**Моделирование магнитоэлектрического эффекта в двух- и трёхслойных структурах на основе никеля и цирконата-титаната свинца**

**Джапаридзе М.В.1, Федулов Ф.А.2**

1аспирант, 2сотрудник

МИРЭА — Российский технологический университет,НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», Москва, РоссияE–mail: dzhaparidze.m.v*@edu.mirea.ru*

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект — возникновение в веществе поляризации под действием магнитного поля [1]. Как правило, МЭ эффект исследуется в композитах, состоящих из магнитострикционного материала, деформирующегося под действием магнитного поля, и пьезоэлектрика, преобразующего деформацию в электрическое напряжение. МЭ эффект лежит в основе принципа действия многих устройств, в том числе датчиков магнитных полей, антенн НЧ-диапазона, перестраиваемых индукторов [1], поэтому изучение данного явления играет важную роль для развития технологий.

МЭ напряжение *u* пропорционально пьезомодулю *d* и магнитострикции *λ(Ȟ)*. Если МЭ эффект возбуждается суммой постоянного и гармонического магнитных полей *Ȟ = H* + *h∙cos(2πft)*, то выражение *λ(Ȟ)* можно разложить в ряд Тейлора и получить следующее выражение для выходного МЭ напряжения [2]:

 (1)

где *u*k— *k*-е гармоники МЭ напряжения.

Из формулы (1) следует наличие в спектре МЭ напряжения высших гармоник, которые можно использовать в различных устройствах. Однако для этого требуется предсказывать свойства таких структур, что можно сделать при помощи моделирования методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| ***Рис. 1.*** Схематическое изображение моделируемых структур: (а) Ni/ЦТС-19; (б) Ni/ЦТС-19/Ni.  |

Внешний вид моделируемых структур с указанием всех размеров приведён на рис. 1. Для моделирования использовали 2D-геометрию. Композит жёстко закреплён в точках А и Б, а магнитное поле *H + h∙cos(2πft)* направлено вдоль оси X. При расчёте значение *H* изменялось в диапазоне (0 – 1800) Э с шагом 2 Э, а амплитуда *h* — в диапазоне (0 – 4) Э с шагом 1 Э.

Значения магнитострикции никелевых слоёв, полученные при помощи мультифизического модуля **Magnetostriction** (Магнитострикция), объединяющего в себе модули **Solid Mechanics** (Механика твёрдого тела) и **Magnetic Fields** (Магнитные поля), использовались мультифизическим модулем **Piezoelectric Devices** (Пьезоэлектрические устройства), объединяющего в себе модули **Solid Mechanics** (Механика твёрдого тела) и **Electric Fields** (Электрические поля), для расчёта генерируемого МЭ напряжения. Расчёт проводили с использование **Stationary solver** (стационарный решатель).

Чтобы выделить составляющие МЭ напряжения, соответствующие первым трём гармоникам, каждый расчёт производился для 7 фиксированных моментов времени: 0, (12*f*)-1, (8*f*)-1, (4*f*)-1, 3∙(8*f*)-1, 5∙(12*f*)-1 и (2*f*)-1, где *f* – частота возбуждающего поля. Затем составлялись линейные комбинация полученных решений, которые хорошо коррелировали с первыми тремя гармониками МЭ напряжения:

  (2а)

  (2б)

  (2в)

На рис. 2(а) представлены зависимости амплитуды первой гармоники МЭ напряжения *u1* от поля *H* при *h* = 4 Э, а на рис. 2(б) – 2(г) — зависимость амплитуд первых трёх гармоник МЭ напряжения от амплитуды *h* при фиксированном *H*. Зависимость на рис. 2(а) соответствует экспериментам: *u1* возрастает с ростом поля, достигая максимума при таком *H*, при котором максимальна 1-я производная магнитострикции по полю, а затем постепенно спадает до 0 из-за выхода магнитострикции в область насыщения. Из рис. 2(б) – 2(г) следует, что каждая из гармоник пропорциональна соответствующей степени *h*, что и наблюдалось на практике. Кроме того, из всех рисунков видно, что МЭ эффект в трёхслойной структуре проявляется сильнее, чем в двухслойной, что тоже соответствует экспериментам.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mama\Desktop\1.png | C:\Users\mama\Desktop\2.png |
| ***C:\Users\mama\Desktop\3.png*** | ***C:\Users\mama\Desktop\4.png*** |
| ***Рис. 2.*** Зависимость первой гармоники от поля подмагничивания *H* (а); первой (б), второй (в) и третьей (г) гармоник МЭ напряжения от амплитуды поля *h* |

В работе проведена проверка нового метода расчёта МЭ эффекта в программном пакете COMSOL Multiphysics, учитывающего вклад высших гармоник МЭ напряжения композитной структуры.

 Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 23-72-01053.

**Литература**

1. Gao J., et al.Review of Magnetoelectric Sensors // Actuators. 2021, V.10, №109, P.1-23.
2. Мусатов В.И. и др. Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре // РТЖ. 2023, Т.11, №5, С.63-70.