

05.2;12

Магнитоэлектрический отклик многослойной структуры феррит–пьезоэлектрик на импульс магнитного поля

© А.Ю. Остащенко, К.Е. Каменцев, Ю.К. Фетисов, Г. Сринивасан

Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический университет)

E-mail: fetisov@mirea.ru

Physics Department, Oakland University, Rochester, Michigan 48309, USA

Поступило в Редакцию 2 апреля 2004 г.

Измерен магнитоэлектрический отклик многослойной структуры феррит–пьезоэлектрик на короткий импульс магнитного поля. Методом фурье-анализа отклика получена частотная зависимость магнитоэлектрического коэффициента структуры в диапазоне частот от десятков Hz до 1 MHz. Установлено, что величина коэффициента в целом монотонно медленно падает при возрастании частоты. На определенных частотах наблюдается резонансное увеличение коэффициента в 7–30 раз, что обусловлено возбуждением собственных акустических колебаний структуры. В области частот около 1 kHz магнитоэлектрический коэффициент имеет максимум, формирующийся из-за релаксационных процессов в слоях пьезоэлектрика и феррита.

Многослойные планарные структуры, содержащие слои феррита и пьезоэлектрика, проявляют аномально большой магнитоэлектрический (МЭ) эффект, что делает их перспективными для разработки датчиков и преобразователей магнитных полей [1–3]. Магнитоэлектрический эффект в таких структурах возникает в результате комбинации свойств составляющих ее слоев [4]. При намагничивании структуры внешним полем H деформация слоев феррита, обусловленная магнитострикцией, приводит к деформации механически связанных с ними слоев пьезоэлектрика. Это вызывает изменение поляризации пьезоэлектрика, появление электрических зарядов на границах раздела слоев феррита и пьезоэлектрика и, как следствие, возникновение напряжения U на поверхностях структуры. Величину магнитоэлектрического эффекта

характеризует МЭ коэффициент $\alpha_E = U/(Hd)$, где d — общая толщина слоев пьезоэлектрика в структуре.

Исследование МЭ эффекта в многослойных структурах до настоящего времени проводили методом гармонической модуляции поля [1,5]. Структура помещалась между полюсами магнита в постоянное поле H_0 , с помощью модулирующих катушек создавалось переменное поле малой амплитуды h с частотой $f = 0.1-10$ kHz и регистрировалось возникающее напряжение U на частоте модуляции. Описанным методом сложно исследовать частотные характеристики МЭ эффекта в более широком диапазоне частот, так как с ростом частоты из-за индуктивности катушек резко падает амплитуда модулирующего поля, что приводит к уменьшению регистрируемого МЭ сигнала.

В настоящей работе впервые измерен МЭ отклик многослойной структуры на короткие импульсы магнитного поля и показано, что импульсный метод позволяет получить данные о частотных характеристиках МЭ эффекта в многослойных структурах в диапазоне частот от десятков Hz до ~ 1 MHz.

В измерениях использовалась многослойная планарная структура, содержащая чередующиеся слои никелевого феррита состава $\text{Ni}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (НФ) и слои цирконата-титаната свинца состава $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (ЦТС), изготовленная методом толстопленочной керамической технологии [1]. Структура содержала 16 слоев НФ и 15 слоев ЦТС, каждый толщиной по $18 \mu\text{m}$. Размеры структуры в плоскости равнялись 6.2×8.9 mm. После изготовления поверхности структуры покрывали проводящей серебряной пастой, а затем структуру поляризовали во внешнем электрическом поле напряженностью до 30 kV/cm , приложенном перпендикулярно к плоскости. Структуру помещали между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле $H_0 = 0 \dots 3$ kOe, направленное по касательной к ее плоскости. Одновременно к структуре прикладывалось импульсное магнитное поле $h(t)$, направленное параллельно постоянному полю. Импульсы поля создавали с помощью намотанной на структуру катушки диаметром 8 mm и длиной 10 mm, содержащей 10 витков провода диаметром 0.5 mm. На катушку подавали импульсы тока прямоугольной формы с амплитудой до 30 А, длительностью $1 \dots 100 \mu\text{s}$, длительностью фронтов менее $0.2 \mu\text{s}$ и периодом следования 50 ms. Амплитуда импульсов поля $h(t)$ в месте расположения образца при максимальной силе тока составляла ~ 240 Oe. Импульс МЭ напряжения $U(t)$ с металлизирован-

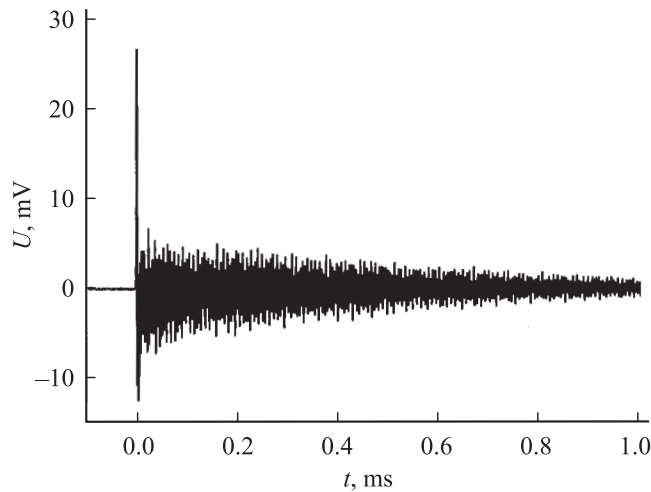


Рис. 1. Магнитоэлектрический отклик структуры феррит–пьезоэлектрик на импульс магнитного поля длительностью $1 \mu\text{s}$.

ных поверхностей структуры регистрировался с помощью цифрового осциллографа.

На рис. 1 показана типичная осциллограмма МЭ сигнала со структуры при приложении к ней импульса поля длительностью $1 \mu\text{s}$ с амплитудой $h \sim 240 \text{ Oe}$. Осциллограмма снята для постоянного поля $H_0 = 120 \text{ Oe}$, при котором МЭ сигнал имел максимальную амплитуду. Узкий пик положительной полярности, расположенный вблизи момента времени $t = 0$, отвечает сигналу прямой электромагнитной наводки и повторяет форму импульса магнитного поля. Видно, что после окончания импульса поля устанавливается процесс экспоненциального затухания колебаний МЭ напряжения. Период колебаний равняется $T \approx 4.35 \mu\text{s}$, характерное время затухания амплитуды составляет $\tau \approx 262 \mu\text{s}$, что соответствует добротности резонатора $Q = \pi \cdot \tau T \approx 189$. На рис. 1 видна также дополнительная модуляция амплитуды затухающих колебаний, что является признаком наличия биений нескольких частот в резонаторе.

Более наглядное и полное представление о частотных характеристиках МЭ эффекта в многослойной структуре позволяет получить фурье-анализ временного отклика. На рис. 2 показана зависимость

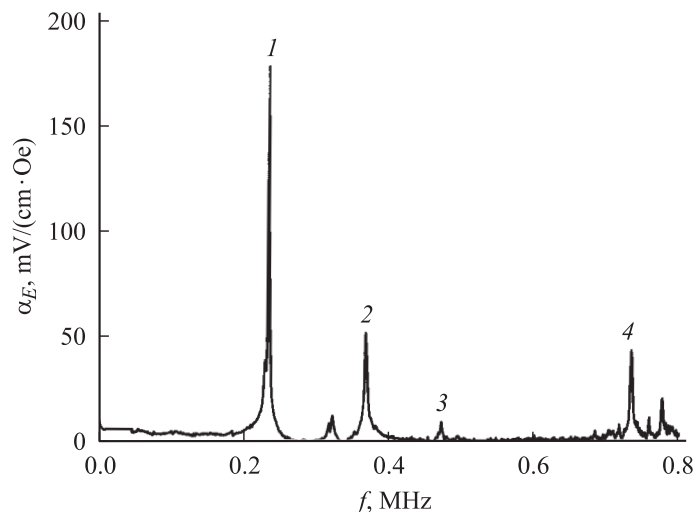


Рис. 2. Частотная зависимость МЭ коэффициента в широком диапазоне частот. Пики соответствуют частотам акустических колебаний образца: основные гармоники 1 — f_1 и 2 — f_2 , вторые гармоники 3 — $2f_1$ и 4 — $2f_2$.

магнитоэлектрического коэффициента α_E от частоты f для описанной структуры. Зависимость получена путем деления фурье-спектра МЭ сигнала $U(f)$ на фурье-спектр импульса возбуждающего магнитного поля $h(f)$ и общую толщину $d = 270 \mu\text{m}$ слоев ЦТС в структуре. Использование достаточно коротких импульсов поля (длительностью $1 \mu\text{s}$), первый ноль в спектре которых лежит вблизи частоты 1 MHz , гарантирует отсутствие на зависимости $\alpha_E(f)$ максимумов, возникающих в результате деления на малую величину и не связанных с физикой явления.

Вид полученной частотной зависимости магнитоэлектрического коэффициента $\alpha_E(f)$ позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Для исследованной многослойной структуры НФ–ЦТС величина коэффициента α_E слабо зависит от частоты, монотонно уменьшаясь от ~ 7 до $\sim 4 \text{ mV}/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$ при увеличении частоты от единиц kHz до $\sim 200 \text{ kHz}$.

2. На отдельных частотах имеет место резкое увеличение коэффициента α_E в 7–30 раз. Это обусловлено, по-видимому, возбуждением

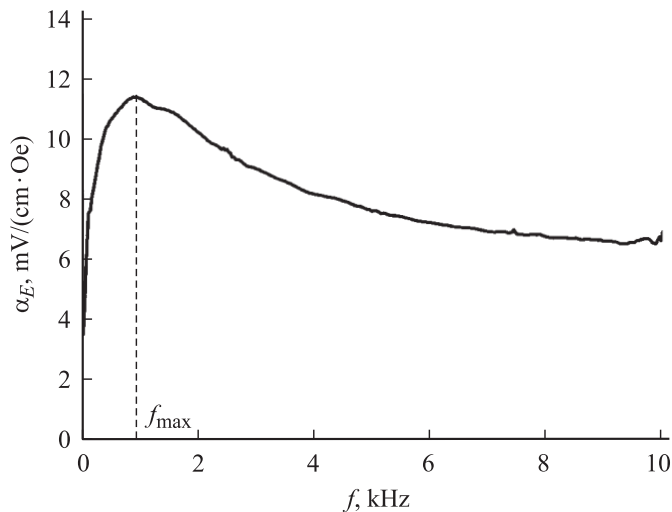


Рис. 3. Частотная зависимость МЭ коэффициента в области низких частот.

собственных акустических колебаний в структуре, что приводит к резонансному возрастанию амплитуды деформаций и, как следствие, к увеличению МЭ сигнала [6]. Основные резонансы с наибольшей амплитудой на рис. 2 соответствуют частотам $f_1 = 234.7$ kHz и $f_2 = 368.6$ kHz. Видны также резонансы меньшей амплитуды на частотах вторых гармоник $2f_1 \approx f_3 = 473.0$ kHz и $2f_2 \approx f_4 = 733.6$ kHz и несколько более слабых резонансов на других частотах. Расчеты [6], проведенные с использованием акустических параметров НФ и ЦТС, показали, что колебания, соответствующие стоячим волнам в плоскости структуры, должны иметь частоты как раз в диапазоне 200–400 kHz. В нашем случае резонансы с частотами f_1 и f_2 отвечают основным модам колебаний по длине и ширине образца. Подтверждением этого является соотношение частот основных резонансов $f_1/f_2 = 0.64$, которое близко к отношению ширины и длины структуры ~ 0.69 . Измеренная добротность основных резонансов с частотами f_1 и f_2 равнялась $Q_1 = 186$ и $Q_2 = 112$, что примерно соответствует значению добротности, рассчитанному с использованием характерного времени затухания МЭ сигнала. Биения резонансных частот системы приводят к дополнительной модуляции амплитуды магнитоэлектрического сигнала

на рис. 1. Отметим, что достаточно большая величина коэффициента α_E на частотах вторых гармоник основных акустических колебаний свидетельствует о нелинейности МЭ эффекта в многослойной структуре.

3. В области частот вблизи 1 kHz имеет место широкий локальный максимум на частотной зависимости $\alpha_E(f)$, показанный в более крупном масштабе по частоте на рис. 3. Величина МЭ коэффициента на частоте максимума $f_{\max} = 0.9 \text{ kHz}$ достигает $11.4 \text{ mV}/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$. Аналогичный максимум наблюдался и при исследовании частотных характеристик МЭ эффекта в той же структуре методом гармонической модуляции поля [5]. Уменьшение величины МЭ коэффициента структуры на частотах ниже f_{\max} происходит из-за компенсации наведенных зарядов вследствие конечной проводимости слоев пьезоэлектрика [7]. Падение величины МЭ коэффициента на частотах выше f_{\max} обусловлено, по-видимому, релаксационными процессами в слоях феррита.

Таким образом, в работе исследован МЭ отклик многослойной структуры на импульс магнитного поля. Показано, что величина магнитоэлектрического коэффициента монотонно падает с ростом частоты, при этом происходит резкое увеличение коэффициента на частотах акустических резонансов образца и имеется локальный максимум магнитоэлектрического коэффициента в низкочастотной области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ (грант А03-3.15-253), Фонда гражданских исследований США (грант VZ-010-0) и Национального научного фонда США (грант DMR-0302254).

Список литературы

- [1] *Srinivasan G., Rasmussen E.T., Gallegos J.* et al. // *Phys. Rev.* 2001. B64. P. 214408 (1–6).
- [2] *Ryu J., Priya S., Uchino K.* et al. // *J. of Electroceramics.* 2002. V. 8. P. 107–119.
- [3] *Srinivasan G., Rasmussen E.T., Bush A.A.* et al. // *Appl. Phys. A.* 2003. V. 76. P. 1–8.
- [4] *J. van Suchtelen* // *Philips. Res. Rep.* 1972. V. 27. P. 28–35.
- [5] *Остащенко А.Ю., Каменцев К.Е., Фетисов Ю.К., Сринивазан Г.* // Сб. науч. тр. научной сессии МИФИ. 2003. Т. 4. С. 168–169.
- [6] *Филиппов Д.А., Бичурин М.А., Петров В.М.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 1. С. 15–20.
- [7] *Петров В.М., Бичурин М.И., Srinivasan G.* // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30. В. 8. С. 81–87.