06,12

Применение метода силовой микроскопии пьезоотклика для исследования влияния электрического пробоя на электрофизические свойства пленок поливинилиденфторида

© Е.Л. Бурьянская[1,2], А.А. Поливец[1], С.В. Кондрашов[1], Д.А. Киселев[2], А.С. Осипков[1], М.О. Макеев[1]

[1] Лаборатория „Технологии полимерных сегнетоэлектриков“, государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] Лаборатория физики оксидных сегнетоэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия

E-mail: buryanskayael@bmstu.ru

Поступила в Редакцию 6 марта 2025 г.
В окончательной редакции 6 марта 2025 г.
Принята к публикации 5 мая 2025 г.

Исследовано влияния электрического пробоя на электрофизические свойства пленок поливинилиденфторида. Определены значения электрической прочности материала до и после поляризации. Квазистатическим методом Берлинкура измерены значения продольного пьезокоэффициента d_{33}. Выявлено, что для неполяризованных пленок после пробоя значения d_{33} отличны от нуля, что свидетельствует о локальной поляризации пленки в припробойной области. Методом силовой микроскопии пьезоотклика исследована морфология поверхности пленок после электрического пробоя, получены сигналы распределения вертикального и латерального пьезоотклика, рассчитаны значения локальных пьезокоэффициентов d_{33} вблизи и в отдалении от точки пробоя.

Ключевые слова: сегнетоэлектричество, пьезоэлектрический эффект, полимерные сегнетоэлектрики, доменная структура, гибкая электроника, smart materials.

DOI: 10.61011/FTT.2025.07.61197.31HH-25

1. Введение

Сегнетоэлектрические пленки поливинилиденфторида (ПВДФ) и его сополимеров обладают высокими значениями пиро- и пьезоэлектрического отклика, химической и термической стабильностью и доказанной биосовместимостью, поэтому представляют большой интерес в качестве материалов для гибкой электроники и биомедицины [1–4].

Для создания устройств на основе ПВДФ и его сополимеров пленки ориентируют, а затем поляризуют с помощью коронного или тлеющего разряда [5], а также контактным методом. Независимо от метода поляризации, для достижения необходимых значений эффективных пьезокоэффициентов материал должен обладать высокой электрической прочностью, которая ограничивает величину поляризующего поля, показывая пороговое значения напряженности электрического поля, при котором происходит пробой материала [6].

Электрический пробой является критическим явлением, которое может привести к необратимым изменениям в структуре и свойствах сегнетоэлектрических материалов. Исследование этого процесса позволяет выявить механизмы деградации пленок ПВДФ, что важно для разработки методов защиты и улучшения их эксплуатационных характеристик.

Ввиду того, что современные тенденции в микроэлектронике и нанотехнологиях вообще требуют создания материалов, способных работать при высоких электрических полях и в экстремальных условиях [7], изучение влияния электрического пробоя на пьезоэлектрические свойства ПВДФ может способствовать разработке материалов с улучшенными характеристиками. Высокая электрическая прочность сегнетоэлектрических полимеров, например, допускает уровень возбуждающего электрического поля в электроакустических преобразователях (ЭАП) на базе ПВДФ на $1-2$ порядка больший, чем керамика, что создает предпосылки создания на основе таких полимеров излучающих ЭАП для гидроакустики [8]. Чувствительность ЭАП на основе ПВДФ, работающих в продольном режиме, составляет, согласно литературным данным, $1-50\,\mu$V/Pa [9]. По сравнению с пьезокерамикой устройства на основе ПВДФ имеют более широкий частотный диапазон ($1\,$Hz$-10\,$MHz), а PZT ($1\,$kHz$-1\,$MHz) [9].

ПВДФ и сополимеры на основе винилиденфторида характеризуются наличием четырех полиморфных модификаций, различающихся характером упаковки макромолекул в элементарной ячейке кристаллита [10],

и, как следствие, обладающих отличными сегнетоэлектрическими свойствами. Кроме того, различия наблюдаются и в величине электрической прочности [11]. Параэлектрическая α-фаза имеет неполярную конформацию TGTG, показывающую промежуточное значение электрической прочности; сегнетоактивная β-фаза, представляющая наибольший интерес для практического применения, имеет полярную конформацию -TT- с наименьшим значением диэлектрической прочности, которая объясняется наличием остаточной поляризации; γ-фаза имеет -T_3GT_3G- конформацию с самым высоким значением электрической прочности [11].

Несмотря на то, что в настоящее время существует немало работ, посвященных изучению электрической прочности ПВДФ и его сополимеров [4,10–12], в литературе практически отсутствуют данные о влиянии температуры, фазового состава и доменной структуры на механизмы электрического пробоя. Недостаточно изучены детальные механизмы снижения электрической прочности ПВДФ при повышенных температурах (например, роль тепловой деградации или изменения структуры). Электрический пробой в ПВДФ связан с образованием проводящих каналов и локальным перегревом материала, которые, в свою очередь, ведут к изменению структурно-морфологических и сегнетоэлектрических свойств полимера; однако работ, посвященных исследованию таких изменений, недостаточно. В этой связи изучение влияния электрического пробоя на доменную структуру и, как следствие, на величину пьезоэлектрического отклика ПВДФ и его сополимеров при различных температурах поможет частично устранить указанный пробел.

Для визуализации изменений доменной структуры в области электрического пробоя и измерения локальных пьезокоэффициентов оптимально подходит силовая микроскопия пьезоотклика (СМП), которая уже давно зарекомендовала себя как важный инструмент исследования локальных пьезоэлектрических свойств материалов на наноуровне [13–17], позволяя изучать влияние внешних воздействий на свойства материала. Так, в работе [14] изучаются процесс переключения поляризации в изогнутых тонких пленках сополимера винилиденфторида с трифторэтиленом (П(ВДФ-ТрФЭ)) и движение доменных стенок в присутствии градиента сжатия, создаваемого под наконечником кантилевера. В работе [16] метод силовой микроскопии пьезоотклика используется для расчета пьезоэлектрических коэффициентов d_{33} для пленок ПВДФ и П(ВДФ-ТрФЭ). Ранее методами СМП была охарактеризована доменная структура сополимера ВДФ с тетрафторэтиленом [17].

Настоящая работа направлена на изучения влияния электрического пробоя на сегнетоэлектрические свойства ПВДФ, в т. ч. на изменение морфологии, характер и величину пьезоэлектрического отклика в припробойной области.

2. Материалы и методы

2.1. Описание материалов

В работе исследовались сегнетоэлектрические пленки гомополимера ПВДФ (PolyK, Пенсильвания, США). Пленки были получены экструзией из расплава. Толщина исследуемых образцов составила 28 μm. Часть пленок была в течение 180 s предварительно поляризована контактным методом при температуре 80 °C и напряженности поля поляризации $E_p = 300$ MV/m. Пьезоэлектрические коэффициенты d_{33} после поляризации составили 17 pC/N. Поляризация проходила с использованием накладных алюминиевых электродов диаметром 3 mm и толщиной 0.25 mm. Исследуемые образцы были подвергнуты электрическому пробою при трех температурах, 30, 50 и 70 °C, вдали от точки Кюри. Температура фазового перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу для ПВДФ составляет 120 °C [10]. Выбранные температуры соответствуют диапазону эксплуатации устройств на основе пленок ПВДФ.

2.2. Исследование структуры и фазового состава материала

Степень кристалличности и фазовый состав материала определялись с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе NETZSCH DSC 204F1 Phoenix (NETZSCH-Gerätebau GmbH, Зельб, Германия) со скоростью нагрева 2 K/min в среде аргона. Степень кристалличности была рассчитана по упрощенной формуле:

$$\chi_c = \frac{\Delta H_{\mathrm{m}}}{\Delta H_{\mathrm{m}}^{\varnothing}} \tag{1}$$

где ΔH_{m} — энтальпия плавления пленки, а $\Delta H_{\mathrm{m}}^{\varnothing}$ — энтальпия плавления полностью кристаллического материала, которая составляет 104.5 J/K [18,19]

2.3. Методика измерения электрической прочности

Измерение электрической прочности производилось с помощью экспериментального стенда согласно ГОСТ 6433.3-71 „Материалы электроизоляционные твердые“. Эксперименты проводились в подогреваемой алюминиевой ванне, заполненной вазелиновым маслом. Схематическое изображение стенда представлено на рис. 1. Тот же стенд был использован для контактной поляризации пленок.

Значения пробойного поля E_{b} при каждой температуре были получены с использованием двухпараметрической модели Вейбулла [4,10,12,20], согласно которой статистический набор большого числа значений E_{b}

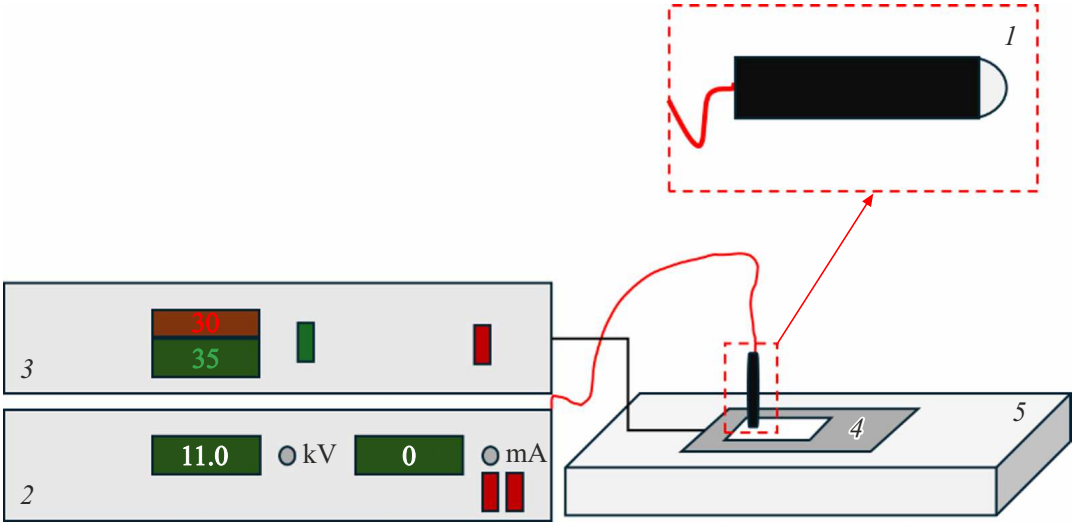

Рис. 1. Экспериментальный стенд для измерения электрической прочности: *1* — высоковольтный электрод; *2* — блок напряжения; *3* — блок контроля температур; *4* — ванночка с вазелиновым маслом; *5* — нагревательный столик.

(в эксперименте пробой был измерен не менее чем в 10 точках) можно описать функцией

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta_b}\right], \qquad (2)$$

где x — текущее значение E_b, α — некоторое характеристическое поле, при котором оказываются пробитыми как минимум 63.2 % испытуемых образцов; параметр β_b характеризует дисперсию величины E_b относительно среднего значения.

2.4. Силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика

Сегнетоэлектрические свойства и изменение морфологии образцов после электрического пробоя исследовали методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima (NT-MDT SI, Зеленоград, Россия) с использованием кантилеверов с платиновым проводящим покрытием FMG01/Pt (Tipsnano, Таллин, Эстония). Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программного обеспечения Gwiddion 2.63 (Czech Metrology Institute, Чехия).

Измерения проводились в трех точках: на границе припробойной области, на расстоянии 225 μm от точки пробоя, на расстоянии 1.2 mm или больше от точки пробоя.

С использованием СЗМ получены топографии поверхности пленок, рассчитаны значения среднеквадратичной (RMS) шероховатости (RMS), построены профили высоты вблизи и в отдалении от области пробоя.

В режиме СМП получены карты распределения сигналов вертикального и латерального пьезоотклика, рассчитаны значения локальных пьезокоэффициентов d_{33}. Для измерения локальных пьезокоэффициентов использовались проводящие кантилеверы HA_HR/Pt (NT-MDT SI, Зеленоград, Россия) с константой жесткости 17 N/m.

Локальные пьезоэлектрические коэффициенты определяли прямым измерением деформации при приложении переменного напряжения от 0 до 10 V на фиксированной частоте 890 kHz. Измерения проводились в двух точках: вблизи места пробоя и в отдалении. Значения пьезокоэффициентов d_{33} рассчитывались из сигнала Mag1n:

$$d_{33}^{*} = \frac{\mathrm{Mag}1n}{U \cdot Q}, \qquad (3)$$

где U — напряжение, подающееся во время сканирования (B), Q — добротность, а сигнал Mag $1n$ — соответствует деформации образца (pm).

В качестве калибровочного образца был выбран монокристаллический ниобат лития с известными значениями $d_{33} = 18$ pm/V.

2.5. Измерение пьезоэлектрических коэффициентов

Значения макроскопических пьезокоэффициентов d_{33} были измерены квазистатическим методом Берлинкура с помощью d_{33}-метра YE2730A (Sinocera Piezotronics, INC, Китай).

3. Результаты и обсуждение

Структурные свойства образцов до и после поляризации были охарактеризованы с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии. На рис. 2 представлены кривые ДСК исходной и контактно поляризованной пленок.

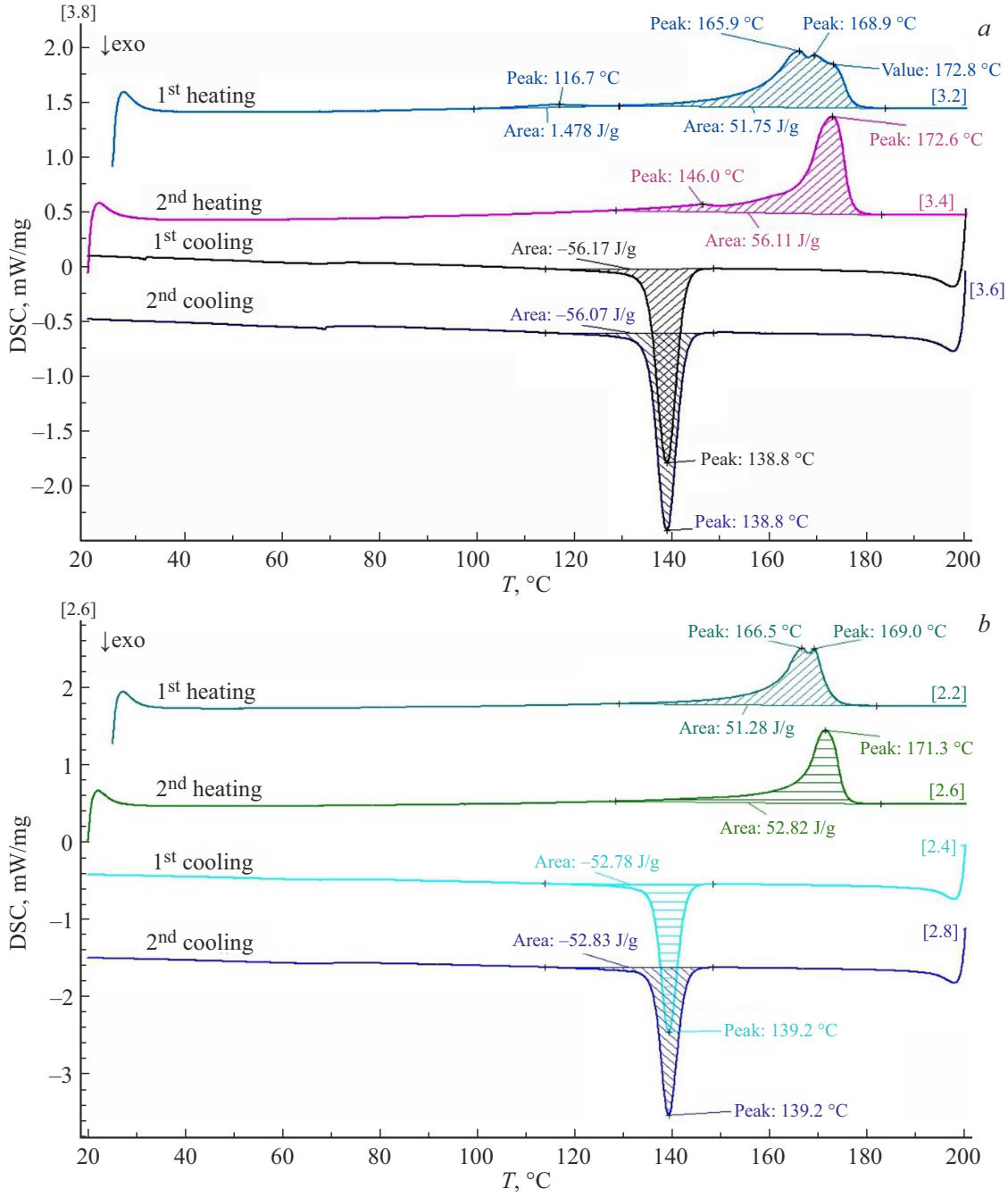

Рис. 2. Кривые ДСК для *a*) неполяризованной и *b*) поляризованной пленок ПВДФ.

Из данных ДСК видны различия в структуре образцов до и после поляризации. Степень кристалличности, рассчитанная по формуле (1), для неполяризованной пленки составила 51 %, а для поляризованной — 49 %. При этом для неполяризованной пленки на кривой первого нагрева присутствует пик при 116.7 °C, соответствующий плавлению вторичных кристаллитов [21], который также вносит вклад в общую степень кристалличности и пропадает после поляризации.

Для обеих пленок характерны пики, соответствующие α-фазе (168.9 °C) и β-фазе (165.9 °C). Однако на кривой первого нагрева неполяризованной пленки также присутствует пик γ-фазы (172.8 °C), который также пропадает при поляризации. Кристаллиты в γ-конформации также являются полярными, но обладают худшими сегнетоэлектрическими свойствами по сравнению с β-фазой. Следовательно, снижение доли γ-фазы после контактной поляризации может свидетельствовать об улучшении сегнетоэлектрических свойств материала.

Исходя из формы пиков, можно сделать вывод о том, что образец после поляризации обладает более совершенной структурой кристаллитов.

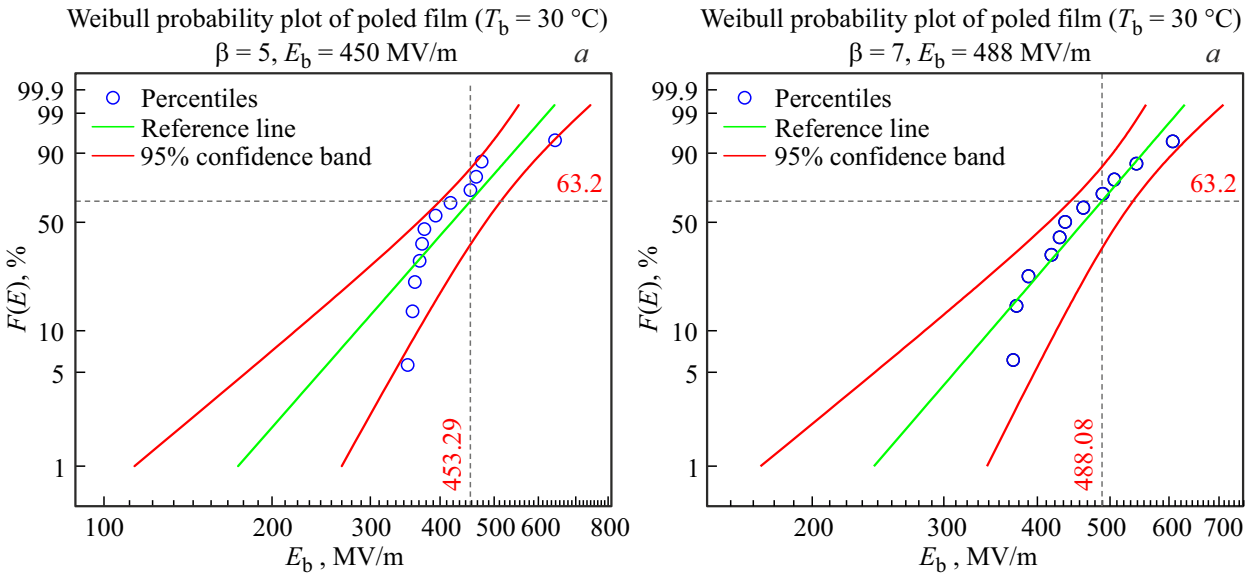

Рис. 3. Измерение величины электрической прочности с использованием двухпараметрической модели Вейбулла *a*) поляризованной и *b*) неполяризованной пленок ПВДФ.

С использованием двухпараметрической модели Вейбулла (рис. 3) рассчитаны значения электрической прочности пленок ПВДФ до и после поляризации. Величина электрической прочности неполяризованных пленок оказалась немного выше во всем температурном диапазоне, что также может говорить о более совершенной кристаллической структуре материала.

В табл. 1 представлены результаты контактной поляризации пленок, а также величины электрической прочности в зависимости от температуры электрического пробоя T_b.

Как видно из данных табл. 1, после электрического пробоя значения пьезокоэффициентов d_{33} оказываются ненулевыми как для поляризованной, так и для предварительно не поляризованной пленок. При этом значения исходных пьезокоэффициентов поляризованной пленки несколько выше значений после пробоя.

Таблица 1. Электрофизические свойства пленок ПВДФ до и после электрического пробоя

№	T_b, °C	E_b, MV/m	d_{33} до пробоя, pC/N	d_{33} после пробоя, pC/N
Поляризованная пленка				
1	30	450	17	15
2	50	430	17	16
3	70	480	17	15
Неполяризованная пленка				
4	30	488	0	16
5	50	520	0	13
6	70	490	0	11

Чувствительность ЭАП (M_v), характеризующая отношение выходного электрического сигнала к акустическому давлению, при работе в продольном режиме рассчитывается следующим образом [22]:

$$M_v = g_{33}t, \tag{4}$$

где g_{33} — пьезоэлектрический коэффициент, t — толщина пленки (28 μm).

Пьезоэлектрические коэффициенты g_{33} и d_{33} связаны соотношением

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_0 \varepsilon'} \tag{5}$$

где ε_0 — электрическая постоянная, равная $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m, ε' — действительная часть диэлектрической проницаемость, величина которой, согласно паспортным данным, для данного полимера составляет 12.

Подставим в (5) среднее измеренные значения d_{33} — 16 pC/N, получим, что коэфициент $g_{33} = 0.15$ Vm/N. Следовательно, чувствительность ЭАП на основе исследуемой пленки, согласно (4), равна 4.2 μV/PA, что согласуется с литературными данными [9].

Методами СЗМ в режиме СМП исследованы морфологические изменения после электрического пробоя. Выявлено, что размер припробойной локально поляризованной области составляет в среднем 225 μm. На границе пробойной области вблизи отверстия наблюдается деструкция материала. После электрического пробоя возрастает среднеквадратичная шероховатость пленки. Эти закономерности справедливы как для поляризованных, так и для предварительно не поляризованных образцов.

В табл. 2 приведены морфологические характеристики пленок после пробоя, в том числе величины RMS

Таблица 2. Данные сканирующей зондовой микроскопии

№	RMS, nm			h, nm			Период профиля, μm		
	0 mm*	0.225 nm	1.2 mm	0 μm	0.225 mm	1.2 mm	0 mm	0.225 mm	1.2 mm
Поляризованная пленка									
1	27	50	15	24	18	19	5	11	8
2	29	29	18	20	14	17	6	7	8
3	10	10	11	19	18	16	7	8	6
Неполяризованная пленка									
4	28	29	22	20	19	22	8	7	17
5	28	17	18	22	19	23	6	4	5
6	36	37	26	17	20	16	6	9	9

Примечание. * расстояние от места пробоя.

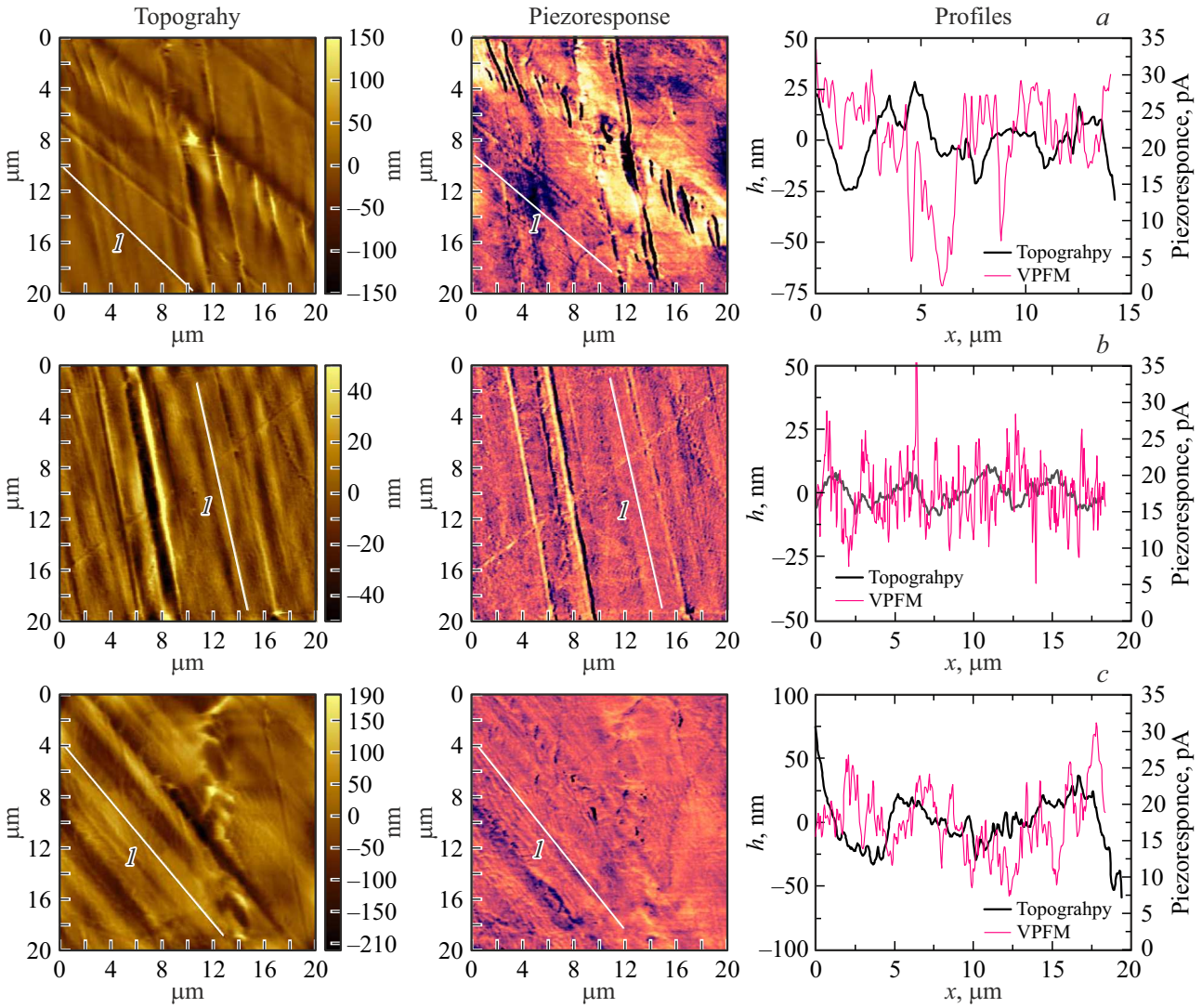

Рис. 4. Данные силовой микроскопии для поляризованной пленки ПВДФ, подвергнутой электрическому пробою при 30 °C: *a*) место вблизи точки пробоя, *b*) место на расстоянии 225 μ от точки пробоя, *c*) место вдали от точки пробоя.

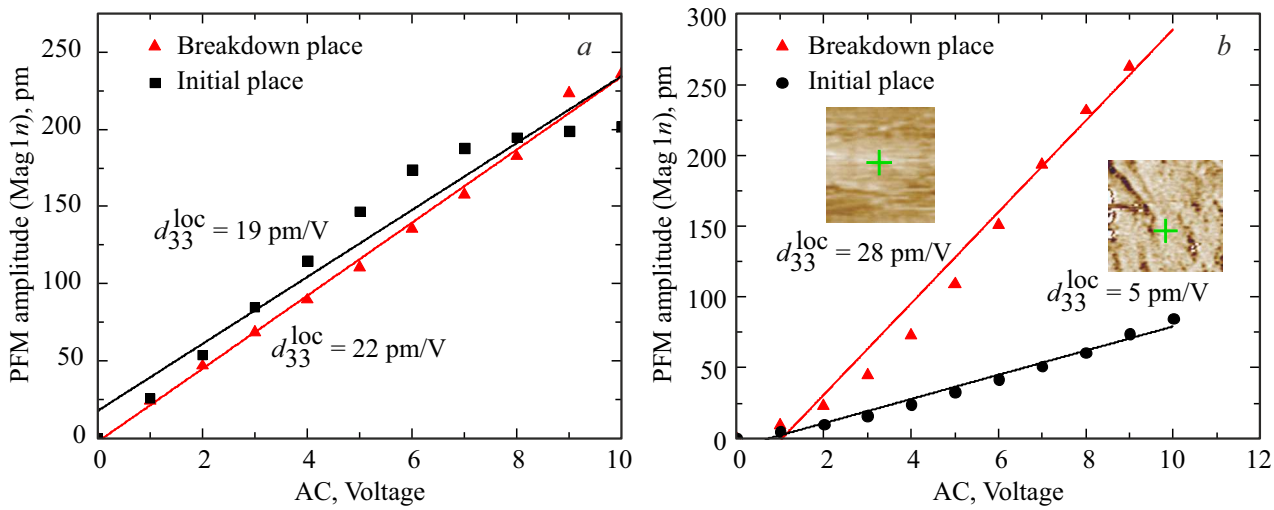

Рис. 5. Измерение локальных пьезокоэффициентов из данных СМП вблизи точки пробоя и в отдалении: *a*) поляризованная пленка, *b*) неполяризованная пленка.

Таблица 3. Данные силовой микроскопии пьезоотклика

№	d_{33}^{loc}, pm/V		Размер доменов ξ, nm		
	0 mm*	1.2 mm	0 mm	0.225 mm	1.2 mm
Поляризованная пленка					
1	16	15	113	62	83
2	15	12	85	99	63
3	14	11	168	151	99
Не поляризованная пленка					
4	24	3	165	60	99
5	14	5	46	70	100
6	13	4	60	138	114

Примечание. * расстояние от места пробоя.

шероховатости поверхности, высота профиля h и период профиля, вычисленный с использованием уточненного преобразования Фурье.

Как видно из данных табл. 2, структура, характерная для экструзионных пленок, меняется вблизи области пробоя, средняя высота профиля возрастает с 19 nm для области, отдаленной от точки пробоя, до 24 nm для области вблизи пробоя, пленка становится более неоднородной, что коррелирует с величиной среднеквадратичной шероховатости.

Немонотонная зависимость шероховатости профиля поверхности от расстояния от точки пробоя может быть связана как с неоднородностью пленки, так и с геометрией высоковольтного электрода и локальным перегревом пленки во время электрического пробоя.

Доменная структура полимера была изучена с помощью силовой микроскопии пьезоотклика. На рис. 4 представлены топографии поверхности пленки, сигналы вертикального пьезоотклика. Для оценки размеров сегнетоэлектрических доменов построены профили топографии и вертикального пьезоотклика для трех точек в разном удалении от места пробоя.

Так, для профиля топографии период, вычисленный с использованием уточненного преобразования Фурье, составил 8 μm, а для сигнала вертикального пьезоотклика — 2 μm (рис. 4, *c*). Это означает, что размеры сегнетоэлектрических доменов на поверхности пленок меньше латеральных размеров шероховатости. Можно предположить, что на размеры доменов существенно влияет величина дипольных взаимодействий.

Для уточнения полученных данных с использованием автокорреляционной функции были рассчитаны средние размеры сегнетоэлектрических доменов ξ и латеральные размеры шероховатости.

$$\langle C(r)\rangle = A \cdot \exp\left[-\left(\frac{r}{\langle\xi\rangle}\right)^{2h}\right], \qquad (6)$$

где A — константа, r — расстояние от центрального пика (nm), определенное из изображения автокорреляционной функции, ξ — среднее значение размера домена (nm), h $(0 < h < 1)$ — параметр [23].

Например, для неполяризованной пленки средний латеральный размер шероховатости составил 341 nm, а размер сегнетоэлектрических доменов, рассчитанный из автокорреляционной функции — 165 nm. Полученный результат согласуется с литературными данными [24].

В табл. 3 и на рис. 5 приведены значения локальных пьезокоэффициентов.

В случае неполяризованной пленки видно, что при удалении от точки пробоя значение пьезокоэффициента снижаются от 28 до 5 pm/V, что свидетельствует о поляризованном состоянии пленки только в припробойной области. При этом макроскопические пьезокоэффициенты, измеренные методом Берлинкура, для области, отделенной от места пробоя, равны нулю. Полученные данные говорят о наличии спонтанной поляризации пленки (Ps), которая для всего объема образца

оказывается скомпенсирована из-за разупорядоченного расположения сегнетоэлектрических доменов.

Кроме того, с увеличением температуры, при которой происходил пробой, значения пьезокоэффициента d_{33} падают с 15 до 13 pC/N, что может говорить о снижении влияния локальной поляризации. При этом ранее было замечено, что температура контактной поляризации в области 20−100 °C существенно не влияет величину пьезокоэффициентов пленок ПВДФ (в отличие от других сополимеров ВДФ). Это может быть связано с локальным перегревом припробойной области.

4. Заключение

Изучено влияние электрического пробоя на электрофизические свойства сегнетоэлектрических полимерных пленок ПВДФ в температурном диапазоне от 30 до 70 °C до и после поляризации. Обнаружено, что электрический пробой приводит к локальной поляризации материала в области до 250 μm от точки пробоя. Это может быть обусловлено геометрией высоковольтного электрода, который имел форму сферы, из-за чего электрическое поле в отдалении от центра электрода и соответственно точки пробоя уменьшалось. С помощью силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика измерены значения локальных пьезокоэффициентов d_{33} вблизи и в отдалении от точки пробоя. Выявлено, что для неполяризованной пленки значения пьезокоэффициентов оказываются ненулевыми вблизи точки пробоя (25 pm/V) и снижаются практически до нуля (4 pm/V) в отдалении от пробойной области. Кроме того, с увеличением температуры, при которой происходил пробой, значения пьезокоэффициента d_{33} падают, что может говорить о снижении влияния локальной поляризации.

Отмеченный эффект может быть использован для создания структур с массивом упорядоченных локально поляризованных и неполяризованных областей — к примеру, для разработки электроакустических преобразователей для гидроакустики.

Благодарности

Авторы благодарят В.В. Кочервинского за идеологический вклад в работу. Исследования методами сканирующей зондовой микроскопии выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSME-2024-0001).

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFN-2024.0014).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Organic Ferroelectric Materials and Applications / Ed. K. Asadi. Woodhead Publishing: Sawston, UK (2021).
[2] M.G. Broadhurst, G.T. Davis. Ferroelectrics **60**, *1*, 3 (1984).
[3] A. Vodyashkin, E. Koshevaya, M. Makeev, P. Kezimana. Biomater. Sci. **12**, *20*, 5164 (2024).
[4] В.В. Кочервинский, О.В. Градов, М.А. Градова. Усп. химии **91**, *11*, RCR5037 (2022). [V.V. Kochervinskii, O.V. Gradov, M.A. Gradova. Russ. Chem. Rev. **91**, *11*, RCR5037 (2022).]
[5] B.A. Basov, K.T. Makarova, E.L. Buryanskaya, K.M. Moiseev, A.S. Osipkov, A.A. Maltsev. In: 2024 IEEE UFFC-JS (2024). Pp. 1−6.
[6] T.T. Wang, J.M. Herbert, A.M. Glass. The Applications of Ferroelectric Polymers. Springer, Netherlands (1988).
[7] Z. Gao, D. Min, L. Yang, Y. Duan, Q. Wu, S. Zhu, S. Qin. In: Int. Conf. Energy Storage and Intelligent Vehicles (ICEIV). Springer Nature, Singapore (2022). Pp. 1089−1107.
[8] Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. Наука, СПб (2004). 410 с.
[9] Q. Zhang, P.A. Lewin. Ferroelectrics **171**, *1*, 381 (1995).
[10] В.В. Кочервинский. Усп. химии **65**, *10*, 936 (1996). [V.V. Kochervinskii. Russ. Chem. Rev. **65**, *10*, 865 (1996).]
[11] P. Saxena, P. Shukla. Adv. Composites. Hybrid Mater. **4**, *1*, 8 (2021).
[12] R. Tao, J. Shi, M. Rafiee, A. Akbarzadeh, D. Therriault. Mater. Adv. **3**, *12*, 4851 (2022).
[13] V.V. Kochervinskii, I.A. Malyshkina, D.A. Kiselev, T.S. Ilina, N.V. Kozlova, N.A. Shmakova, A.A. Korlyukov, M.A. Gradova, S.A. Bedin. J. Appl. Polymer Sci. **137**, *41*, 49235 (2020).
[14] R. Cai, B. Nysten, Z. Hu, A.M. Jonas. Appl. Phys. Lett. **110**, *20*, 202901 (2017).
[15] N. Jia, Q. He, J. Sun, G. Xia, R. Song. Polymer Testing **57**, 302 (2017).
[16] S. Chen, X. Li, K. Yao, F.E.H. Tay, A. Kumar, K. Zeng. Polymer **53**, *6*, 1404 (2012).
[17] V.V. Kochervinskii, E.L. Buryanskaya, A.S. Osipkov, D.S. Ryzhenko, D.A. Kiselev, B.V. Lokshin, A.I. Zvyagina, G.A. Kirakosyan. Polymers **16**, *2*, 233 (2024).
[18] S. Satapathy, S. Pawar, P.K. Gupta, K.B.R. Varma. Bull. Mater. Sci. **34**, *4*, 727 (2011).
[19] L. Wu, Z. Jin, Y. Liu, H. Ning, X. Liu, Alamusi, N. Hu. Nanotechnol. Rev. **11**, *1*, 1386 (2022).
[20] C. Laurent, C. Chauvet, J. Berdala. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation **1**, *1*, 160 (1994).
[21] M. Neidhöfer, F. Beaume, L. Ibos, A. Bernes, C. Lacabanne. Polymer **45**, *5*, 1679 (2004).
[22] F.V. Hunt. Electroacoustics. McGraw Hill (2014).
[23] R.C. Munoz, G. Vidal, M. Mulsow, J.G. Lisoni, C. Arenas, A. Concha, R. Esparza. Phys. Rev. **62**, *7*, 4686 (2000).
[24] V.V. Kochervinskii, D.A. Kiselev, M.D. Malinkovich, A.S. Pavlov, I.A. Malyshkina. Colloid. Polym. Sci. **293**, *2*, 533 (2015).

Редактор Е.В. Толстякова