлен разработанный комплекс экспериментального оборудования для исследования электрических и МЭ-эффектов.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический отклик, поливинилиденфторид, гексаферрит стронция, пьезоэлектрическая константа  $d_{33}$ .

DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59608.315

### 1. Введение

Магнитоэлектрические (МЭ) композитные материалы, включающие сегнетоэлектрическую и ферро- или ферромагнитную фазы, как правило, обладают повышенными значениями МЭ-коэффициента по сравнению с природными материалами, что делает их перспективными для широкого круга применений в биомедицине, электронике, логических элементах, терагерцовых излучателях и других многофункциональных приборах [1–5]. МЭ-взаимодействие возникает из-за связи между соответствующими параметрами упорядочения — электрической поляризацией  $P$  и намагниченностью  $M$ , при этом  $P$  может переключаться магнитным полем  $H$ , а  $M$  может управляться электрическим полем  $E$ . МЭ-связь осуществляется через передачу механических напряжений, поэтому соответствующие фазы должны иметь высокие пьезоэлектрические и магнитоэлектрические коэффициенты. Возможный механизм передачи механических напряжений сегнетоэлектрической фазе включает вращение и/или смещение ферромагнитных частиц, помещенных внутрь сегнетоэлектрической матрицы во внешнем магнитном поле [6]. Благодаря механической связи между фазами данный эффект приводит к деформации пьезоэлектрической компоненты, что, в свою очередь, вызывает изменение его электрической поляризации. Для достижения обратного магнитоэлектрического эффекта используется тот же механизм косвенной упругой деформации, вызывающий изменение намагниченности в ферромагнитной фазе при приложении внешнего электрического поля [7].

Наиболее эффективной МЭ-структурой является т.н. архитектура 0–3 — эластичная матрица с включениями сегнетоэлектрических и магнитных частиц, благодаря

потенциалу применения таких материалов в промышленности и биомедицине. Важным аспектом является понимание механизмов взаимодействия между магнитными и электрическими фазами, что позволит регулировать свойства композитов на микро- и наноуровне. В последнее время исследовательский интерес сместился в сторону композитных материалов на основе полимерных матриц. В частности, полимерное семейство PVDF (поливинилиденфторид), демонстрирующее пьезоэлектрический эффект, лежит в основе значительных научных и технологических достижений [8]. Среди полимеров, PVDF и его сополимеры вызывают интерес с точки зрения электроактивных свойств, хотя они показывают более низкие пьезоэлектрические и пьезоэлектрические коэффициенты, чем пьезоэлектрическая керамика, например, цирконат-титанат свинца. Тем не менее, они обладают некоторыми преимуществами. Среди них — низкая диэлектрическая проницаемость и теплопроводность, хорошее соответствие импедансу воздуха и воды, гибкость [9], повышенная прочность и устойчивость к механическим воздействиям, химическая стойкость, широкий температурный диапазон применения (от  $-30$  до  $+140^\circ\text{C}$ ) и высокая температура размягчения [8].

Также PVDF обладает биосовместимостью, что открывает возможности его использования в биомедицинских приложениях [10–13]. Известно, что величина МЭ-эффекта в эластичных полимерно-связанных композитах из микронных частиц цирконата-титаната свинца и неодима-железа-бора ( $\sim 700 \text{ mV}/(\text{cm} \cdot \text{Oe})$ ) [14]) на порядок больше по сравнению с композитами на основе пьезоэлектрической полимерной матрицы и магнитных наночастиц ( $\sim 40 \text{ mV}/(\text{cm} \cdot \text{Oe})$ ) [15,16]), однако полимерно-связанные композиты не отвечают требованиям биосовместимости. Поэтому исследования композитных мульт-

тиферроидных пленок на основе пьезоактивной матрицы PVDF и наполнителя в виде ферромагнитных наночастиц для биомедицинских приложений является актуальным [2].

Изготовление полимерных МЭ-пленок типа PVDF/ферромагнитные наночастицы с контролируемой толщиной композита производится методом „ракельного ножа“ (англ. Dr. Blade) [2], в процессе чего изготавливается раствор полимера с замешанным ферромагнитным наноразмерным наполнителем и сушится (полимеризуется) тонким слоем на плоской подложке [9]. В процессе изготовления важную роль играет большое количество технических параметров (вид и качество растворителя, температура сушки полимера, молярная масса полимерной основы, способ диспергации наполнителя и пр.), так как от этого зависят наличие в нем пор [17] и однородность распределения наполнителя в объеме матрицы. Структура композита формирует механическую связь между наполнителем и матрицей. Одним из ключевых аспектов является понимание механизмов взаимодействия между магнитными и электрическими фазами, что позволит регулировать свойства композитов на микро- и наноуровне [17]. В работе [6] развиваются модельные подходы для описания влияния отдельно магнитострикционного эффекта наночастиц и вращения наночастиц в матрице на создаваемую деформацию матрицы, которая вызывает пьезоэлектрический эффект. Именно комбинация и наличие двух механизмов позволяют достичь наиболее высокого значения пьезоэффекта. В композитах, изготавливаемых методом ракельного ножа, после полимеризации смещение частиц сильно ограничено, однако при приложении внешнего магнитного поля частицы стремятся повернуться и тем самым увеличивают механическое напряжение в матрице.

Как в теоретических [6], так и в экспериментальных работах [2] авторы в качестве ферромагнитного наполнителя отдают предпочтение ферромагнитным наночастицам  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , обладающим достаточно большим значениям намагниченности насыщения, выраженной магнитокристаллической анизотропией и, соответственно, наибольшим значением коэффициента магнитострикции ( $\approx 200\text{--}220$  ppm) [18,19]. Представляет также интерес исследовать композит с наночастицами гексаферрита стронция  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , который является магнито жестким материалом с высокой константой магнитокристаллической анизотропии ( $K = 0.35 \text{ MJ/m}^3$ ) [20], что является целью настоящей работы. При этом наночастицы  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  в качестве наполнителя для МЭ-композита исследованы в меньшей степени по сравнению с наночастицами феррита кобальта. Между тем в некоторых работах указывается на возможность сосуществования мультиферроидных свойств в однофазных гексаферритах [21]. В настоящей работе исследованы магнитные, сегнетоэлектрические и МЭ-свойства композитных пленок на основе PVDF с добавлением наночастиц  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Кроме того, представлен разработанный комплекс экспе-

риментального оборудования для всестороннего исследования МЭ-эффектов.

## 2. Исследуемые образцы и методика эксперимента

Для получения наночастиц (НЧ) гексаферрита стронция  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  [22] использовали нитрат железа и нитрат стронция, взятые в соответствии с требуемым стехиометрическим соотношением. Для получения НЧ соли металлов и лимонная кислота отдельно друг от друга растворялись в деионизированной воде в течение 30 min при постоянном перемешивании. Отношение лимонной кислоты к солям металлов составило 1:1. Далее растворы смешивали при постоянном интенсивном перемешивании в течение 30 min. После в раствор добавлялся водный аммиак (30%) для достижения значения pH 7. Раствор нагревался при  $135^\circ\text{C}$  в течение 5 h с последующим повышением температуры до  $250^\circ\text{C}$ . При этой температуре происходила реакция самосгорания с образованием НЧ. Далее производили отжиг НЧ в печи при скорости увеличения температуры  $5^\circ\text{C/min}$  до  $950^\circ\text{C}$  в течение 3 h на воздухе. Приготовленный порошок измельчали в агатовой ступке.

Композитные пленки были получены методом ракельного ножа [9]. Частицы были диспергированы в диметилформамиде (ДМФ) с помощью ультразвука (Elmasonic S15H, 35 W) в течение 30 min. Порошок PVDF растворяли отдельно в ДМФ. Полученные растворы смешивали, добавляя раствор частиц к раствору с полимером, и перемешивали до растворения. Затем растворы наносили на стекло и равномерно распределяли ракельным лезвием с зазором  $70 \mu\text{m}$ . Полученные композиты помещали в сушижаровой шкаф при  $65^\circ\text{C}$  и выдерживали в течение 12 h для испарения растворителя и образования пленок PVDF.

Магнитные измерения проводились с помощью вибрационного магнитометра (Lakeshore 7400 System) в диапазоне полей до 13 kOe при комнатной температуре ( $\sim 295 \text{ K}$ ). Измерения пленок размером  $5 \times 5 \text{ mm}$  проводились при приложении внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости образцов. Для анализа МЭ-свойств композитов требуется специализированная установка для электрической поляризации образца и измерения пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$ , а также МЭ-коэффициента  $a_{33}$ . Величина МЭ-эффекта напрямую связана с пьезоэлектрическими свойствами сегнетоэлектрической фазы [2]. Поэтому точное измерение пьезоэлектрических параметров имеет важное значение. Их улучшение может быть достигнуто с помощью процесса, известного как электрическая поляризация, которая включает приложение к образцу электрического поля высокой напряженности ( $5 \text{ MV/m}$  или более) [23]. Электрическая поляризация образцов происходила методом униполярного коронного разряда с помощью разработанной и собранной нами установки [23].

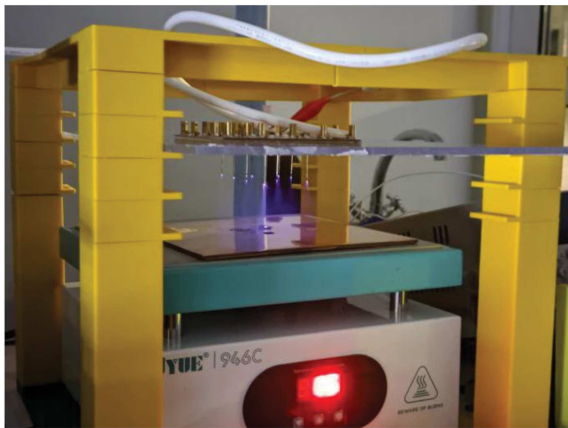
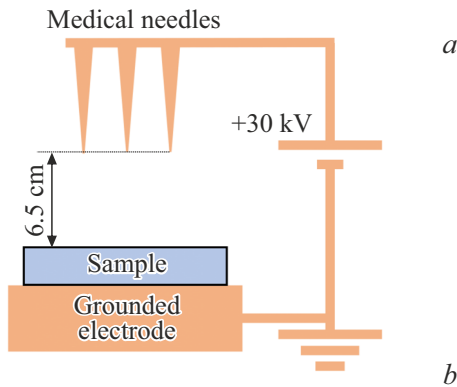


Рис. 1. Установка для электрической поляризации образцов: а) принципиальная схема; б) фотография.

Образцы помещались на плоский заземленный электрод, который нагревался для поддержания постоянной температуры образцов во время поляризации. Для создания коронного разряда на электроды с малым радиусом кривизны подавался положительный потенциал величиной 30 kV. В данной установке использовались медицинские иглы, кончики которых располагались на расстоянии 6.5 см от поверхности заземленного электрода. Принципиальная схема установки и ее фотография представлены на рис. 1.

Пьезоэлектрический отклик материала характеризуется пьезоэлектрическими константами  $d_{ij}$ , которые связывают значения механического напряжения  $s$  и электрической поляризации  $P$  [24]:

$$P = d \cdot s.$$

Для прямого пьезоэлектрического эффекта индексы  $i$  и  $j$  указывают направления измерения электрического напряжения и приложения механического напряжения соответственно. Ненулевые значения  $d_{ij}$  зависят от группы симметрии кристалла [24]. Для PVDF, поляризованного вдоль третьей оси, только  $d_{31}$ ,  $d_{13}$  и  $d_{33}$  не равны нулю [24]. Одним из эффективных методов характеристики пьезоэлектрических свойств материала является прямое измерение  $d_{33}$ . Коэффициент  $d_{33}$  образца был измерен квазистатическим методом посред-

ством измерения заряда, индуцированного на образце при приложении низкочастотной силы, а также величины индуцированной силы и емкости образца [24]. Измерение величины продольного МЭ-коэффициента  $a_{33}$ , при котором направление внешнего магнитного поля совпадает с направлением поляризации образца, производилось с помощью динамического метода на разработанной и собранной в рамках проведения исследования установке [25]. Постоянное магнитное поле смещения HDC величиной до 10 kOe, в которое помещался образец, создавалось с помощью электромагнитов вибрационного магнитометра (7400 System VSM;

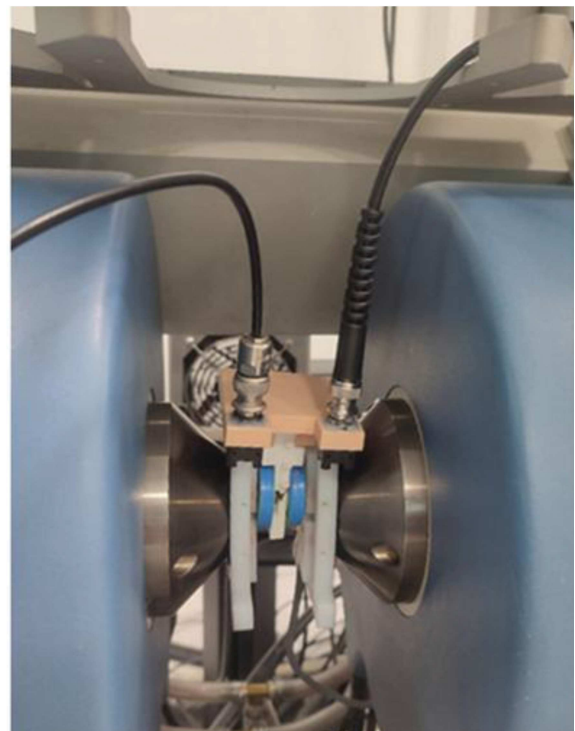
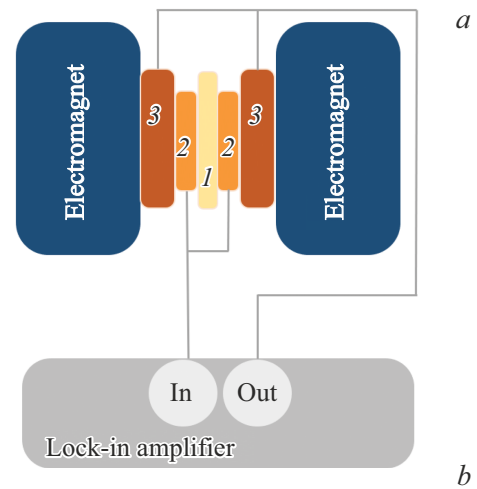


Рис. 2. а) Принципиальная измерительная схема (1 — образец, 2 — контакты, 3 — катушки Гельмгольца) и б) фотография установки по измерению магнитоэлектрического коэффициента.

Lake Shore Cryotronics Inc). Переменное магнитное поле НАС величиной 1.5 Oe и частотой 770 Hz, направленное вдоль постоянного магнитного поля, создавалось с помощью катушек Гельмгольца. Напряжение генерируемого на поверхности образца сигнала  $V_{out}$  детектировалось с помощью синхронного усилителя SR 830 (Stanford Research Systems). Величина МЭ-коэффициента была рассчитана по формуле

$$a_{33} = V_{out}/(t \cdot H_{AC}),$$

где  $t$  — толщина образца.

Принципиальная измерительная схема и фотография установки представлены на рис. 2.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены петли магнитного гистерезиса для порошка наночастиц  $SrFe_{12}O_{19}$  и композита с наночастицами  $SrFe_{12}O_{19}/PVDF$ . Оба материала характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы:  $H_c = 5.9$  и  $6.3$  kOe соответственно. Значения  $H_c$  для обоих материалов близки, что свидетельствует о значительном влиянии одноосной анизотропии частиц [20]. Небольшое увеличение значения  $H_c$  в композите может быть обусловлено образованием агломератов больших размеров и формированием более сложной доменной структуры.

Для исследования сегнетоэлектрических свойств изготовленного композита были экспериментально получены значения сегнетоэлектрического коэффициента  $d_{33}$  для исходно изготовленного композита и после проведения электрической поляризации. Из пленки композита большой площади было вырезано 7 образцов размерами  $10 \times 10$  mm. По результатам измерений 7 образцов

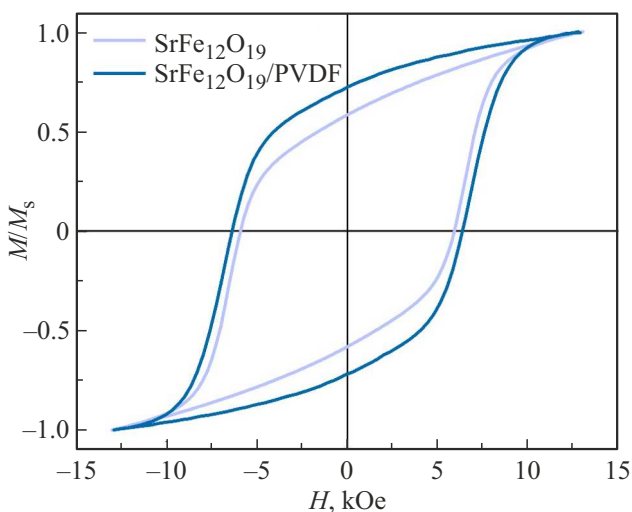


Рис. 3. Петли магнитного гистерезиса для порошка наночастиц  $SrFe_{12}O_{19}$  и композита с наночастицами  $SrFe_{12}O_{19}/PVDF$  (нормированные на намагниченность насыщения  $M_s$ ).

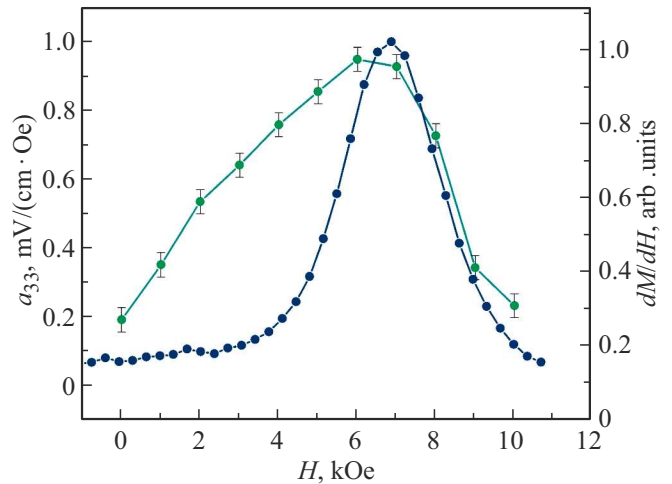


Рис. 4. Зависимость усредненной величины продольного МЭ-коэффициента  $a_{33}$  и дифференциальной магнитной восприимчивости  $dM/dH$  композита  $SrFe_{12}O_{19}/PVDF$  от внешнего постоянного магнитного поля.

было получено усредненное значение коэффициента  $d_{33} = 2 \pm 1$  pC/N в исходном состоянии до электрической поляризации и  $d_{33} = 23 \pm 2$  pC/N после электрической поляризации. Рост значения  $d_{33}$  более чем в 10 раз обусловлен поворотом легких осей поляризации сегнетоэлектрических доменов в PVDF под действием внешнего электрического поля высокой напряженности (порядка  $7$  MV/cm) [26].

Измерение продольного МЭ-коэффициента композитной пленки  $SrFe_{12}O_{19}/PVDF$  проводилось на той же серии из 7 образцов. Средняя толщина образцов составляла  $39 \pm 1$   $\mu$ m. Полевая зависимость усредненной величины продольного МЭ-коэффициента представлена на рис. 4. Усредненный МЭ-коэффициент достигает максимума  $0.94$  mV/(cm·Oe) при значении постоянного магнитного поля  $6.00$  kOe, близком к значению  $6.75$  kOe, при котором наблюдается максимальное значение магнитной восприимчивости образцов (для сравнения на рис. 4 представлена дифференциальная магнитная восприимчивость). Можно предположить, что в этом интервале полей будет наблюдаться максимальный градиент изменения коэффициента магнитострикции во внешнем магнитном поле.

### 4. Заключение

Проведен анализ магнитоэлектрических свойств композита, состоящего из пьезоактивной матрицы PVDF с внедренными наночастицами  $SrFe_{12}O_{19}$  массовой доли 10%. Установлено, что при использовании электрической поляризации композита методом коронного разряда значение пьезокоэффициента  $d_{33}$  возрастает более чем в 10 раз. Максимальная величина МЭ-эффекта для поляризованного композита достигает  $0.94$  mV/(cm·Oe) при

внешнем магнитном поле, соответствующем максимальному значению дифференциальной магнитной восприимчивости композита. Это указывает, что МЭ-эффект в композите вызван магнитострикционными напряжениями в матрице.

Результаты работы проясняют механизмы взаимодействия фаз в полимерных композитах с архитектурой 0–3, что может быть использовано для оптимизации состава таких композитов и получения улучшенных характеристик для конкретных приложений.

### Финансирование работы

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-30032.

### Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

### Список литературы

- [1] A.V. Sonawane, Z.V.P. Murthy. *Process Saf. Environ. Prot.* **171**, 680 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.062>
- [2] A. Omelyanchik, V. Antipova, C. Gritsenko, V. Kolesnikova, D. Murzin, Y. Han, A.V. Turutin, I.V. Kubasov, A.M. Kislyuk, T.S. Ilina, D.A. Kiselev, M.I. Voronova, M.D. Malinkovich, Y.N. Parkhomenko, M. Silibin, E.N. Kozlova, D. Peddis, K. Levada, L. Makarova, A. Amirov, V. Rodionova. *Nanomater.* **11**, 5, 1154 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11051154>
- [3] N.A. Spaldin, R. Ramesh. *Nature Mater.* **18**, 3, 203 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0275-2>
- [4] J. Zhang, T. Yang, G. Tian, B. Lan, W. Deng, L. Tang, Y. Ao, Y. Sun, W. Zeng, X. Ren, Z. Li, L. Jin, W. Yang. *Adv. Fiber Mater.* **6**, 1, 133 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42765-023-00337-w>
- [5] C.A.F. Vaz, J. Hoffman, C.H. Ahn, R. Ramesh. *Adv. Mater.* **22**, 26–27, 2900 (2010). <https://doi.org/10.1002/adma.200904326>
- [6] O.V. Stolbov, Y.L. Raikher. *Nanomater.* **14**, 1, 31 (2024). <https://doi.org/10.3390/nano14010031>
- [7] А.П. Пятаков, А.К. Звездин. *УФН* **182**, 6, 593 (2012). <https://doi.org/10.3367/ufnr.0182.201206b.0593> [A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin. *Phys. — Uspekhi* **55**, 6, 557 (2012).]
- [8] P. Martins, A.C. Lopes, S. Lanceros-Mendez. *Prog. Polym. Sci.* **39**, 4, 683 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006>
- [9] C. Ribeiro, C.M. Costa, D.M. Correia, J. Nunes-Pereira, J. Oliveira, P. Martins, R. Gonçalves, V.F. Cardoso, S. Lanceros-Méndez. *Nature Protoc.* **13**, 4, 681 (2018). <https://doi.org/10.1038/nprot.2017.157>
- [10] P. Hitscherich, S. Wu, R. Gordan, L.-H. Xie, T. Arinze, E.J. Lee. *Biotechnol. Bioeng.* **113**, 7, 1577 (2016). <https://doi.org/10.1002/bit.25918>
- [11] P. Martins, M. Silva, S. Reis, N. Pereira, H. Amorín, S. Lanceros-Mendez. *Polymers (Basel)* **9**, 2, 62 (2017). <https://doi.org/10.3390/polym9020062>
- [12] L.A. Makarova, Y.A. Alekhina, A.S. Omelyanchik, D. Peddis, V.V. Spiridonov, V.V. Rodionova, N.S. Perov. *J. Magn. Magn. Mater.* **485**, 413 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.001>
- [13] P. Martins, X. Moya, L.C. Phillips, S. Kar-Narayan, N.D. Mathur, S. Lanceros-Mendez. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **44**, 48, 482001 (2011). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/48/482001>
- [14] L. Makarova, Y. Alekhina, E. Kramarenko, A. Omelyanchik, V. Rodionova, O. Malyshkina, N. Perov. *EPJ Web Conf.* **185**, 07008 (2018). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818507008>
- [15] P. Martins, S. Lanceros-Méndez. *Adv. Funct. Mater.* **23**, 27, 3371 (2013). <https://doi.org/10.1002/adfm.201202780>
- [16] P. Martins, Y.V. Kolen'ko, J. Rivas, S. Lanceros-Mendez. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7**, 27, 15017 (2015). <https://doi.org/10.1021/acsami.5b04102>
- [17] H. Palneedi, V. Annapureddy, S. Priya, J. Ryu. *Actuators* **5**, 1, 9 (2016). <https://doi.org/10.3390/act5010009>
- [18] О.В. Столбов, Ю.Л. Райхер. *Изв. РАН. Сер. физ.* **88**, 4, 677 (2024). [O.V. Stolbov, Y.L. Raikher. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **88**, 4, 586 (2024).] <https://doi.org/10.1134/S1062873823706372>
- [19] K. Jin, J. Aboudi. *Int. J. Eng. Sci.* **94**, 226 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.06.002>
- [20] R.C. Pullar. *Prog. Mater. Sci.* **57**, 7, 1191 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
- [21] K. Zhai, D.S. Shang, Y.S. Chai, G. Li, J.W. Cai, B.G. Shen, Y. Sun. *Adv. Funct. Mater.* **28**, 9, 1705771 (2018). <https://doi.org/10.1002/adfm.201705771>
- [22] P. Maltoni, T. Sarkar, G. Barucca, G. Varvaro, F. Locardi, D. Peddis, R. Mathieu. *J. Phys. Chem. C* **125**, 10, 5927 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c00355>
- [23] T. Kaura, R. Nath, M.M. Perlman. *J. Phys. D* **24**, 10, 1848 (1991). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/24/10/020>
- [24] IEEE Standard on Piezoelectricity Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society IEEE Standards Board American National Standards Institute (1987).
- [25] M. Mahesh Kumar, A. Srinivas, S.V. Suryanarayana, G.S. Kumar, T. Bhimasankaram. *Bull. Mater. Sci.* **21**, 3, 251 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF02744978>
- [26] M. Smith, S. Kar-Narayan. *Int. Mater. Rev.* **67**, 1, 65 (2022). <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1915935>

Редактор Е.В. Толстякова