06

Влияние материала электрода на высоковольтный отклик полимерных сегнетоэлектриков при деформациях изгиба или кручения

© В.В. Кочервинский,[1] А.С. Осипков,[1] Е.Л. Бурьянская,[1,2] Д.А. Киселев,[2] П.А. Михалев,[1] С.А. Баскаков,[3] Ю.М. Шульга,[3] М.О. Макеев[1]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“, 119049 Москва, Россия
[3] Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: buryanskayael@bmstu.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 26 января 2026 г.
Принято к публикации 29 января 2026 г.

Проведен анализ формы и величины сигнала поляризационного отклика сегнетоэлектрических пленок с двумя типами электродов, имеющих различные упругие свойства, при подаче на них электрического поля в виде биполярных прямоугольных импульсов, которое может вызвать в пленке деформации изгиба или кручения. При использовании электродов из металла и органического композита с графенсодержащими частицами обнаружено, что в первом случае при подаче поля поляризационный отклик оказывается выше. Это может быть обусловлено появлением дополнительных растягивающих механических напряжений, так как упругие постоянные органической пленки и металлического электрода различались. Показано, что возникающие напряжения меняют микроструктуру цепей аморфной фазы, в которой находятся как собственные примесные носители, так и заряды, инжектированные из электродов. Изменение микроструктуры цепей аморфной фазы осуществляется путем изменения в ней соотношения поворотных изомеров и становится возможным по причине ее высокой податливости при комнатной температуре.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, полимерные сегнетоэлектрики, гибкая электроника, самополяризация.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.63004.310-25

Введение

Развитие гибкой и носимой электроники, мягкой робототехники и интеллектуальных энергогенерирующих систем сформировало устойчивый спрос на функциональные материалы, способные преобразовывать механическую энергию в электрическую в условиях сложного нелинейного нагружения. Полимерные сегнетоэлектрики, в частности, поливинилиденфторид (ПВДФ) и его сополимеры являются ключевыми кандидатами для таких применений благодаря целому ряду их специфических свойств, и уже находят широкое применение в технике [1,2] и биомедицине [3,4]. На основе таких пленок разрабатываются датчики и устройства для проведения мониторинга и ультразвуковой диагностики [5–9] с целью, например, измерения кровотока или механических свойств тканей, визуализации органов или плода. Терапевтические и хирургические применения включают физиотерапию, литотрипсию, транскраниальную нейромодуляцию и термическую или механическую абляцию опухолей [9].

По сравнению с классическими неорганическими пьезоэлектриками такие материалы имеют более низкие значения зарядового пьезоотклика (пьезоэлектрические модули заряда d_{ij} и d_h), что снижает их эффективность в электроакустических преобразователях (ЭАП), излучающих акустический сигнал. Однако их пьезоэлектрические модули напряжения (g_{ij} и g_h) оказываются на порядок выше, делая такой материал более эффективным для сенсоров или приемников акустического сигнала [5], особенно в высокочастотной области. В отличие от жестких и хрупких неорганических пьезоэлектриков полимерные материалы обладают гибкостью, легкостью, простотой обработки и производства, высокой механической прочностью, что позволяет производить из них пленки в больших объемах с низкой себестоимостью.

На сегодняшний день полимерные сегнетоэлектрики все шире используются в гибкой электронике и мягкой робототехнике [10–15]. Благодаря обратному пьезоэффекту ПВДФ действует как мягкий, высокочастотный и точный актюатор („искусственная мышца“), что позволяет создавать разнообразные локомоционные стратегии — от волнообразного плавания [11] и ползания [12] до манипулирования объектами [10,13], — которые отличаются бесшумностью, плавностью и биомиметичностью. Так, например, в работе [11] описана конструкция

робота, похожего на рыбу, на основе высокоэффективных биморфных исполнительных материалов из графена и ПВДФ. Два слоя ПВДФ соединены так, что при подаче напряжения один слой расширяется, а другой сжимается, вызывая изгиб всей пластины. Подобная технология может быть использована для создания бесшумных, маневренных подводных роботов для мониторинга морской фауны без отпугивания. В работах [13–15] описана возможность создания роботизированного катетера для сердечно-сосудистой хирургии. Гибкий катетер с сегментированными ПВДФ-кольцами может точно изгибаться под управлением хирурга для навигации по сосудистому руслу. Одновременно встроенные ПВДФ-сенсоры сообщают о силе контакта со стенками сосуда, предотвращая травмирование.

Одной из важнейших характеристик сегнетоэлектрических материалов является величина пьезоотклика, который они приобретают в процессе поляризации. Обычно в литературе обсуждают вопросы, касающиеся механизмов пьезоэлектричества при деформации сегнетоэлектрических текстурированных пленок на основе ПВДФ вдоль направлений $1-3$ [1–3,16,17]. Здесь цифры в порядке их повышения означают соответственно направления одноосной вытяжки (в плоскости пленки), перпендикулярное к ней направление (2) и нормаль к плоскости пленки (3). С другой стороны, для рассматриваемых материалов (с текстурой „монокристалла“) в рамках принятой симметрии матрица пьезокоэффициентов имеет следующие ненулевые компоненты [1–3,16]:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{24} & 0 & 0 \\ +d_{31} & +d_{32} & -d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \qquad (1)$$

Из соотношения (1) следует, что, помимо ненулевых компонент матрицы на растяжение, есть две компоненты (d_{24} и d_{15}), которые чувствительны к деформации изгиба и кручения. Несмотря на то что в практическом плане отмеченные ненулевые компоненты играют ключевую роль при эксплуатации устройств, подверженных изгибу и кручению (например, в „умной“ одежде, искусственных мышцах, вращающихся элементах накопителей энергии или в давно реализованных устройствах на основе биморфных структур [17–24]), где возникают комплексные механические напряжения, приводящие к неоднородной переполяризации материала и, как следствие, к сложному высоковольтному отклику, механизмы пьезоэффекта при таком изгибе или кручении в настоящий момент изучены недостаточно. В частности, не изучено влияние материала электрода на высоковольтный поляризационный отклик сегнетоэлектрического сополимера, которое именно при таких видах деформаций может оказаться весьма существенным в зависимости от физико-механических характеристик материала. Это обусловлено, прежде всего, высокими коэрцитивными полями в рассматриваемых полимерах, которые будут приводить к инжекции носителей заряда из материала электрода в полимер. При этом инжектированные носители сами по себе могут приводить к появлению пьезоэффекта даже в неполярных полимерах [25]. Отмеченные явления инжекции носителей будут иметь место и в случае пленок ПВДФ с высокими значениями дипольного момента мономерного звена. В настоящий момент исследователи, работающие в области рассматриваемых полимеров, однозначно пришли к выводу, что моделирование и интерпретация их пьезоэлектрических свойств должна учитывать как наличие собственных диполей, так и инжектированных при поляризации носителей [26]. Все это обусловливает актуальность исследования механизмов возникновения пьезоэлектрического отклика в таких материалах.

В настоящей работе затронуты проблемы, касающиеся механизмов пьезоэффекта при изгибе и кручении. Исследовано влияние материала электрода на зарядовый и токовый отклик пленок сополимера винилиденфторида (ВДФ) с тетрафторэтиленом (ТФЭ) при подаче на них электрического поля в виде биполярных прямоугольных импульсов.

1. Материалы и методы исследования

В настоящей работе исследована пленка сополимера ВДФ/ТФЭ, полученная методом экструзии из расплава кристаллизацией преимущественно в полярной β-фазе с последующей одноосной ориентацией. Кратность вытяжки составила 300 %, ориентацией проходила при 80 °C. Для изготовления пленки использован порошок фторопласта Ф2м марки Б (ГалоПолимер, Кирово-Чепецк). Методом ЯМР высокого разрешения ранее [27] была исследована микроструктура данного сополимера. Показано, что мольная доля ТФЭ составила 6 mol.% при 3 mol.% внутрицепных дефектов присоединения „head-to-head (tail-to-tail)“ соседних мономерных звеньев. Степень кристалличности и размер кристаллитов полярной β-фазы рассчитывались с помощью рентгенодифракционого анализа, они составили 47 % и 8.9 nm соответственно [27].

Перед проведением высоковольтных измерений пленки предварительно не поляризовали. Толщина исследуемой пленки составила 58 μm. Величина среднеквадратичной шероховатости пленок, измеренная с помощью сканирующей зондовой микроскопии, составила 40 nm [27]. Для испытаний использовались образцы размером 2×2 cm.

На обе поверхности образцов были нанесены два типа электродов: первый (толщиной 50 nm) наносился методом термического распыления серебра (Ag) в вакууме, а второй — из органической матрицы из этилцеллюлозы, содержащей графеновые частицы. Подробное описание технологии изготовления и нанесения таких органических электродов приведено в работе [28]. Диаметр металлических электродов составил 10 mm.

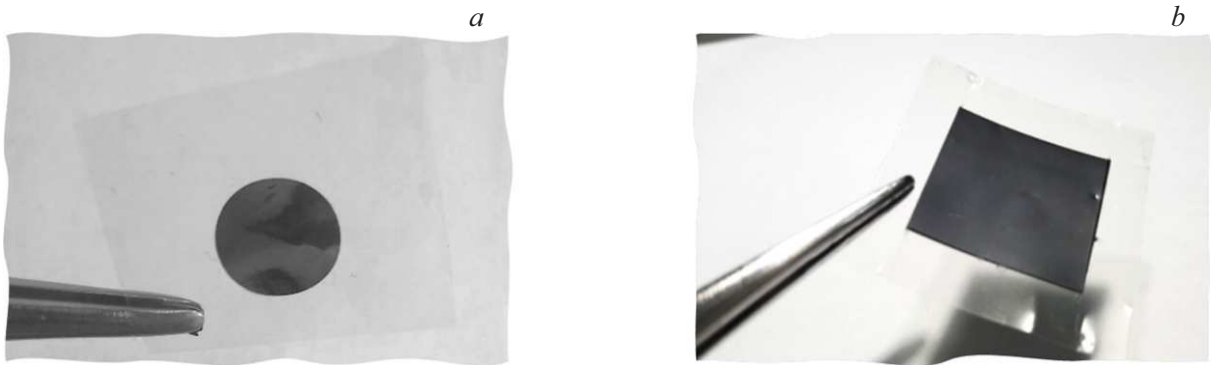


Рис. 1. Внешний вид исследованных образцов: *a* — пленка с металлическим электродом, *b* — пленка с графеноподобным электродом.

Органические электроды наносились в виде квадрата со стороной 15 mm. Внешний вид образцов представлен на рис. 1.

Зарядовый и токовый отклики образца измерялись на установке с использованием модифицированной схемы Сойера–Тауэра (рис. 2) [29]. При этом использовался источник с напряжением до 5 kV. Высоковольтные поляризационные измерения проводились двумя способами: образец подвергался короткому замыканию после каждого цикла поляризации („закорачиванию"), или такое короткое замыкание не использовалось. Все электрические измерения проводились при температуре 22 °C.

В исходном состоянии пленки имели не плоскую форму и характеризовались некоторым радиусом кривизны R_1 (рис. 3, *a*). Предполагается, что в процессе изготовления пленки возникает процесс самополяризации [30,31], так как обеспечить идентичность условий кристаллизации на обеих сторонах пленки технологически затруднительно. Поэтому внутренне поле формирующегося сегнетоэлектрика на обеих сторонах пленки в этой связи может различаться. Опубликованные ранее результаты измерения поверхностного потенциала методом микроскопии зонда Кельвина, значения которых, действительно, различаются на обеих сторонах пленки [23], подтверждают выдвинутую гипотезу. Это позволяет говорить о неоднородном распределении поляризации по толщине пленки при самополяризации, что вытекает также из общих уравнений для пьезоэлектричества.

Для пленки, которая работает на компонентах d_{24} и d_{15} матрицы (1), поверхность с диэлектрической проницаемостью ε_3 при подаче на нее поля E_3 приобретает кривизну $1/R_2$ (рис. 3, *b*), где R_2 — радиус кривизны возникающей криволинейной поверхности, а электрическое смещение в направлении нормали к поверхности D_3 можно записать следующим образом:

$$D_3 = \varepsilon_3 E_3 + \beta_{31} \cdot \frac{1}{R}, \tag{2}$$

где β_{31} — изгибный пьезокоэффициент по механическому напряжению. Расчет такого коэффициента на практике осуществляется по классической методике, когда поляризованная пленка длиной l и шириной ω с нанесенными электродами жестко зажимается одним концом. При приложении переменного электрического поля возникает смещение свободного конца на величину Δz, и расчет β_{31} можно провести по формуле (3) через генерируемый заряд Q. В предположении малости δ_z можно записать

$$D_{31} = \left(\frac{l}{2w}\right)\left(\frac{Q}{\Delta z}\right). \tag{3}$$

Если принять во внимание, что после процесса поляризации возникающая пьезоконстанта d_{31} не обязательно

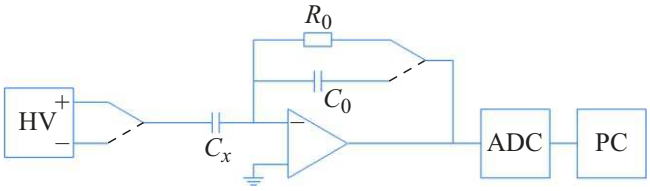


Рис. 2. Модифицированная схема Сойера–Тауэра для измерения поляризационного отклика пленки.

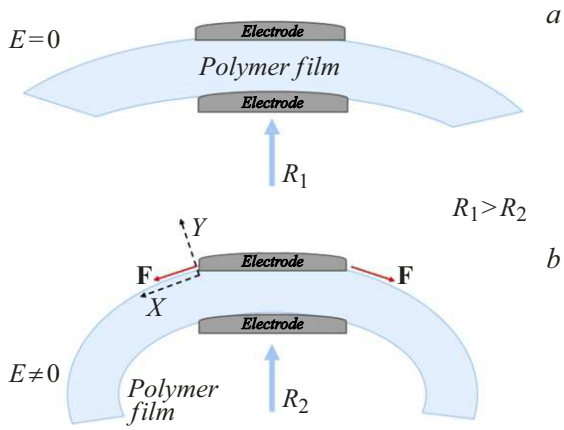


Рис. 3. Изменение радиуса кривизны пленки сополимера ВДФ/ТФЭ при приложении электрического поля.

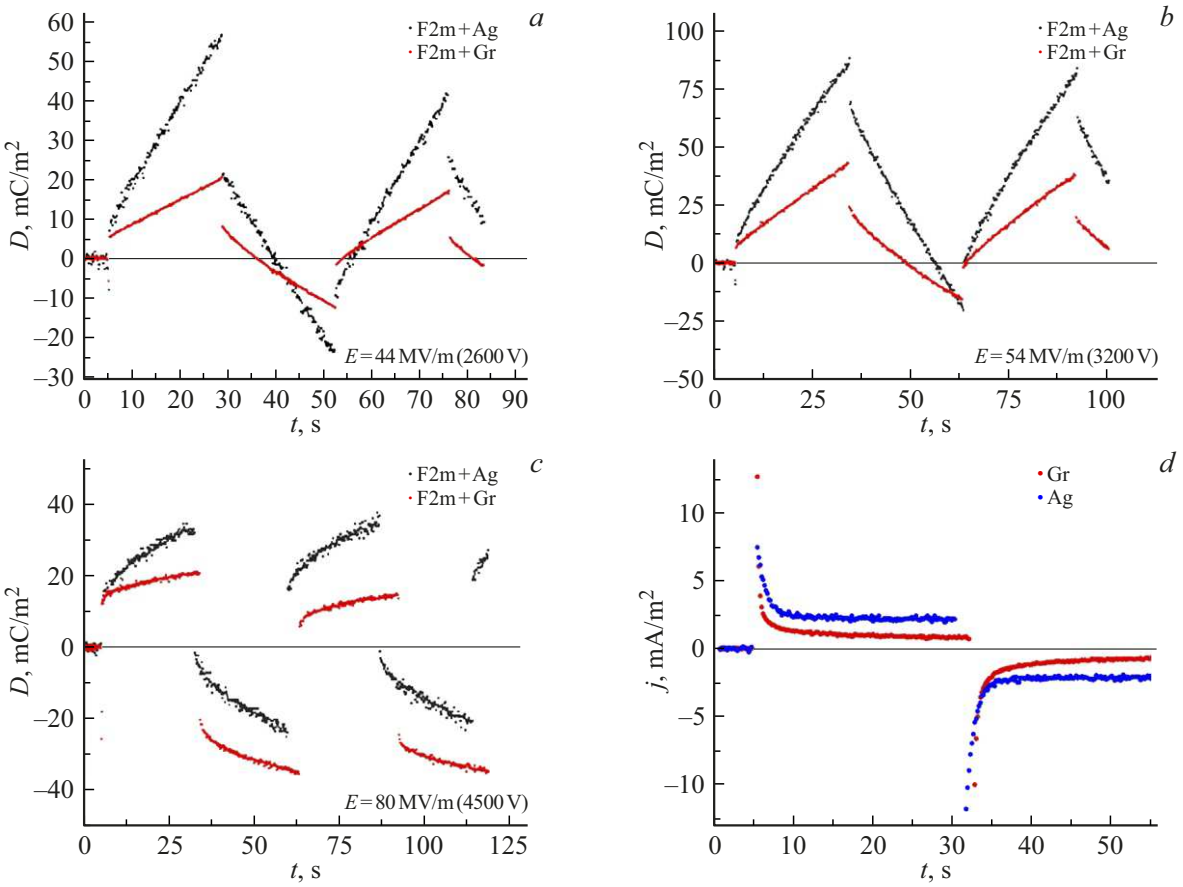


Рис. 4. Сравнительные кривые зарядового (a–c) и токового (d) отклика (при поле 50 MV/m) на пленке сополимера ВДФ/ТФЭ с различными электродами.

будет постоянной по толщине пленки, то общее уравнение для пьезоэлектричества будет иметь вид [32]:

$$D_3 = \varepsilon_3 E_3 + d_{31} X_1 + f_{31}\left(\frac{dX_1}{dz}\right), \qquad (4)$$

где X_1 — механическое напряжение вдоль направления 1, f_{31} — изгибная пьезоконстанта по деформации, которая характеризует градиент напряжения по толщине z.

С учетом уравнения (2) можно записать

$$\frac{1}{R}\beta_{31} = d_{31} X_1 + f_{31}\frac{dX_1}{dz}. \qquad (5)$$

Таким образом, из соотношения (5) следует, что если внутреннее поле на разных сторонах пленки различно, то радиус кривизны на них в отсутствие внешнего электрического поля тоже должен различаться.

Качественно к такому же выводу можно прийти и из рассмотрения соотношений механики для макроскопического тела, согласно которым напряжение вдоль направления i определяется упругой постоянной C_i в этом же направлении:

$$X_i = C_i\left(\frac{1}{R}\right) z. \qquad (6)$$

Можно предположить, что упругие постоянные с 1-й и 2-й стороны пленки различаются. Основанием для этого служит различие в соотношении поворотных изомеров на разных сторонах [27]. В соответствии с соотношением (6) радиус кривизны с обеих сторон пленки тогда должен различаться, что и будет приводить к изгибу пленки в свободном состоянии.

Визуальное наблюдение за формой пленки показывает, что подача переменного поля (биполярные прямоугольные импульсы) вызывает в пленке изгибные колебания. Анализ формы и величины сигнала поляризационного отклика при использовании в качестве электрода материалов с различными упругими постоянными позволяет раскрыть механизмы механизмов пьезоэффекта при деформациях такого типа.

2. Результаты

Для пленок с различными типами электродов было проведено сравнение зарядового и токового откликов при подаче на них одинакового электрического поля в виде биполярных прямоугольных импульсов, примеры которых показаны на рис. 3.

Можно наблюдать, что в случае металлического электрода кривые поляризационного отклика на положительном полупериоде (когда электроды предварительно „закорачивались“) всегда оказываются выше, чем в случае органического композита. С целью объяснения данного различия приведем описание этой части кривой в предположении, что имеет место классическое переключение остаточной поляризации P_r с временем τ_s с учетом вклада в измеряемое электрическое смещение D удельной электропроводимости σ-пленки [33]:

$$D = \varepsilon_0 E + \sigma t^m E + 2P_r \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_s}\right)^n\right)\right], \qquad (7)$$

где t — время, P_r — остаточная поляризация, τ_s — среднее время переключения спонтанной поляризации, а m и n — эмпирические коэффициенты. В выражении (7) учитывается вклад в электрическое смещение как связанных (третье слагаемое), так и квазисвободных (второе слагаемое) зарядов.

Ввиду того, что полевые зависимости P_r в рассматриваемой пленке при обоих типах электродов оказываются сходными (рис. 4), избыточный сигнал на первом полупериоде внешнего поля в пленке с электродами из Ag с хорошей адгезией следует связывать именно с изменением электропроводности полимера (рис. 5).

На рис. 6 показаны полевые зависимости удельной электропроводности для обоих типов электродов, полученные из кривых электрического смещения $D(t)$ (рис. 4, *a*), а также методом квазистационарных токов из закона Ома для одномерного (в направлении нормали к поверхности пленки) случая из кривых токового отклика (рис. 3, *d*).

Результаты расчета удельной электропроводности разными методами сходятся до значений поля 50–60 MV/m (что соответствует коэрцитивным полям E_c [3,2]), при повышении величины напряженности поля начинается расхождение, обусловленное аномальным снижением проводимости за счет повышения эффективного сечения захвата носителей. Данный вопрос подробно рассматривался в работе [27]. Вместе с тем качественное поведение кривых $\sigma_D(E)$ и $\sigma_j(E)$ совпадает, имея максимум в районе 50–60 MV/m. При этом удельная электропроводность, рассчитанная обоими способами, оказалась выше в случае электродов из Ag.

Объяснить изменение электропроводности полимера для образцов с различным типом электродов можно возникновением растягивающих напряжений при изменении радиуса кривизны пленки в процессе подачи на нее поля вдоль выделенного направления X (рис. 1, *b*, силы F_1 и F_2). Такой вывод будет справедлив, если считать, что металлический электрод не деформируется вследствие его хорошей адгезии. Ввиду того, что материалы металлического электрода и полимерной пленки имеют различные упругие константы, возникающие напряжения будут различаться. Модуль Юнга ПВДФ и его сополимеров находится в пределах 2.0–3.5 GPa [1], при этом

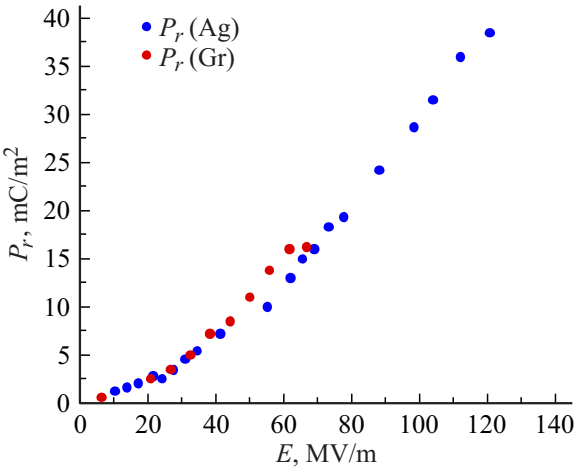


Рис. 5. Полевые зависимости остаточной поляризации в пленке сополимера ВДФ/ТФЭ с различными электродами.

модуль Юнга металлов в среднем оказывается на два порядка выше: 80–200 GPa. Использование композитных графенсодержащих полимерных электродов, чей модуль Юнга по большей части обусловлен механическими свойствами полимерной матрицы (2.2–4.0 GPa) [34,35], позволяет минимизировать эту разницу.

Следует учесть, что рассматриваемый полимерный сегнетоэлектрик характеризуется матрицей упругих коэффициентов в виде [1–3,16]

$$\begin{matrix} C_{11} & C_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{22} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{matrix}. \qquad (8)$$

Если считать, что ось X на рис. 1, *b* совпадает с направлением 1, то возникающие отмеченные силы в соответствии с (6) должны характеризоваться упругой постоянной C_{11}. Поскольку композитный электрод имеет органическую природу, его упругие коэффициенты C_{ij} будут близки к таковым в пленке сополимера [16]. Поэтому при таких электродах отмеченные эффекты будут отсутствовать, а кинетические кривые $D(t)$ в случае графенсодержащих электродов имеют отличный по сравнению с металлическим электродами вид.

3. Обсуждение

Полученные результаты показали, что появление растягивающих сил F_1 и F_2 вызывает дополнительный вклад в измеряемое значение D_3. В этой связи можно утверждать, что за повышение проводимости при использовании металлических электродов должны отвечать структурные изменения в пленке под действием дополнительного механического напряжения X_1. В аморфной фазе

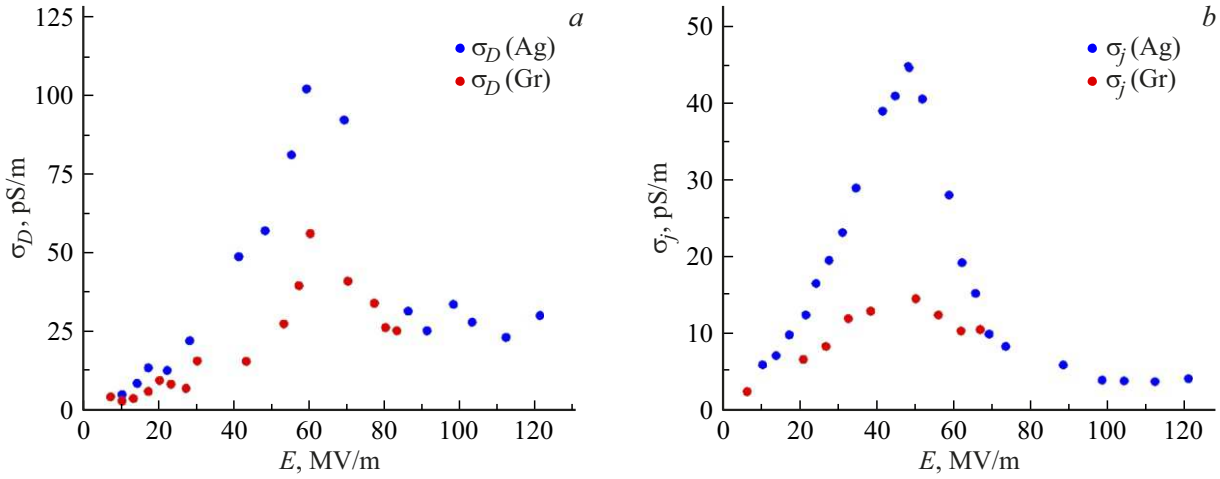


Рис. 6. Полевые зависимости проводимости, полученные из кинетических кривых $D(t)$ (a) и из квазистационарных значений тока $j(t)$ (b) при подаче биполярных прямоугольных импульсов электрического поля.

такие напряжения могут достигать 10–50 MPa [36]. Указанные механические напряжения способствуют переходу части аморфной фазы в полярную кристаллическую фазу или изменению ее конформации за счет ориентации цепей под действием комбинированного электрического и механического воздействий. В работах [37,38] было показано, что фазовые переходы в полимерах происходят при достижении определенных эффективных значений механических напряжений, которые, в свою очередь, составляют для сополимера ВДФ–ТФЭ около 10–60 MPa [37].

Наиболее вероятно, что носители (как собственные примесные, так и инжектированные из электродов) будут находиться в аморфной фазе. Последняя будет иметь повышенный свободный объем, так как измерения проводились при комнатной температуре, что существенно выше точки стеклования (−40 °C). Это говорит о существенном отличии механизма пьезоэлектричества в рассматриваемых полимерах от такового в сегнетоэлектриках неорганической природы [1–3,16]. В последних появление пьезоэффекта связано с изменением под действием механического напряжения спонтанной поляризации. В полимерах же основной вклад дают электрострикция и так называемый „размерный эффект“, а основная роль в формировании пьезоэлектрического отклика отводится цепям аморфной фазы, которые при комнатной температуре участвуют в кооперативном микроброуновском движении [16], вследствие чего упругая постоянная C_{11} в рассматриваемых полимерах оказывается значительно ниже, чем таковая в неорганических сегнетоэлектриках.

Высокая податливость в полимерах приводит тому, что даже при небольших внешних напряжениях может измениться микроструктура их аморфной фазы. Если исходить из одного типа носителей концентрации n и с зарядом q, то создаваемая ими проводимость будет определяться выражением

$$\sigma = n\mu q. \tag{9}$$

Возможное изменение микроструктуры цепей аморфной фазы, в которой сосредоточены носители заряда, в первую очередь будет сказываться на изменении дрейфовой подвижности μ, которая в случае металлических электродов должна повышаться.

Заключение

Таким образом, анализ формы и величины сигнала поляризационного отклика сегнетоэлектрических пленок с электродами различного типа, имеющими различные упругие свойства, позволяет при подаче на них переменного поля, вызывающего деформации изгиба или кручения, раскрыть механизмы пьезоэффекта при деформациях такого типа. Возникающие в этом процессе дополнительные растягивающие напряжения, вероятнее всего, меняют микроструктуру цепей аморфной фазы, в которой находятся как собственные примесные носители, так и заряды, инжектированные из электродов. Изменение микроструктуры цепей отмеченной фазы осуществляется путем изменения в ней соотношения поворотных изомеров и становится возможным по причине ее высокой податливости при комнатной температуре.

Полученные результаты также показывают влияние материала электрода на эффективность различного рода электромеханических преобразователей, работа которых основана на деформациях изгиба или кручения.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (шифр темы FSFN-2025-0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T.T. Wang, J.M. Herbert, A.M. Glass. *The applications of ferroelectric polymers* (Blackie and Son, Bishopbriggs, Glasgow, UK, 1988)

[2] H.S. Nalwa. *Ferroelectric polymers: chemistry: physics and applications* (CRC Press, 1995)

[3] K. Asadi (Ed.). *Organic ferroelectric materials and applications* (Woodhead Publishing, Elsevier, 2021)

[4] V.V. Kochervinskii, O.V. Gradov, M.A. Gradova. Chem. Rev., **91** (11), RCR5037 (2022). DOI: 10.57634/RCR5037

[5] G.R. Harris, S.M. Howard, A.M. Hurrell, P.A. Lewin, M.E. Schafer, K.A. Wear, B. Zeqiri. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, **70** (2), 85 (2023). DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3213185

[6] Y. Xin, H. Sun, H. Tian, C. Guo, X. Li, S. Wang, C. Wang. Ferroelectrics, **502** (1), 28 (2016). DOI: 10.1080/00150193.2016.1232582

[7] M.A. O'Reilly, K. Hynynen. IEEE Transactions on Biomed. Engineer., **57** (9), 2286 (2010). DOI: 10.1109/TBME.2010.2050483

[8] Y. Lin, M.A. O'Reilly, K. Hynynen. Sensors, **23** (3), 1369 (2023). DOI: 10.3390/s23031369

[9] Y. Wu, J.K. Yim, J. Liang, Z. Shao, M. Qi, J. Zhong, Z. Luo, X. Yan, M. Zhang, X. Wang, R.S. Fearing, R.J. Full, L. Lin. Sci. Robot, **4**, eaax1594 (2019). DOI: 10.1126/scirobotics.aax1594

[10] A. Simaite, B. Tondu, P. Soufes, C. Bergaud. ACS Appl. Mater. Interfaces, **7**, 19966 (2015). DOI: 10.1021/acsami.5b04578

[11] P. Xiao, N. Yi, T. Zhang, Y. Huang, H. Chang, Y. Yang, Y. Zhou, Y. Chen. Adv. Sci., **3**, 1500438 (2016). DOI: 10.1002/advs.201500438

[12] K.T. Nguyen, S.Y. Ko, J.-O. Park, S. Park. J. Mech. Robot., **8**, 041006 (2016). DOI: 10.1115/1.4032407

[13] T. Sharma, K. Aroom, S. Naik, B. Gill, J.X. Zhang. Annals Biomed. Eng., **41** (4), 744 (2013). DOI: 10.1007/s10439-012-0708-z

[14] C.C. Nguyen, M.T. Thai, T. Hoang, J. Davies, Ph.Th. Phan, K. Zhu, L. Wu, M.A. Brodie, D. Tsai, Q.Ph. Ha, H.-Ph. Phan, N.H. Lovell, Th.N. Do. Sensors Actuators A: Phys., **357**, 114380 (2023). DOI: 10.1016/j.sna.2023.114380

[15] K. Takashima, S. Nagano, M. Watanabe, K. Ishida. J. Robotics Mechatronics, **36** (4), 899 (2024). DOI: 10.1186/s40648-019-0147-9

[16] V.V. Kochervinskii. Crystallogr. Reports, **48** (4), 649 (2003). DOI: 10.1134/1.1595194

[17] V.V. Kochervinskii, E.L. Buryanskaya, A.S. Osipkov, M.O. Makeev, D.A. Kiselev, M.A. Gradova, O.V. Gradov, B.V. Lokshin, A.A. Korlyukov. Nanomaterials, **14**, 1002 (2024). DOI: 10.3390/nano14121002

[18] M.A. Marcus. Ferroelectrics, **57** (1), 203 (1984). DOI: 10.1080/00150198408012763

[19] M. Toda. Ferroelectrics, **32** (1), 127 (1981). DOI: 10.1080/00150198108238683

[20] M. Toda. Ferroelectrics, **22** (1), 911 (1978). DOI: 10.1080/00150197908239445

[21] J.K. Lee, M.A. Marcus. Ferroelectrics, **32** (1), 93 (1981). DOI: 10.1080/00150198108238679

[22] M.A. Marcus. J. Appl. Phys., **52** (10), 6273 (1981). DOI: 10.1063/1.328571

[23] M.A. Marcus. Ferroelectrics, **40** (1), 29 (1982). DOI: 10.1080/00150198208210593

[24] E. Fukada, G.M. Sessler, J. E. West, A. Berraissoul, P. Günther. J. Appl. Phys., **62** (9), 3643 (1987). DOI: 10.1063/1.339243

[25] G. Dreyfus, J. Lewiner. J. Electrochem. Society, **120** (8), 1083 (1973). DOI: 10.1149/1.2403634

[26] G.M. Sessler, D.K. Das-Gupta, A.S. DeReggi, W. Eisenmenger, T. Furukawa, J.A. Giacometti, R. Gerhard-Multhaupt. IEEE Trans. Electr. Insul., 27, 872 (1992).

[27] V.V. Kochervinskii, E.L. Buryanskaya, D.A. Ryzhenko, A.S. Osipkov, D.A. Kiselev, G.A. Kirakosyan, B.V. Lokshin, A.I. Zvyagina. Polymers, **16**, 233 (2024). DOI: 10.3390/polym16020233

[28] V.V. Kochervinskii, S.A. Baskakov, I.A. Malyshkina, D.A. Kiselev, T.S. Ilina, M.G. Rybine, S.A. Bedin, E.V. Chubunova, Y.M. Shulga. Ferroelectrics, **600**, 59 (2022). DOI: 10.1080/00150193.2022.2115798

[29] V.V. Kochervinskii, E.V. Chubunova, Y.Y. Lebedinskii, N.A. Shmakova. Polym. Sci. Ser. A, **53**, 912 (2011). DOI: 10.1134/S0965545X11100051

[30] V.V. Kochervinskii, A.S. Pavlov, N.V. Kozlova, N.A. Shmakova. Polym. Sci. Ser. A, **56** (5), 587 (2014). DOI: 10.1134/S0965545X14050101

[31] H. Ohigashi, K. Koga. Jpn. J. Appl. Phys., **21** (8A), L455 (1982). DOI: 10.1143/JJAP.21.L455

[32] K. Koga, T. Kajiyama, M. Takayanagi. J. Phys. E: Scientific Instruments, **8** (4), 299 (1975). DOI: 10.1088/0022-3735/8/4/018

[33] H. Ohigashi. J. Appl. Phys., **47** (3), 949 (1976). DOI: 10.1063/1.322685

[34] C. Salom, M.G. Prolongo, A. Toribio, A.J. Martínez-Martínez, I.A. de Cárcer, S.G. Prolongo. Intern. J. Adhesion and Adhesives, **84**, 119 (2018). DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2017.12.004

[35] L. Guadagno, M. Sarno, U. Vietri, M. Raimondo, C. Cirillo, P. Ciambelli. RSC Adv., **5** (35), 27874 (2015). DOI: 10.1039/c5ra00819k

[36] A.S. Pakhare, S.P. Nadimpalli. ASME J. Appl. Mech., **91** (4), 041009 (2024). DOI: 10.1115/1.4064209

[37] И.Ю. Дмитриев, В.К. Лаврентьев, Г.К. Ельяшевич. Высокомолекулярные соединения. Серия А, **48** (3), 447 (2006).

[38] Б.П. Космынин, Е.Л. Гальперин, Д.Я. Цванкин. Высокомолекулярные соединения. Серия А, **12** (6), 1254 (1970).