

УДАРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ В НЕКОТОРЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

В. А. Брагунец, В. Г. Симаков, В. А. Борисёнок, С. В. Борисёнок,
В. А. Кручинин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Приведены результаты измерения ударно-индуцированной электропроводности в сегнетоэлектриках: пьезокерамике системы цирконата-титаната свинца марки ПКР-1, монокристалле дейтерированного триглицинсульфата и полимере поливинилиденфторид.

Ключевые слова: ударно-индуцированная электропроводность, сегнетоэлектрики.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] авторами теоретически развит метод измерения ударно-индуцированной электропроводности (УИЭ) в электрически активных диэлектриках — пьезо- и сегнетоэлектриках. Он основан на использовании электрического поля, генерируемого в объеме материала за счет пьезоэффекта или ударной деполяризации при действии на него ударной волны (УВ). Необходимость создания такого метода вызвана тем обстоятельством, что напряженность поля в ударно-сжатых полярных диэлектриках может достигать $10^7 \div 10^8$ В/м [2], что затрудняет измерение УИЭ в них известными электроконтактными методами с подачей на образец напряжения от внешнего источника [3]: выделить исследуемый эффект на фоне собственного поля практически невозможно.

В [1] работоспособность предложенного метода показана на примере измерения УИЭ в монокристаллическом пьезоэлектрике кварце. Цель настоящей работы — измерение ударно-индуцированной электропроводности в сегнетоэлектрических материалах: пьезокерамике системы цирконата-титаната свинца марки ПКР-1, монокристалле дейтерированного триглицинсульфата с добавкой L, α -аланина (АДТГС) и полимере поливинилиденфториде (ПВДФ).

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

В экспериментах исследовали материалы со следующими характеристиками.

ПКР-1: стехиометрическая формула $\text{PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.45}\text{W}_{0.01}\text{Cd}_{0.01}\text{O}_3$, плотность $\rho_0 = 7.95$ г/см³ (98 % кристаллической плотности),

остаточная поляризация $P_r = 42 \pm 1$ мкКл/см², относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon \approx 700$, температура Кюри $T_K = 355$ °С, электропроводность при нормальных условиях $\sigma_0 = 10^{-9}$ (Ом·м)⁻¹ [4]. Пьезокерамика марки ПКР-1 была изготовлена методом горячего прессования [4].

АДТГС: химическая формула $(\text{ND}_2\text{CD}_2\text{COOD})_3 \cdot \text{D}_2\text{SO}_4$, $\rho_0 = 1.7$ г/см³, спонтанная поляризация $P_s = 2.8$ мкКл/см², $\varepsilon \approx 18$, $T_K = 61$ °С, $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-9}$ (Ом·м)⁻¹ [5]. Монокристалл выращен из водного раствора, содержащего 20 % L, α -аланина.

ПВДФ: химическая формула $(\text{CF}_2-\text{CH}_2)_n$, $\rho_0 = 1.8$ г/см³, $P_r = 7.0 \pm 0.2$ мкКл/см², $\varepsilon \approx 12$, $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ (Ом·м)⁻¹ [6].

Во всех случаях поляризация (остаточная или спонтанная) определялась для каждого образца по петлям диэлектрического гистерезиса.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образцы исследуемых материалов изготавливали в форме прямоугольных параллелепипедов. На две противоположные грани образца наносили электроды из серебра (ПКР-1 — толщина ≈ 10 мкм, АДТГС — ≈ 2 мкм) и меди (ПВДФ, ≈ 0.6 мкм). Вектор поляризации материала перпендикулярен плоскости электродов.

Конфигурации образцов пьезокерамики и поливинилиденфторида показаны на рис. 1. Габаритные размеры образца ПКР-1 (рис. 1, а) $32 \times 8.6 \times 5$ мм, площадь электрода центральной зоны 14×8.6 мм. Боковые (охранные) электроды служили для создания однородного электрического поля в области образца, примыкающей к центральной зоне. Их суммарная пло-

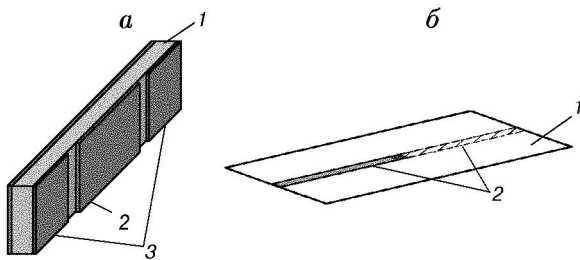


Рис. 1. Схематическое изображение образцов материалов:

а — ПКР-1: 1 — исследуемый материал, 2 — центральный электрод, 3 — охранные электроды;
б — ПВДФ: 1 — исследуемый материал, 2 — электроды

щадь равна площади электрода центральной зоны. В опыте эти электроды объединялись электрически и нагружались на резистор, сопротивление которого равнялось сопротивлению нагрузки центрального электрода.

Образцы ПВДФ изготавливали из пленки толщиной 30 мкм производства НПО «Пластполимер» (г. Санкт-Петербург). На образец наносили систему электродов, как показано на рис. 1, б. Материал в зоне перекрытия электродов поляризовался знакопеременным электрическим полем.

Размер образца АДТГС $10 \times 10 \times 2$ мм. На грань образца 10×10 мм нанесены электроды из серебра толщиной ≈ 2 мкм. Эта грань перпендикулярна кристаллографической оси Y , вдоль которой направлен вектор спонтанной поляризации. Ориентация остальных граней образца относительно кристаллографических осей X и Z не определялась.

Нагружение образцов ударной волной проводили в направлении, перпендикулярном вектору поляризации.

УВ со ступенчатым профилем формировали с помощью плосковолнового взрывного генератора. Последний состоял из линзы из взрывчатого вещества, шашки взрывчатого вещества и слоистого экрана из инертных материалов. Между шашкой и экраном имелся воздушный зазор ≈ 5 мм. На последнем слое экрана, изготовленного из диэлектрика (оргстекло или фторопласт-4), устанавливали образцы исследуемых материалов, размещая их между двумя пластинами из инертных материалов. Пластины обеспечивали защиту от боковой разгрузки и были изготовлены из меди (ПКР-1) или фторопласта (АДТГС, ПВДФ).

Образцы помещали в диэлектрическую среду — очищенное, осушенное и обезгаженное трансформаторное масло, электрическая прочность которого при нормальных условиях была не менее 20 кВ/мм. Тонкий слой масла был также между образцами и экраном. Более подробно экспериментальное устройство описано в [1].

Для измерения электрической реакции материала на воздействие УВ между электродами образца включали активное сопротивление R_n . Согласно предложенному в [1] методу определения УИЭ, регистрацию сигналов проводили как в режиме, близком к режиму короткозамкнутой внешней цепи, так и при омической нагрузке, создающей в объеме исследуемого материала электрическое поле в несколько киловольт на 1 мм. Для этого в каждом опыте устанавливали несколько образцов и нагружали их на разные сопротивления R_n . Электрический отклик образцов регистрировали цифровым осциллографом Tektronix-3054B с помощью делителя напряжения. Измерительную линию длиной ≈ 10 м изготавливали из коаксиального кабеля РК-50-9-12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проведены при амплитудах давления во фронте нагружающей УВ в исследуемых материалах $p = 12$ и 21 ГПа (ПКР-1), $p = 12$ ГПа (АДТГС) и $p = 14.5$ ГПа (ПВДФ). По зарегистрированным осциллограммам напряжения определяли зависимости удельного тока i (ток в нагрузке, деленный на длину электрода в плоскости нагружения) от времени t . Такие зависимости для исследуемых материалов даны на рис. 2–4. Следует отметить, что форма зависимости $i(t)$ для ПКР-1 (рис. 2, кривые 1) и ПВДФ (рис. 4, кривая 1), регистрируемая в режиме короткозамкнутой измерительной цепи, соответствует феноменологическим моделям ударной деполяризации сегнетоэлектриков [7, 8], согласно которым импульс тока при изменении поляризации должен иметь прямоугольную форму. Начало импульса соответствует входу УВ в образец, начало спада тока — выходу волны на свободную поверхность. Отметим также, что аномалия в начале зарегистрированных сигналов формируется за счет индуктивности измерительной цепи. Более сложный вид имеет зависимость $i(t)$ для монокристалла АДТГС (рис. 3, кривая 1), она

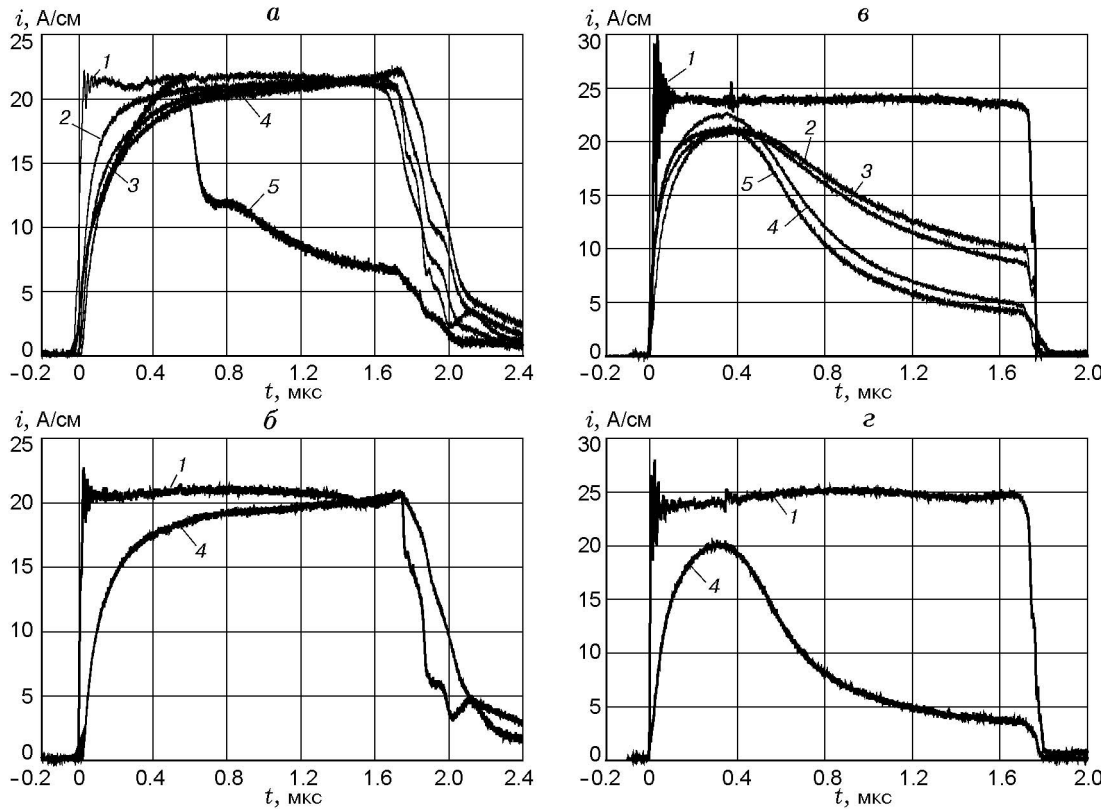


Рис. 2. Зависимость удельного тока от времени для ПКР-1:

a: $p = 12$ ГПа, центральный электрод; E , кВ/мм: 1 — 0.01, 2 — 2.85, 3 — 3.70, 4 — 4.40, 5 — 5.30;
б: $p = 12$ ГПа, охранный электрод; E , кВ/мм: 1 — 0.01, 4 — 4.40;
в: $p = 21$ ГПа, центральный электрод; E , кВ/мм: 1 — 0.01, 2 — 2.10, 3 — 2.40, 4 — 3.40, 5 — 3.60;
г: $p = 21$ ГПа, охранный электрод; E , кВ/мм: 1 — 0.01, 4 — 3.40

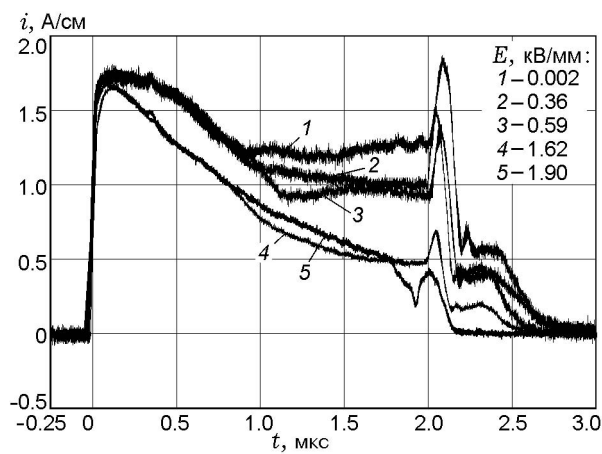


Рис. 3. Зависимость удельного тока от времени для АДТГС

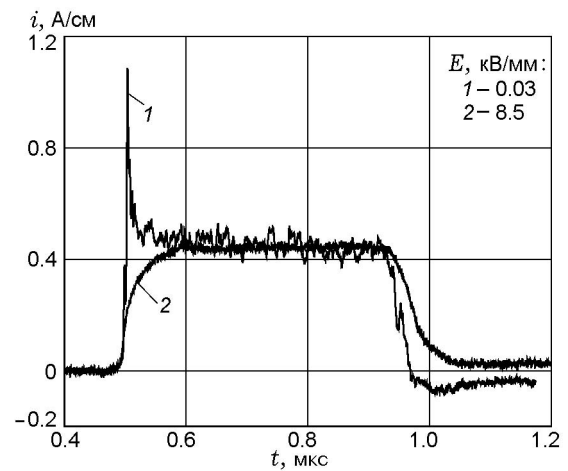


Рис. 4. Зависимость удельного тока от времени для ПВДФ

характеризуется некоторым спадом после начального скачка, выходом на постоянное значение тока, а также наличием «зуба» в моменты времени, близкие к моменту выхода УВ на свободную поверхность образца. Этот результат пока не нашел своего объяснения. Отметим только, что такие изменения условий проведения опытов, как уменьшение вдвое размера образца вдоль направления нагружения, размещение на его свободной поверхности материала с акустической жесткостью, близкой к жесткости кристалла, или увеличение давления нагружения до 15 ГПа, не привели к исчезновению «зуба». При уменьшении размера образца длительность «зуба» уменьшалась также примерно в два раза. Укажем, что такая же зависимость тока от времени наблюдалась в [9] при исследовании динамической сжимаемости монокристалла.

Удельный ток — удобная характеристика для анализа результатов измерений: интеграл от $i(t)$ пропорционален величине заряда, протекающего по сопротивлению нагрузки. Поэтому по виду $i(t)$ легко определить отсутствие или наличие утечки генерируемого заряда через объем образца.

Из рис. 2,а следует, что до полей напряженностью 4.4 кВ/мм (кривая 4) ни объемная, ни поверхностная электропроводность в пьезокерамике ПКР-1 при $p = 12$ ГПа не проявляются: максимальные значения удельных токов для образцов, находящихся под воздействием поля, практически равны удельному току при режиме измерительной цепи, близкому к короткозамкнутому ($E = 0.01$ кВ/мм, кривая 1), т. е. утечка заряда отсутствует. При напряженности поля 5.3 кВ/мм (кривая 5) регистрировался пробой образца. Отсутствие поверхностной электропроводности при достаточно высоких значениях напряженности электрического поля ($E = 4.4$ кВ/мм) указывает на хорошее качество трансформаторного масла, используемого в качестве электроизоляционной среды в экспериментальном устройстве.

На рис. 2,б приведены зависимости $i(t)$, зарегистрированные в цепи охранных электродов. Сравнение кривых на рис. 2,а и 2,б, полученных при одинаковых значениях R_n , показывает, что в данной постановке опытов боковая разгрузка практически не влияет на характеристики импульса тока (кривые 1 и 4). Аналогичная картина наблюдается и при $p = 21$ ГПа (рис. 2,в,г, кривые 4).

Приведенные экспериментальные результаты позволяют оценить сверху объемную ударно-индуцированную электропроводность σ_v при $p = 12$ ГПа (рис. 2,а). Так как утечка заряда не наблюдается, то можно считать, что сопротивление образца R на момент выхода УВ на свободную поверхность много больше сопротивления нагрузки R_n . Положим для определенности $R \geq 100R_n$. Тогда с учетом того, что для получения в материале поля напряженностью 4.4 кВ/мм использовалось сопротивление нагрузки $R_n = 750$ Ом, получаем

$$\sigma_v \leq 5.5 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} \quad \text{при } p = 12 \text{ ГПа.}$$

Отсутствие утечки заряда наблюдается также для ПВДФ при $E \approx 8.5$ кВ/мм. Аналогичная оценка ($R_n = 2.9$ кОм) дает значение

$$\sigma_v \leq 2.5 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1} \quad \text{при } p = 14.5 \text{ ГПа.}$$

Вид зависимостей $i(t)$ для ПКР-1 при $p = 21$ ГПа (рис. 2,в) свидетельствует об утечке заряда, причем утечка увеличивается с ростом напряженности поля. Тот факт, что при $E \geq 2.1$ кВ/мм (кривые 2–5) максимальное значение удельного тока меньше, чем ток в короткозамкнутой цепи, указывает на то, что утечка заряда обусловлена как объемной σ_v , так и поверхностной σ_1 (по поверхности раздела образец — экран нагружающего устройства) электропроводностью.

По результатам экспериментов был проведен расчет σ_v и σ_1 по методике, приведенной в работе [1]. Для этого использовались кривые 1–5 (рис. 2,в). Отметим, что кривые 1–3 и 4, 5 получены в двух разных опытах на образцах пьезокерамики из разных партий. Амплитуды нагружающей УВ в обоих опытах были одинаковыми; одинаковы и значения остаточной поляризации материала. Зависимость $i(t)$ в режиме короткозамкнутой измерительной цепи во втором опыте измерялась таким же образом. Она практически совпала с кривой 1 на рис. 2,в. Результаты расчета σ_v представлены на рис. 5. Из него следует, что σ_v увеличивается с ростом времени и ее значения, полученные в разных опытах, отличаются друг от друга примерно в 1.2 раза. Максимальное значение $\sigma_v = 3 \cdot 10^{-1} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ на восемь порядков величины больше электропроводности при нормальных условиях. Расчет показал, что значение $\sigma_1 (\approx 5 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1})$ на три порядка величины меньше σ_v .

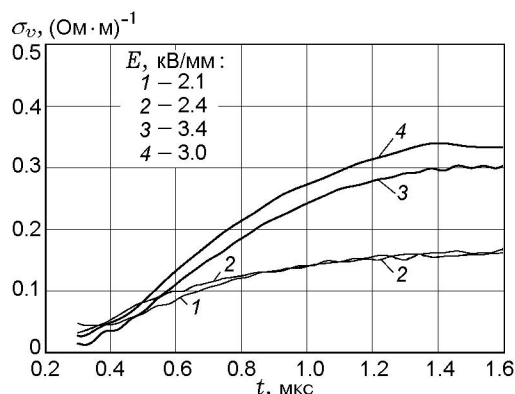


Рис. 5. Зависимость объемной электропроводности от времени в пьезокерамике ПКР-1 при $p = 21$ ГПа

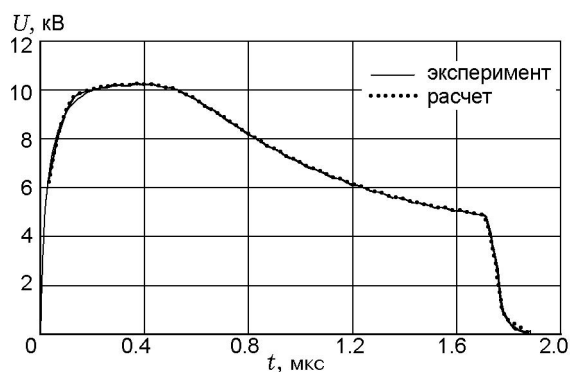


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости напряжения от времени для ПКР-1

На рис. 6 в качестве примера приведены экспериментальная и рассчитанная в рамках модели [1] с учетом σ_v (см. рис. 5, кривые 1, 2) зависимости напряжения на нагрузке от времени для R_n , соответствующего напряженности поля $E = 2.1$ кВ/мм. Видно, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

Зависимости $i(t)$ на рис. 3 показывают, что электропроводность в АДТГС при данных условиях нагружения проявляется при достаточно низких значениях напряженности поля ($E \geq 0.36$ кВ/мм). То, что максимальные значения $i(t)$ в начальной части сигнала при всех значениях напряженности поля близки, позволяет отнести утечку заряда на счет объемной электропроводности σ_v . Результаты расчета σ_v приведены на рис. 7. Для их определения использованы результаты трех опытов по регистрации зависимости $i(t)$ в режиме измерительной цепи, близком к короткозамкнутому (см. рис. 3, кривая 1 и ее аналоги в других

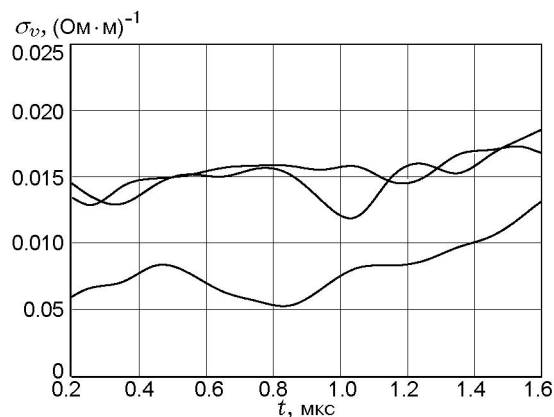


Рис. 7. Зависимость объемной электропроводности от времени для монокристалла АДТГС

опытах при $E = 0.002$ кВ/мм), и результаты опыта с максимальным значением напряженности поля $E = 1.9$ кВ/мм (см. рис. 3, кривая 5). Зависимости $\sigma_v(t)$ на рис. 7 — слабо растущие функции времени. Максимальное значение σ_v составило $0.013 \div 0.018$ (Ом·м)⁻¹, что на семь порядков больше значения электропроводности при нормальных условиях. Отметим, что для АДТГС экспериментальная и рассчитанная с учетом σ_v зависимости напряжения на R_n также практически совпадают. Расчет проведен для условий эксперимента, соответствующих напряженности поля в монокристалле $E = 1.62$ кВ/мм (см. рис. 3, кривая 4). Для него использованы верхние кривые для σ_v на рис. 7.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые материалы при нормальных условиях являются диэлектриками: электропроводность пьезокерамики ПКР-1, монокристалла АДТГС и полимера ПВДФ составляет $\approx 10^{-9}$, $2 \cdot 10^{-9}$ и $\approx 10^{-15}$ (Ом·м)⁻¹ соответственно. При ударном сжатии в ПКР-1 ($p = 21$ ГПа) и АДТГС ($p = 12$ ГПа) происходит переход диэлектрик — полупроводник. Как известно, к полупроводникам относят вещества с удельной электропроводностью $10^6 > \sigma > 10^{-8}$ (Ом·м)⁻¹. По-видимому, такой же переход должен иметь место для пьезокерамики и при $p = 12$ ГПа из-за ее достаточно высокой начальной электропроводности. Однако чувствительность используемой в настоящей работе схемы регистрации позволила только оценить σ_v для этого материала и для ПВДФ при $p = 12$ и 14.5 ГПа соответственно.

В работе [1] показано, что погрешность определения электропроводности используемым методом не больше погрешности измерения напряжения с помощью осциллографа. Для современных цифровых регистраторов последняя составляет $3 \div 5 \%$, что значительно ниже разброса значений σ_v , определенных по результатам разных серий опытов. Данные для ПКР-1 (рис. 5) различаются в 1.2 раза, для АДТГС — в 1.4 раза (см. рис. 7). Этот эффект, по-видимому, можно объяснить тем, что при измерении параметра, который изменяется в опыте на 7–8 порядков, даже незначительные отличия в начальных характеристиках материалов образцов могут привести к наблюдаемому разбросу значений измеряемой величины.

Ударно-индуцированная электропроводность — важный параметр для описания работы взрывных преобразователей механической энергии в электрическую на основе сегнетоэлектрических материалов. В качестве последних наиболее часто используется пьезокерамика системы цирконата-титаната свинца [7, 8]. Для получения оптимальных характеристик преобразователя требуется, в частности, сочетание максимального уровня деполяризации сегнетоэлектрика и отсутствие утечки заряда через объем преобразующих элементов. Требуемый уровень деполяризации достигается подбором амплитуды нагружающей УВ. Например, для ПКР-1 он составляет 80 % при $p = 12$ ГПа и 100 % при $p = 20$ ГПа [7]. Утечка заряда определяется УИЭ, но в существующие модели преобразователей [7, 8] она не введена из-за отсутствия экспериментальных данных для сегнетоэлектриков. В настоящей работе показана эффективность учета σ_v при расчете электрической реакции сегнетоэлектрика на воздействие ударной волны (см. рис. 6): без учета σ_v расчетная форма сигнала будет близка к прямоугольной при любых значениях напряженности поля в материале. Аналог формы — кривые 1 на рис. 2.

Одно из основных применений пленки ПВДФ — датчики динамического давления [10, 11]. Так как электрический заряд, генерируемый чувствительным элементом датчика, пропорционален амплитуде измеряемого давления [12], знание УИЭ здесь необходимо для выбора режима регистрации. В работе [13] измерения электропроводности неполяризованной пленки ПВДФ толщиной ≈ 30 мкм при ударном сжатии

проведены контактным методом в диапазоне давлений $4.6 \div 23$ ГПа. Эксперименты показали, что заметная электропроводность появляется начиная с давления ≈ 8 ГПа. Максимальное значение $\sigma_v = 2.4$ (Ом·м)⁻¹ зарегистрировано при $p = 23$ ГПа. Сопротивление чувствительного элемента датчика, который представляет собой плоский конденсатор с типичными размерами обкладок 2×2 мм и толщиной 30 мкм при таком значении σ_v составляет $R_g \approx 3$ Ом. Этот результат противоречит работе [14], в которой измерялось сопротивление ПВДФ-датчиков с чувствительными элементами указанных выше размеров. Для этого экспериментально определялась зависимость заряда, протекшего по сопротивлению нагрузки датчика, от величины нагрузки. Показано, что $R_g \gg 50$ Ом при $p = 40$ ГПа и $R_g \approx 130$ Ом при $p = 60$ ГПа. Данные [14] согласуются с измерениями настоящей работы, согласно которым $R_g \geq 300$ кОм при $p = 14.5$ ГПа. В настоящей работе и в [14] исследовался поляризованный материал.

Такое различие результатов, возможно, указывает на неправомерность использования для сегнетоэлектриков контактных методов измерения УИЭ. Причина этого предположительно заключается в следующем.

При приложении электрического поля к образцу неполяризованного материала до воздействия УВ имеет место его поляризация до некоторого уровня. Это может привести к тому, что регистрируемый измерительной схемой электрический сигнал, по характеристикам которого определяется УИЭ, будет формироваться, среди прочего, и за счет изменения поляризации при ударном сжатии. Тем самым получаемый результат будет искажен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты измерения ударно-индуцированной электропроводности в поликристаллическом (пьезокерамика марки ПКР-1), монокристаллическом (АДТГС) и полимерном (ПВДФ) сегнетоэлектриках. Объемная ударно-индуцированная электропроводность пьезокерамики марки ПКР-1 составила $0.18 \div 0.30$ (Ом·м)⁻¹, монокристалла АДТГС — $0.013 \div 0.018$ (Ом·м)⁻¹ при давлении во фронте нагружающей ударной волны 21 и 12 ГПа соответственно. Для ПКР-1 ($p = 12$ ГПа) и полимера ПВДФ ($p = 14.5$ ГПа)

чувствительность используемой схемы регистрации позволила только оценить σ_v : соответственно $\sigma_v \leq 5.5 \cdot 10^{-4} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ и $\sigma_v \leq 2.5 \cdot 10^{-5} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

Вместе с ранее опубликованными данными для чистого пьезоэлектрика монокристаллического кварца эти результаты показали, что метод, основанный на использовании для измерения электропроводности электрического поля, генерируемого в материале при действии на него ударной волны, может успешно применяться для определения этой характеристики в материалах, относящихся к классу пьезо- и сегнетоэлектриков.

Ударно-индуцированная электропроводность, определенная с помощью предложенного в [1] метода, представляет самостоятельный интерес как характеристика материала и может быть использована на практике при разработке преобразователей механической энергии ударной волны в электрическую энергию.

Авторы выражают благодарность А. А. Лебедевой за оформление статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисенок В. А., Кручинин В. А., Брагунец В. А., Борисенок С. В., Симаков В. Г., Жерноклетов М. В. Измерение ударно-индуцированной электропроводности в пьезо- и сегнетоэлектриках. Монокристаллический кварц // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 112–120.
2. Graham R. A. Solids Under High-Pressure Shock Compression. — New York: Springer-Verlag, 1993. — P. 221.
3. Якушев В. В. Электрические измерения в динамическом эксперименте // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 3–19.
4. Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н. Новые пьезокерамические материалы. — Ростов н/Д: Ростов. гос. ун-т, 1983.
5. Кременчугский Л. С., Ройцина О. В. Пьезоэлектрические приемники излучения. — Киев: Наук. думка, 1979.
6. Wada Y., Hayakawa R. Piezoelectricity and pyroelectricity of polymers // Jap. J. Appl. Phys. — 1976. — V. 15, N 11. — P. 2041.
7. Новицкий Е. З., Садунов В. Д. Энергетические характеристики сегнетоэлектрика как рабочего тела преобразователя энергии УВ // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 5. — С. 104–107.
8. Lysne P. Electrical response of shock-wave compressed ferroelectrics // High Pressure Sci. and Technol. — 1978. — V. 1, N 4. — P. 202–209.
9. Борисенок В. А., Морозов В. А., Новицкий Е. З. и др. Динамическая сжимаемость монокристалла АДТГС и его электрическая реакция на воздействие ударной волны // Кристаллография. — 1992. — Т. 37, № 4. — С. 971–978.
10. Bauer F. Behavior of ferroelectrics ceramics and PVF2 polymer under shock loading // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter / W. J. Nellis, L. Seaman, R. A. Graham (Eds). — AIP, 1982. — P. 251–256.
11. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Куропаткин В. Г. и др. ПВДФ-датчик давления // Приборы и техника эксперимента. — 2008. — № 4. — С. 113–121.
12. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Куропаткин В. Г., Кручинин В. А., Ромаев В. Н. ПВДФ-датчик давления: физическая модель и результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 5. — С. 109–115.
13. Якушева Т. И., Якушев В. А. Индуцированная ударной волной электропроводность поливинилиденфторида // Химическая физика процессов горения: материалы XI Симпоз. по горению и взрыву. — Черногоровка: ИХФ, 1996. — Т. 2. — С. 12–15.
14. Chartagnac P., Decaso P., Jimenez B., et al. Dynamic behaviour of PVF gauges in the 0–600 kbar range // Proc. of Shock Compression in Condensed Matter. — Elsevier Sci. Publ., 1992. — P. 893–896.

Поступила в редакцию 9/III 2009 г.,
в окончательном варианте — 29/VII 2009 г.