

## МИКРОВОЛНОВЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ Ni-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК

Ивашева Е.Е.<sup>1</sup>, Бичурин М.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, e-mail: ellen9879@yandex.ru

---

В данной работе рассматривается магнитоэлектрический (МЭ) эффект в двухслойной структуре на основе ферромагнитного металла Ni и различных пьезоэлектриков (PZN-PT, PMN-PT, цирконат-титанат свинца (ЦТС) и кварц). Получено выражение для резонансного значения постоянного подмагничивающего поля в тонкой пленке никеля, численное значение которого составило 1869 Э для резонансной частоты 10 ГГц. Также приведено выражение сдвига ферромагнитного резонанса (ФМР) в двухслойной структуре, когда к ней прикладывается постоянное электрическое поле. Представлены графики зависимостей сдвига линии ФМР от напряженности электрического поля. Показано, что в структуре Ni/PZN-PT наблюдается наибольший сдвиг линии ФМР, а наименьший – в структуре Ni/Кварц, в сравнении с остальными рассматриваемыми двухслойными МЭ структурами.

---

Ключевые слова: микроволновый магнитоэлектрический эффект, двухслойная структура, пьезоэлектрик, ферромагнитный металл, ферромагнитный резонанс

## MICROWAVE MAGNETOELECTRIC EFFECT IN Ni-PIEZOELECTRIC STRUCTURE

Ivasheva E.E.<sup>1</sup>, Bichurin M.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Velikiy Novgorod, e-mail: ellen9879@yandex.ru

---

In this paper, we consider the magnetoelectric (ME) effect in a two-layer structure based on ferromagnetic metal Ni and various piezoelectrics (PZN-PT, PMN-PT, lead zirconate titanate (PZT) and quartz). An expression is obtained for the resonant value of a constant bias field in a thin nickel film, the numerical value of which is 1869 Oe for a resonant frequency of 10 GHz. An expression is also given for the ferromagnetic resonance (FMR) line shift in a two-layer structure when a constant electric field is applied to it. Graphs of the dependence of the FMR line shift on the electric field are presented. It is shown that the largest shift of the FMR line is observed in the Ni/PZN-PT structure, and the smallest shift is observed in the Ni/Quartz structure, in comparison with the other considered two-layer ME structures.

---

Keywords: microwave magnetoelectric effect, bilayer structure, bilayer structure, piezoelectric, ferromagnetic metal, ferromagnetic resonance

### Введение

Микроволновый магнитоэлектрический (МЭ) эффект характеризуется изменением намагниченности структуры при приложении электрического поля. Он представляет довольно большой интерес для практических применений [1, 2, 3]. Процесс происхождения и количественный расчет МЭ эффекта в области СВЧ важны при проектировании и оптимизации МЭ устройств [4].

В данной работе рассматривается микроволновый МЭ эффект в структурах, где в качестве магнестрикционной фазы используется никель, а в качестве пьезоэлектрической фазы – PZN-PT, PMN-PT, цирконат-титанат свинца (ЦТС) и кварц.

### Цель исследования

Целью данного исследования является выявление среди рассматриваемых МЭ структур пьезоэлектрик, с которым будет наблюдаться наибольший сдвиг линии ФМР в двухслойной структуре при воздействии внешнего электрического поля.

### Материал и методы исследования

Приведено теоретическое исследование микроволнового МЭ эффекта в двухслойных МЭ структурах, состоящих из ферромагнитного металла и различных пьезоэлектриков. В качестве ферромагнитного металла используется никель, а в качестве пьезоэлектриков – PZN-PT, PMN-PT, ЦТС и кварц.

### Результаты исследования и их обсуждение

В настоящем исследовании рассматривается двухслойная МЭ структура, состоящая из магнестрикционной и пьезоэлектрической фаз. На рис. 1 приведена исследуемая структура и указаны направления переменного  $\vec{h}$  и постоянного  $\vec{H}_0$  магнитных полей и электрического поля  $\vec{E}$ .

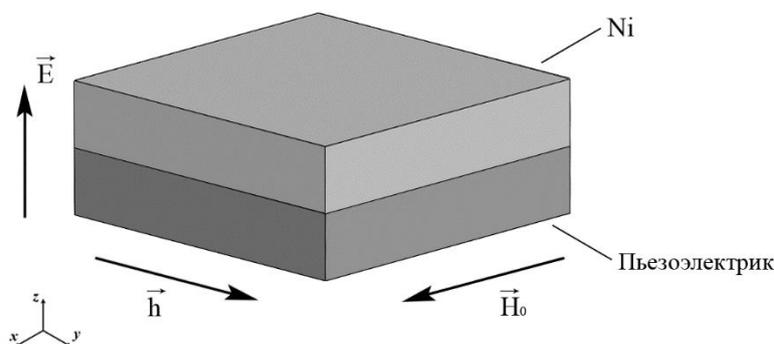


Рисунок 1 – МЭ структура

Уравнение движения намагниченности в тонкой пленке никеля под действием  $\vec{h}$  в присутствии  $\vec{H}_0$  при условии  $h \ll H_0$  с учетом диссипации [5]

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma \left[ \vec{M} \times \frac{\partial W}{\mu_0 \partial \vec{M}} \right] + i\omega\alpha \frac{[\vec{M}_0 \times \vec{m}]}{M_0}. \quad (1)$$

Резонансное значение постоянного подмагничивающего поля равно

$$H_0 = \frac{\gamma M_0 (2 \sum N_{11}^i - \sum N_{22}^i - \sum N_{33}^i) + \sqrt{\gamma^2 M_0^2 (\sum N_{22}^i - \sum N_{33}^i)^2 + 4\omega^2}}{2\gamma}, \quad (2)$$

откуда для никеля  $H_0 = 148696 \frac{A}{M} \approx 1869 \text{ Э}$  для резонансной частоты  $f = 10 \text{ ГГц}$ .

В случае, когда  $\vec{E}$  направлено вдоль оси 3 (z), сдвиг резонансной линии будет выглядеть следующим образом

$$\delta H_E = \frac{-3\lambda_{100} (Q_2 \{ {}^m T_1 - {}^m T_2 \} + Q_3 {}^m T_1)}{\mu_0 M_0 Q_1}. \quad (3)$$

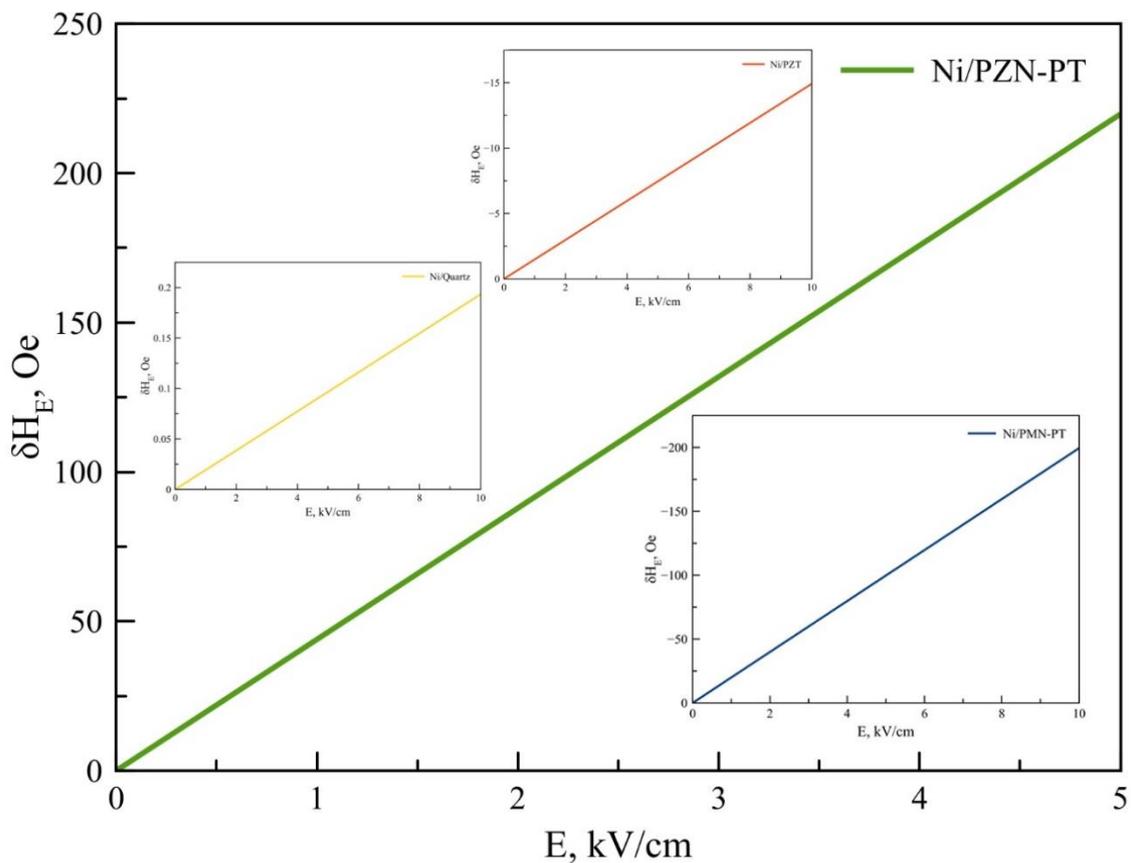


Рис. 2. Зависимость сдвига резонансной линии ферромагнитного резонанса от напряженности электрического поля

На рис. 2 представлена зависимость сдвига резонансной линии ферромагнитного резонанса (ФМР) от напряженности электрического поля для МЭ структур Ni / PZN-PT, Ni / PMN-PT, Ni / ЦТС и Ni / Кварц.

### Заключение

В ходе теоретического исследования были выявлены МЭ структуры с наибольшим и наименьшим сдвигом линии ФМР при приложении внешнего электрического поля. Наибольшее значение сдвига было получено в структуре Ni / PZN-PT, наименьшее – в структуре Ni / Кварц, что обусловлено величинами их пьезокоэффициентов.

### **Список литературы**

1. Бичурин М.И. Магнитоэлектрические материалы и их применение в технике СВЧ // Вестник НовГУ, Сер.: Естеств. и техн. науки, 2001, № 19. С. 7-12.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kapralov G.N., Kiliba Yu.V., Bukashev F.I., Smirnov A.Yu., Tatarenko A.S. Magnetolectric microwave devices // *Ferroelectrics*. 2002. 280. P. 211-218.
3. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu.V. Magnetolectric microwave phase shifters // *Ferroelectrics*. 1997. 204. P. 311-318.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M. Composite magnetolectrics: their microwave properties // *Ferroelectrics*. 1994.V. 162. P. 33-36.
5. Соколов О.В., Бичурин М.И., Лобекин В.Н., Татаренко А.С. Микроволновый магнитоэлектрический эффект в двухслойных структурах на основе железо – иттриевого граната, кварца и магнониобата свинца // Вестник Новг. гос. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2019. №4(116). С. 92-95.