**Нелинейный магнитоэлектрический эффект в структурах «никель/широкозонный пьезополупроводник»**

**Джапаридзе М.В.**

аспирант

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

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект — изменение поляризации вещества под действием магнитного поля [1]. Как правило, МЭ эффект исследуется в композитах, состоящих из магнитострикционного материала, деформирующегося под действием магнитного поля, и пьезоэлектрика, преобразующего эту деформацию в электрическое напряжение [2]. В последнее время в качестве пьезоэлектрика в МЭ структурах всё чаще используются широкозонные полупроводники: нитрид алюминия (AlN), нитрид галлия (GaN) и оксид галлия (Ga2O3). Преимуществами этих материалов являются большое отношение пьезомодуля к диэлектрической проницаемости *d/ε* и совместимость с полупроводниковыми технологиями [3-4].

Напряжение *u*, возникающее под действием прямого МЭ эффекта, пропорционально пьезомодулю *d*31 пьезоэлектрика и магнитострикции *λ(Ȟ)*:

$u=Ad\_{31}λ\left(\breve{H}\right)$ (1)

где *A* — коэффициент пропорциональности.

Для наблюдения МЭ эффекта структуру, как правило, помещают в постоянное подмагничивающее поле *H* и возбуждают гармоническим полем с амплитудой *h* и частотой *f*. Таким образом,

$\breve{H}=H+h∙\cos(\left(2πft\right))$ (2)

В этом случае выражение для магнитострикции *λ(Ȟ)* можно разложить в ряд Тейлора в окрестности точки *H*. Подставив полученное выражение в (1) и выполнив ряд тригонометрических преобразований, можно получить

$u\left(t\right)= \sum\_{k=0}^{\infty }u\_{k}\cos(\left(2πkft\right))= u\_{0}+u\_{1}\cos(\left(2πft\right))+u\_{2}\cos(\left(4πft\right))+…$ (3)

где *uk* — амплитуды *k­*-х гармоник МЭ напряжения, каждая из которых пропорциональная *k*-ой производной магнитострикции по полю и *hk*.

Данная работа посвящена моделированию высших гармоник МЭ эффекта методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

|  |
| --- |
|  |
| ***Рис. 1.*** Схематическое изображение исследуемого образца |

Схематическое изображение моделируемого композита приведено на рис. 1. В качестве пьезополупроводника использовались AlN, GaN и Ga2O3. Предполагалось, что композит закреплён в точках А и Б, а магнитное поле направлено вдоль оси X. При расчёте значение *H* изменялось в диапазоне (0 – 1800) Э с шагом 2 Э, а *h* — в диапазоне (0 – 4) Э с шагом 1 Э. Компьютерный расчёт позволил получить данные о полевых и амплитудных зависимостях первых трёх гармоник МЭ напряжения.

На рис. 2(а) представлены зависимости второй гармоники МЭ напряжения от амплитуды переменного поля *h* при *H* = 32 Э, а на рис. 2(б) — зависимости третьей гармоники от амплитуды *h* при *H* = 648 Э. Из рисунка видно, что амплитуды обеих гармоник действительно пропорциональны соответствующим степеням *h*.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| ***Рис. 2.*** Зависимость второй (а) и третьей (б) гармоник МЭ напряжения от амплитуды поля *h* |

Для характеристики высших гармоник МЭ напряжения используется нелинейный МЭ коэффициент *αk*, равный:

 $α\_{k}=\frac{u\_{k}}{b∙h^{k}}$ (4)

где *b* — толщина пьезополупроводника.

***Табл. 1.*** Значения МЭ коэффициентов исследуемых структур

|  |  |
| --- | --- |
| Структура | Показатель |
| *α* 2, мВ/(см∙Э2)  | *α* 3, нВ/(см∙Э3)  |
| Ni/AlN | 0,44 | 9,8 |
| Ni/GaN | 0,53 | 12,16 |
| Ni/Ga2O3 | 0,27 | 5,82 |

Значения МЭ коэффициентов для второй и третьей гармоник приведены в табл. 1. Из неё следует, что наилучшими МЭ свойства обладал композит на основе GaN, следовательно, он имеет наибольшие перспективы применения в науке и технике.

Работа выполнена при поддержке гранта 19-79-10128-П. Автор также выражает благодарность своему научному руководителю — д-ру физ.-мат. наук, проф. Л.Ю. Фетисову

**Литература**

1. Калгин А.В. и др. Магнитоэлектрический эффект: история, современное состояние исследований и перспективы применения // Альт. Энергетика и экология. 2013. № 03/2 (122). с. 49-63.
2. Федулов Ф.А. и др. Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца // РТЖ. 2022. № 10(3). с. 64-73.
3. Guo S.-D., Du H.-M. Piezoelectric properties of Ga2O3: a first-principle study. // The Europian Physical Journal B. 2020. v. 93(7). p. 1-5.
4. Zoino S. et al. Ab initio investigations of two-dimensional carrier gas at interfaces in GaN/AlN and GaN/AlN/Al2O3 heterostructures. // Journal of Applied Physics. 2023. v. 134. p. 155304.