

06

Электрический отклик слоистых магнитоэлектрических композитов системы керамика PZT–NiZn-феррит на импульсное тепловое воздействие

© А.А. Богомолов, А.В. Солнышкин, Д.Ю. Карпенков,
И.Л. Кислова

Тверской государственный университет
Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва,
Зеленоград
Тверской государственный технический университет
E-mail: alexey_bogomolov@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 августа 2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований электрических откликов магнитоэлектрических композитных структур связности 2–2 на импульсное тепловое воздействие. Наблюдаемый электрический отклик состоит из двух компонент, имеющих различные зависимости от частоты модуляции теплового потока. Показано, что в двухслойной композитной системе сегнетоэлектрическая керамика PZT–NiZn-феррит электрический сигнал является следствием как пьезоэлектрического эффекта, так и механического взаимодействия расширяющегося при нагревании феррита и пластины PZT.

Магнитоэлектрические (МЭ) композиционные структуры на основе керамических сегнетоэлектриков и магнитоэлектрических материалов являются альтернативой однофазных кристаллических мультиферроиков, которые обладают незначительным по величине магнитоэлектрическим эффектом [1–3]. Несмотря на достаточно большое число экспериментальных и теоретических исследований МЭ-композитов, многие важные вопросы не решены до сих пор. В частности, мало изучены пьезоэлектрические свойства магнитоэлектрических материалов [4,5]. Исследование пьезо- и пьезоэлектрических свойств в этих объектах позволяет определять степень механической связи и контролировать однородность поляризованности сегнетоэлектрических слоев.

Целью работы являлось изучение электрического отклика, регистрируемого динамическим методом при импульсном тепловом воздействии на слоистые магнитоэлектрические композиты связности 2–2. Объектом исследования служили плоскопараллельные пластинки керамики системы цирконата-титаната свинца (PZT) в форме дисков (диаметром 15 mm и толщиной 0.1 mm), на противоположные стороны которых методом вжигания серебряной пасты нанесены проводящие электроды. На одну из поверхностей керамики PZT приклеивалась пластинка никель-цинкового (NiZn) феррита толщиной 0.2 mm. Образцы керамики PZT были предварительно поляризованы в электрическом поле по стандартной методике.

Электрический отклик композитов исследован динамическим методом с использованием модуляции теплового потока импульсами прямоугольной формы с частотой от 0.5 до 20 Hz. В качестве источника теплового излучения использован лазер ГН-40 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) мощностью 40 mW. Для усиления сигнала применялся операционный усилитель с инвертирующим входом. Электрический отклик регистрировался платой сбора данных LA-n150-14PCI.

Воздействие теплового потока на поверхность феррита приводит к появлению электрического отклика, носящего сложный характер (рис. 1, *a*). В начальный момент воздействия теплового потока наблюдается выброс тока (точка *A*) в фазе с опорным сигналом, воспроизводящим форму тепловых импульсов. Затем, по мере нагревания двухслойной системы тепловым потоком амплитуда отклика уменьшается (участок *A–B*), в некоторый момент времени ток обращается в ноль (точка *B*), меняет направление на противоположное (смена фазы электрического отклика) и сравнительно медленно нарастает (участок *B–C*). Прекращение воздействия теплового потока приводит к появлению начального импульса тока той же полярности с последующей сменой фазы на противоположную.

При воздействии теплового потока непосредственно на электрод образца (выход „–“ P_S), к которому приклеен феррит, форма отклика является прямоугольной, воспроизводящей форму теплового потока (рис. 1, *b*). Наблюдаемый сигнал естественно связать с пирозлектрическим откликом, который явно свидетельствует об однородном распределении поляризации по толщине пластины PZT и отсутствии влияния феррита на пирозлектрический отклик.

На рис. 2 представлены отклики, полученные на разных частотах модуляции теплового потока в диапазоне 1.5–10 Hz. Как видно, при

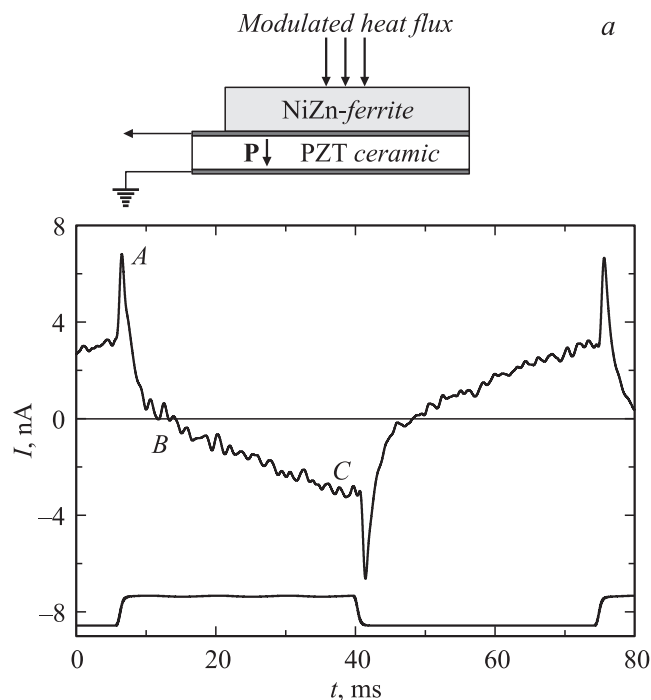


Рис. 1. Формы электрического отклика (верхние кривые на осциллограммах) композита PZT–никель-цинковый феррит, наблюдаемые при воздействии модулированного лазерного излучения: *a* — на поверхность феррита, *b* — на электрод керамики PZT. В нижней части осциллограммы показан опорный сигнал. Частота модуляции — 16 Hz. на вставках приведена геометрия образцов непосредственно с указанием направления вектора остаточной поляризации **P**.

понижении частоты модуляции теплового потока начальный выброс тока значительно уменьшается, и форма сигнала носит нарастающий характер с ярко выраженным участком насыщения и последующим спадом, причем его фаза совпадает с представленной выше (рис. 1). В диапазоне частот модуляции ниже 2 Hz электрический отклик характеризуется участком спада, который можно связать с тем, что длительность теплового импульса становится больше тепловой постоянной времени образца.

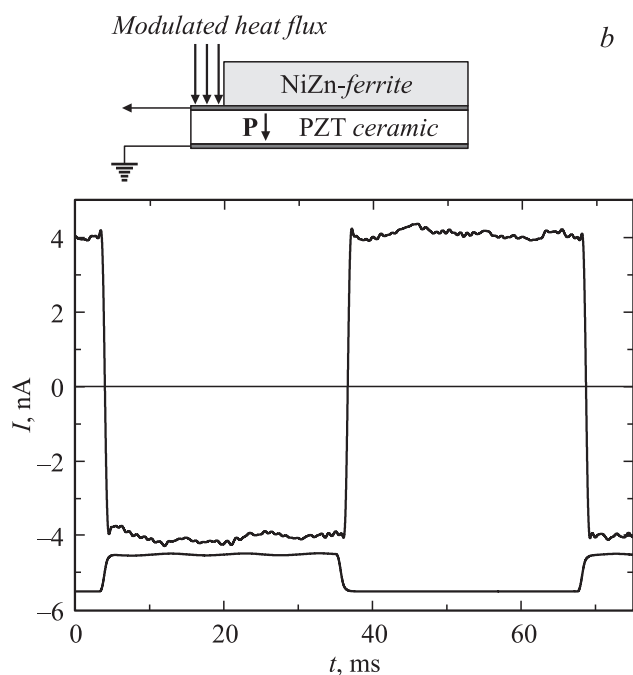


Рис. 1 (продолжение).

Обращает на себя внимание тот факт, что на высоких частотах амплитуда начального выброса тока, находящегося в фазе с опорным сигналом, совпадает по величине с амплитудой отклика, соответствующего участку насыщения на низких частотах. Кроме того, представленные выше временные зависимости электрического отклика позволяют определить время обращения сигнала в ноль $t_{I=0}$, что соответствует точке *B* на рис. 1, *a*. Установлено, что с увеличением частоты модуляции теплового потока величина $t_{I=0}$ уменьшается практически по линейному закону и обращается в ноль при частоте ~ 20 Hz.

Количественные результаты по частотным зависимостям амплитуд регистрируемых значений токов композита PZT–NiZn-феррит представлены на рис. 3. Видно, что максимальная амплитуда отклика (кривые 1 и 4) практически не зависит от частоты модуляции теплового потока

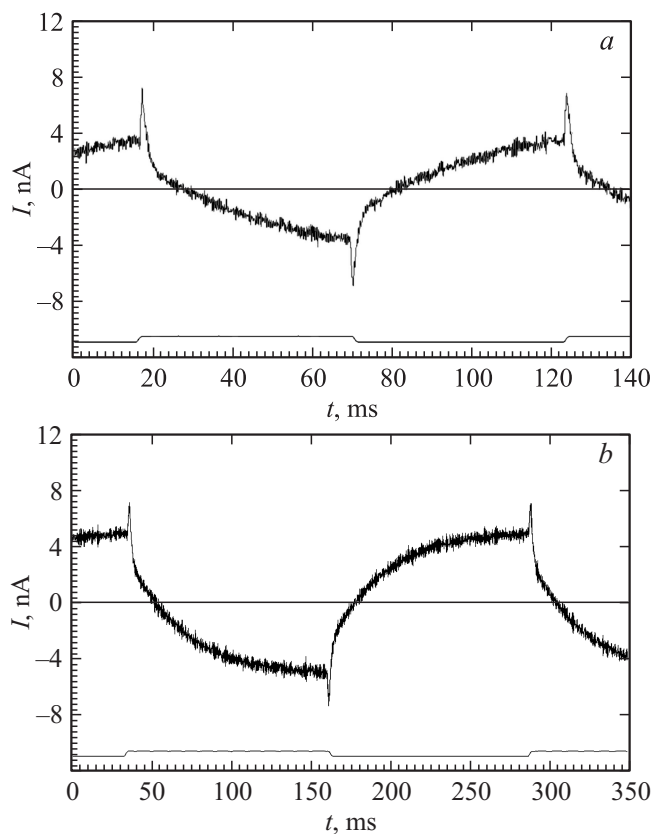


Рис. 2. Кинетика электрических откликов композита PZT–никель-цинковый феррит, наблюдаемых при воздействии модулированного лазерного излучения на поверхность феррита. Частота модуляции теплового потока: *a* — 9, *b* — 4, *c* — 1.6 Hz.

в указанном диапазоне частот. Значение отклика, соответствующего окончанию светового и темного промежутков (кривые 2 и 3), с ростом частоты уменьшается, что может свидетельствовать о его пироэлектрической природе. Естественно, амплитуда начального выброса тока, определяемая по разности максимального сигнала (кривые 1, 4) и участка насыщения (кривые 2, 3), увеличивается с ростом частоты как для светового, так и для темного промежутков (рис. 2). Наблюдаемую

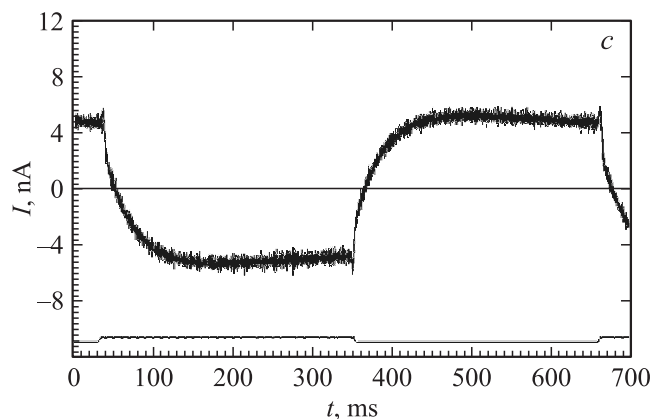


Рис. 2 (продолжение).

частотную зависимость амплитуды начального выброса тока можно связать с уменьшением крутизны фронта нарастания теплового потока при уменьшении частоты. Так как последний имеет трапецидальную форму, то выход потока излучения на стационарное значение замедляется с уменьшением частоты.

Нестандартное поведение электрического отклика, наблюдаемого при освещении композита PZT–NiZn-феррит, можно объяснить тем, что в первый момент воздействия теплового потока возникает упругая волна, которая инициирует сигнал, связанный с механическим взаимодействием расширяющегося при нагревании феррита и керамической пластины PZT. Таким образом, начальный выброс тока при воздействии теплового потока обусловлен пьезоэлектрическими свойствами. Об этом также свидетельствует частотная зависимость начального выброса тока — с понижением частоты модуляции он уменьшается вплоть до полного исчезновения на низких частотах.

Аналогичная ситуация наблюдается для образцов сополимера винилиденфторида с трифторэтиленом P(VDF–TrFE) с включениями сегнетоэлектрической керамики [6,7], в частности, при наличии включений керамики мы наблюдаем пиковый характер отклика, который имеет такую же частотную зависимость — с ростом частоты начальный выброс тока увеличивается. Однако в образцах P(VDF–TrFE) с включениями керамики начальный выброс тока и квазистационарный сигнал имеют

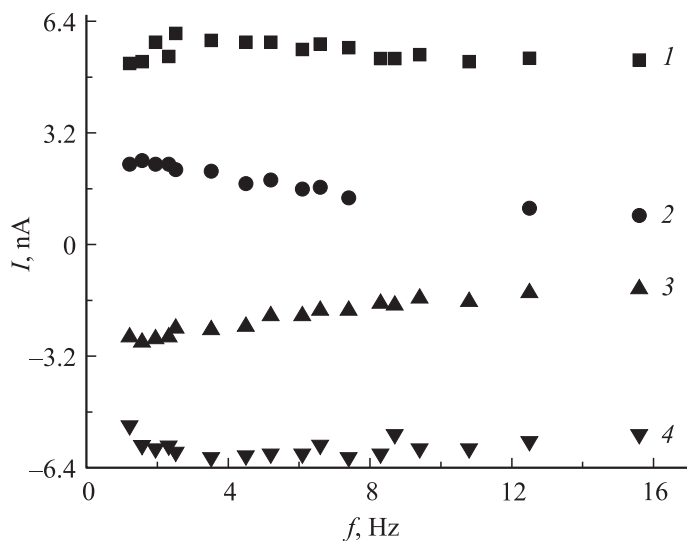


Рис. 3. Частотные зависимости параметров электрического отклика композита PZT–никель-цинковый феррит: кривые 1,4 — амплитудные значения начального выброса тока, соответствующие началу теплового импульса и его окончанию; кривые 2,3 — значения тока, определяемого по участку насыщения для темного и светового промежутков соответственно.

одинаковую фазу, т.е. не наблюдается смены фазы отклика в процессе воздействия теплового потока. Таким образом, в неоднородных средах, содержащих пьезоэлектрические включения (слои), пироэлектрический отклик характеризуется наличием начального выброса тока, имеющего ярко выраженную частотную зависимость.

Известно, что плотность тока, генерируемого пьезоэлектриком, при его деформации определяется соотношением

$$j(t) = \frac{dP_3}{dt} = e_{3i} \frac{dS_i}{dt},$$

где P_3 — пьезополяризация, e_{3i} — пьезоэлектрические коэффициенты, S_i — компоненты тензора механических деформаций, сопровождающие распространение акустической волны. Таким образом, электрический отклик пропорционален скорости изменения деформаций, которая в

случае воздействия модулированного теплового потока на систему PZT–NiZn-феррит определяется скоростью изменения температуры феррита. Как было указано ранее, при понижении частоты модуляции крутизна фронта нарастания теплового потока становится меньше, а следовательно, уменьшается и скорость изменения деформации, что ведет к уменьшению начального выброса тока.

При дальнейшем прогреве образца композита PZT–NiZ-феррит (при низких частотах модуляции теплового потока) начинает давать вклад пьезоэлектрический эффект, в результате чего появляется ток противоположного направления. Не исключена возможность появления квазистационарного пьезоэлектрического отклика, связанного с различными коэффициентами теплового расширения феррита и керамики PZT [8,9]. Таким образом, представленный сигнал является комбинацией пьезоэлектрического и пирозэлектрического откликов (рис. 2).

Таким образом, в работе показано, что в слоистом композите PZT–NiZn-феррит при тепловом воздействии на образец со стороны феррита возникает сигнал, который является следствием как пирозэлектрического эффекта, так и механического взаимодействия расширяющегося при нагревании феррита и пластины PZT. Каждая из этих компонент суммарного электрического отклика зависит от частоты поразному — пьезоэлектрическая составляющая растет с увеличением частоты, а пирозэлектрическая убывает. Однако их сумма практически не зависит от частоты (рис. 3, кривые 1, 4). Предположительно, наблюдаемый отклик может давать информацию о степени механической связи слоев пьезоэлектрик–феррит, которая является одним из важнейших факторов при исследовании магнитоэлектрического эффекта.

Работа выполнена при поддержке „Программы стратегического развития Тверского государственного университета на 2012–2014 гг.“ и в рамках целевой программы Министерства образования и науки РФ „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

Список литературы

- [1] *Fiebig M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R123–R152.
- [2] *Eerenstein W., Mathur N.D., Scott J.F.* // Nature. 2006. V. 442. P. 759–765.
- [3] *Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031 101.

- [4] *Fetisov Y.K., Bush A.A., Kamentsev K.E., Srinivasan G.* // Solid State Communications. 2004. V. 132. P. 319–324.
- [5] *Буш А.А., Шкуратов В.Я., Черных И.А., Фетисов Ю.К.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 3. С. 69–76.
- [6] *Солнышкин А.В., Морсаков И.М., Канарейкин А.Г., Богомолов А.А.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2010. Т. 74. № 9. С. 1343–1346.
- [7] *Солнышкин А.В., Богомолов А.А., Морсаков И.М., Силибин М.В., Киселев Д.А., Дронов А.А., Сенченко К.С.* // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 42–45.
- [8] *Chang H.S., Huang Z.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 152903.
- [9] *Hockley M.J., Chang H.H.S., Huang Z.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 064102.