

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СДВИГА ЛИНИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ОТ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Кафаров Р.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, [evraudx14@gmail.com](mailto:evraudx14@gmail.com)

---

В данной статье приводятся результаты экспериментов, показывающие зависимость сдвига линии ферромагнитного резонанса в слоистых структурах на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) от величины внешнего электрического поля и параметров различных пьезоэлектриков (цирконат-титанат свинца (ЦТС), лангасит)).

В результате исследования получены зависимости сдвигов линии ферромагнитного резонанса от параметров пьезоэлектриков (толщина, линейные размеры, диэлектрическая проницаемость) в слоистых структурах ЖИГ-ГГГ-ЦТС, ЖИГ-ГГГ-Лангасит.

Полученные результаты показывают, что эффект сдвига линии ферромагнитного резонанса можно использовать для разработки новых управляемых СВЧ-устройств, принцип работы которых основан на электронной перестройке резонансных характеристик с помощью электрического поля и выборе типа пьезоэлектрика.

---

Ключевые слова: ферромагнитный резонанс, магнитоэлектрический эффект, пьезоэлектрик, железо-иттриевый гранат

## INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE FERROMAGNETIC RESONANCE LINE SHIFT ON THE PARAMETERS OF PIEZOELECTRICS AND THE EXTERNAL ELECTRIC FIELD

Kafarov R.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yaroslav-the-Wise State University, Velikiy Novgorod, e-mail: [evraudx14@gmail.com](mailto:evraudx14@gmail.com)

---

This article presents the results of experiments showing the dependence of the ferromagnetic resonance (FMR) line shift in layered structures based on yttrium-iron garnet (YIG) on a gadolinium-galium garnet (GGG) substrate on the external electric field and the parameters of various piezoelectrics (plumbum zirconate-titanate (PZT), Langasite)).

As a result of the study, the dependences of the FMR line shift on the parameters of piezoelectrics (thickness, linear dimensions, permittivity) in the layered structures of YIG-GGG-PZT, YIG-GGG-Langasite were obtained.

The results obtained show that the effect of the FMR line shift can be used to develop new controlled microwave devices, the principle of operation of which is based on the electronic rearrangement of resonant characteristics using an electric field and the choice of the different piezoelectrics.

---

Keywords: ferromagnetic resonance, magnetoelectric effect, piezoelectric, yttrium-iron garnet

### Введение

На сегодняшний день есть ряд проблем, затрудняющих использование теоретических знаний в области магнитоэлектричества в композиционных материалах для создания устройств на основе магнитоэлектрических (МЭ) композитов. Наблюдается значительный интерес к таким материалам, в которых проявляется связь между магнитными и электрическими свойствами.

Ферромагнитный резонанс (ФМР) - один из видов магнитного резонанса, проявляющийся в избирательном поглощении энергии электромагнитного поля ферромагнетиком при определённых (резонансных) значениях частоты  $\omega$  и напряжённости  $H$  внешнего магнитного поля. ФМР часто понимается как совокупность явлений, происходящих в ферро- и ферримагнетиках, помещённых в постоянное или медленно меняющееся магнитное поле и переменное магнитное поле с частотой, лежащей в СВЧ-диапазоне. Данный эффект лежит в основе практически всех резонансных магнитных СВЧ-устройств (генераторов, усилителей, фильтров и т. п.) [1].

В данной статье рассматриваются структуры, состоящие из ферромагнитной и пьезоэлектрической фазы. За счет приложения электрического поля к пьезоэлектрической фазе слоистой структуры, происходит деформация пьезоэлектрика, которая в свою очередь приводит к деформации ферромагнитного материала, в результате чего наблюдается сдвиг линии ФМР из-за изменения магнитного момента [2].

Целью исследования слоистых феррит-пьезоэлектрических структур является получение и обобщение информации о влиянии параметров пьезоэлектриков на сдвиг линии ФМР, что позволит оптимизировать имеющиеся и планируемые устройства на основе МЭ эффекта. Также целью является углубленное изучение природы ФМР в исследуемых структурах.

## **Исследуемые структуры**

В роли резонаторов были использованы слоистые феррит-пьезоэлектрические структуры. В качестве магнитострикционной фазы использовался железо-иттриевый гранат (ЖИГ) в форме диска на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), а пьезоэлектрической фазы – пластины пьезокерамики цирконат-титанат свинца (ЦТС-19) или пьезоэлектрического кристалла лангасита. Для минимизации потерь при передаче механических напряжений с пьезоэлектрика на феррит, структура ЖИГ-ГГГ клеится на пьезоэлектрик стороной ЖИГа (рис.1) [3].

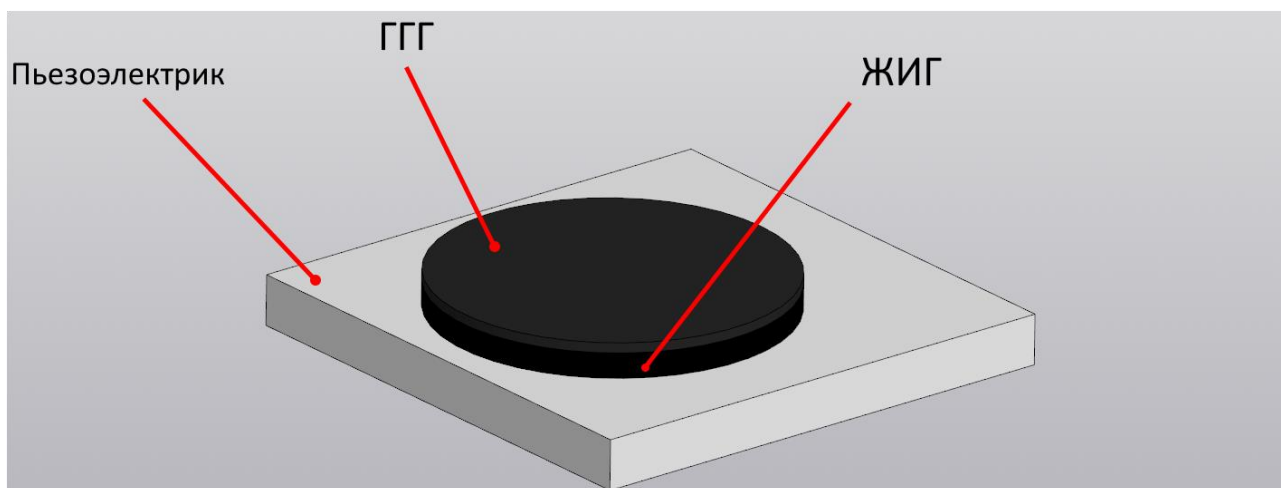


Рис. 1. Модель слоистой структуры.

### Метод исследования

Исследования проводились в СВЧ диапазоне (9.3 ГГц) на спектрометре электронного парамагнитного резонанса MiniScope MS 5000X. К пластине пьезоэлектрика прикрепляются электроды для приложения электрического поля. Образец помещается в центр резонатора, создаётся переменное магнитное поле напряжённостью от 1000 до 4000 Э. На определённых значениях напряжённости магнитного поля  $H_0$  происходит резонансное поглощение энергии поля сверхвысокой частоты ЖИГОм, что вызывает изменение уровня сигнала на детекторе [4]. При приложении электрического поля наблюдается сдвиг линии ФМР, то есть образец поглощает энергию при других значениях  $H_0$ .

### Результаты исследования

В результате исследования получены зависимости сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля напряжённостью  $E$  до 10 кВ/см. При исследовании образцов с лангаситом сдвига и уширения линии ФМР замечено не было, поскольку выбранная ось, вдоль которой было приложено электрическое поле, не являлась пьезоэлектрической. Образец с ЦТС имел выраженный сдвиг линии ФМР, равный 2 Э (рис. 2).

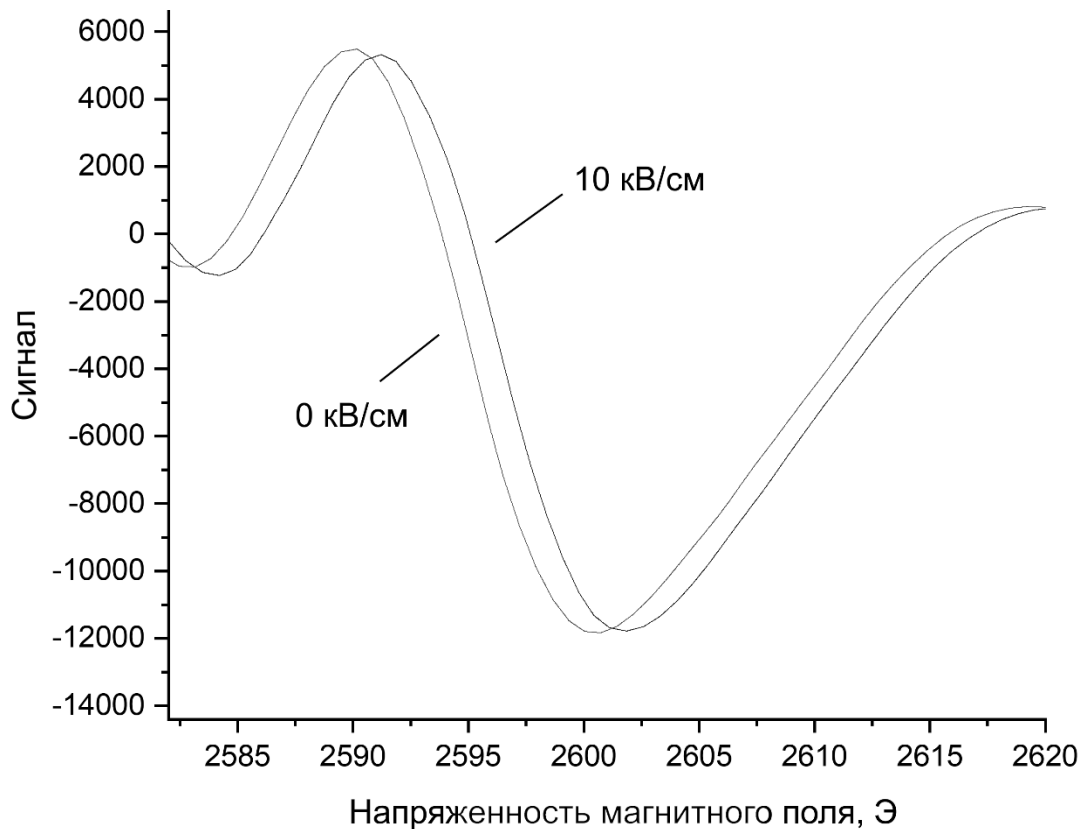


Рис. 2. Зависимость сдвига линии ФМР от величины внешнего электрического поля.  $D_{\text{ЖИГ}} = 0,4$  мм,  $A \times B \times H$  (ЦТС) =  $5 \times 5 \times 0,5$  мм, при  $h_m/h_p = 0,7$ . Ширина линии ФМР составляет 10 Э, сдвиг 2 Э.

## Заключение

Полученные в результате эксперимента данные позволяют сделать вывод о том, что при приложении внешнего электрического поля наблюдался сдвиг линии ФМР. Такое свойство слоистых феррит-пьезоэлектрических структур позволяет использовать их в различных перестраиваемых СВЧ-устройствах для замены магнитной перестройки на электрическую [5]. В дальнейшем планируется провести исследования с другими пьезоэлектриками, такими как кварц, PMN-PT и др. Планируется также выяснить влияние морфологии кристаллов пьезоэлектриков и ЖИГ на сдвиг линии ФМР.

## Список литературы

1. Котельникова О. А. ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС // Большая российская энциклопедия. Том 33. Москва, 2017, стр. 288
2. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.
3. Shastry S. et al. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate //Physical Review B. – 2004. – Т. 70. – №. 6. – С. 064416.
4. Антоненков О. В. Расчет сдвига линии магнитного резонанса в слоистых феррит-пьезоэлектрических структурах в электрическом поле // Вестник НовГУ. 2004. №28.
5. Лобекин В.Н., Кафаров Р.Г., Татаренко А.С., Муравьев В.Е. Исследование связи резонаторов микроволнового магнитоэлектрического полосового фильтра с помощью компьютерного моделирования // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.96-101. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).96-101](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).96-101)