

УДК 621.372

**МИКРОВОЛНОВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНЫХ  
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЧ УСТРОЙСТВ****Г.А.Семенов, С.Н.Иванов****MICROWAVE RESONATORS FOR SELECTIVE MAGNETOELECTRIC SHF-BAND DEVICES****G.A.Semenov, S.N.Ivanov***Институт электронных и информационных систем НовГУ, Gennady.Semenov@novsu.ru*

Исследовались магнитоэлектрические микроволновые резонаторы в форме диска, состоящего из слоев ГГГ/ИЖГ/ЦТС толщиной 300/90/300 мкм, соединенных между собой с помощью цианоакрилатного клея. Ферромагнитная часть формировалась методами лазерной резки и жидкостным химическим травлением в горячей концентрированной (87%) ортофосфорной кислоте через защитную маску SiO<sub>2</sub>/Ti/Pt. Получен максимальный сдвиг частоты резонатора  $\delta f_E = 10,5$  МГц при величине электрического поля  $E = 10$  кВ/см.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрические микроволновые резонаторы, иттрий-железистый гранат, цирконат-титанат свинца

Magnetolectric microwave disc resonators consist of GGG/YIG/PZT layers with 300/90/300  $\mu\text{m}$  thickness connected by using cyanoacrylate glue were researched. Ferromagnetic part was formed by laser cutting and wet chemical etching in hot concentrated (87%) phosphoric acid through the SiO<sub>2</sub>/Ti/Pt protective mask. The maximum shift of resonance frequency values  $\delta f_E$  of 10,5 MHz in the electric field magnitude  $E$  of 10 kV/cm is achieved.

**Keywords:** magnetolectric microwave resonators, yttrium iron garnet, lead zirconium titanate

**Введение**

Селективные микроволновые устройства широко используются в радиолокации, системах связи и часто реализуются на ферритах. Как известно, ферритовые устройства перестраиваются магнитным полем в широком частотном диапазоне, однако такая перестройка инерционна, наводит электромагнитные помехи и требует значительной потребляемой мощности. В случае реализации СВЧ устройств на основе сегнетоэлектриков перестройка осуществляется электрическим полем, но на высоких частотах в них возрастают диэлектрические

потери. Объединение ферритов с малыми потерями и электрически управляемых сегнетоэлектриков в единой магнитоэлектрической (МЭ) слоистой структуре позволяет обеспечить уникальную возможность одновременной электрической и магнитной перестройки. В микроволновом диапазоне в таких структурах приложенное электрическое поле за счет пьезоэлектрического эффекта вызывает деформации в сегнетоэлектрической фазе, которые приводят к деформации магнитной фазы, тем самым изменяется эффективное магнитное поле, что приводит к сдвигу линии ферромагнитного резонанса (ФМР) [1].

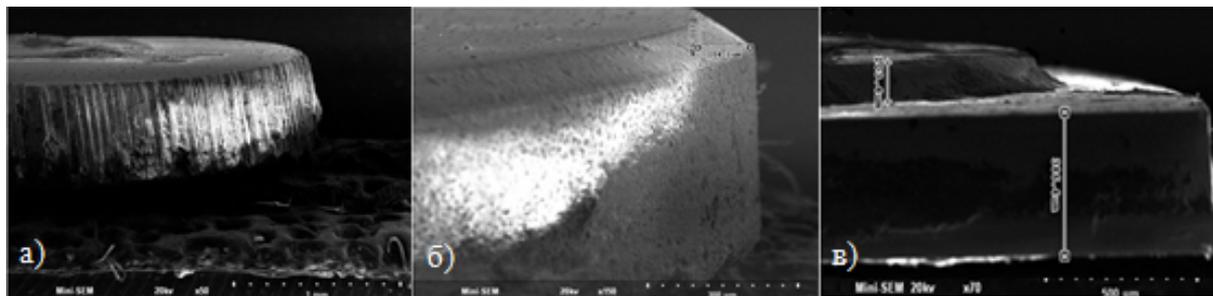


Рис.1. Образцы ИЖГ/ГГГ, полученные лазерной резкой (а), лазерной резкой с механической полировкой дефектной поверхности (б) и жидкостным химическим травлением (в). Изображения получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Xigox SH-150

### Эксперимент

Для исследования влияния метода формирования ферромагнитной части микроволнового МЭ резонатора на величину электрически индуцированного сдвига рабочей частоты  $\delta f_E$  были изготовлены образцы, состоящие из диска цирконата-титаната свинца  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  (ЦТС) склеенного с монокристаллической пленки иттрий-железистого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  (ИЖГ) на подложке гадолиний-галлиевого граната  $Gd_3Ga_5O_{12}$  (ГГГ).

Ферромагнитная часть резонатора изготавливалась из пластины ИЖГ/ГГГ диаметром 76 мм различными методами: с помощью лазерной резкой (ЛР), лазерной резкой с последующей полировкой субмикронным связанным абразивом (ЛР+МО) и жидкостным химическим травлением (ЖХТ). Резка осуществлялась лазером на основе твердотельного легированного неодимом алюмо-иттриевого граната, а изготовленные образцы представляли собой диски диаметром 3 мм. В случае ЖХТ образец представлял собой квадратную подложку  $Gd_3Ga_5O_{12}$  с размерами  $4 \times 4$  мм с вытравленной в виде окружности пленкой  $Y_3Fe_5O_{12}$  диаметром 3 мм (рис.1). Травление проводилось в горячей концентрированной (87%) ортофосфорной кислоте  $H_3PO_4$  через защитную маску  $SiO_2/Ti/Pt$  [2]. Толщина подложки ГГГ во всех случаях составляла 300 мкм.

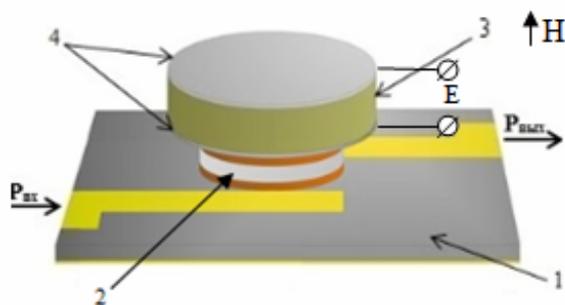


Рис.2. Конструкция микроволнового МЭ резонатора: 1 — плата  $Al_2O_3$ ; 2 — диск ИЖГ/ГГГ; 3 — диск ЦТС; 4 — электроды для подачи управляющего напряжения

Склеенный с помощью цианоакрилатного клея диск ГГГ/ИЖГ/ЦТС размещался в качестве

элемента связи на поликоровой плате с топологией в виде связанных линий (рис.2.). Плата помещалась в зазор электромагнита, где создавалось магнитное поле  $H$ , перпендикулярное поверхности феррогранатовой пленки. Величина МЭ взаимодействия в резонаторах оценивалась сдвигом частоты  $\delta f_E$  с помощью векторного анализатора цепей «Обзор-804» в диапазоне частот  $\Delta f = 1..8$  ГГц. Управляющее напряжение подавалось на обкладки диска ЦТС-19 диаметром 5 мм.

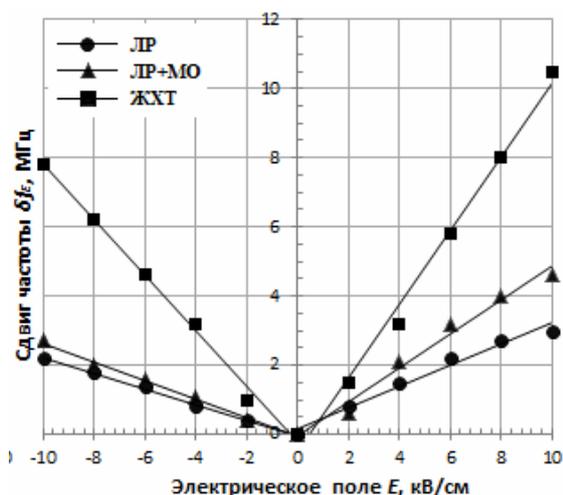


Рис.3. Сдвиг резонансной частоты  $\delta f_E$  изготовленных МЭ резонаторов

Как видно из экспериментальных результатов, представленных на рис.3, величина сдвига резонансной частоты  $\delta f_E$  от управляющего поля  $E$  выше в МЭ резонаторе с ферромагнитной частью, изготовленной методом ЖХТ в ортофосфорной кислоте. Использование механической полировки дефектных поверхностей после лазерной резки не позволяет серьезно улучшить качество поверхности, что отражается в незначительном увеличении величины  $\delta f_E$ .

Полученные результаты объясняются тем, что в процессе химического травления удаляется один молекулярный слой за другим и, в отличие от лазерного излучения или воздействия абразивного материала, не возникает трещин, сколов, а нарушенный слой минимальный [3]. Таким образом, воздействие травителя не приводит к уширению резонансной линии и расщеплению основной моды спектра.

## Параметры микроволновых МЭ резонаторов

Резонатор	Метод формирования	Толщина слоев, мкм	Ширина линии ФМР, МГц	$\delta f_E$ , МГц	U, В	Ссылка
ГГГ/ИЖГ/ЦТС	—	200/15/500	3,4	24,5	500	[4]
ГГГ/ИЖГ/ЦТС	—	200/100/500	3,4	30	360	[5]
ГГГ/ИЖГ/ЦТС	—	500/124/500	2,8	6	375	[6]
ГГГ/ИЖГ/ЦТС	ЖХТ	300/90/300	1,1	10,5	300	
	ЛР		4,1	3		
	ЛР + МО		2,7	4,4		

## Заключение

Результаты исследования влияния метода формирования ферромагнитной части на величину микроволнового МЭ эффекта в резонаторах ИЖГ/ЦТС позволяют говорить о том, что химически вытравленные образцы демонстрируют лучшие характеристики по сравнению с образцами, изготовленными традиционными методами. Экспериментально полученные значения частотной избирательности исследуемых резонаторов с химически вытравленным ИЖГ/ГГГ элементом  $\delta f_E = 10,5$  МГц при ширине линии ФМР  $\sim 1,1$  МГц позволяют в дальнейшем использовать их как основу для планарных селективных СВЧ устройств магнитного типа с электрическим управлением [7].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания.*

1. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M., et al. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric-magnetostrictive multilayer composite // Phys. Rev. B. 2001. V.64. P.094409.
2. Иванов С.Н. Формирование ИЖГ-резонаторов жидкостным химическим травлением // Мат. XII науч.-техн. конф. «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. С.308-310.
3. Иванов С.Н., Бичурин М.И., Семенов Г.А. Технология ИЖГ-резонаторов для магнитоэлектрических СВЧ-устройств // Вестник НовГУ. Сер.: Физ.-мат.науки. 2013. №73. Т.2. С.97-100.
4. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., et al. Bias field effects on the microwave frequency behavior of a PZT/YIG

magnetolectric bilayer // IEEE Trans Magn. 2007. V.43. P.3343.

5. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Bichurin M.I. Magnetolectric Microwave Phase Shifter // Appl. Phys. Lett. 2006. V.88. P.183507.
6. Fetisov Y.K. and Srinivasan G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator // Ibid. P.143503.
7. Magnetolectricity in Composites / Eds. M.I.Bichurin and D.Viehland. Singapore: Pan Stanford Publ., 2012. 273 p.

## References

1. Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M., Tatarenko A.S., Kiliba Yu.V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at microwave frequencies in a piezoelectric-magnetostrictive multilayer composite. Physical Review B, vol. 64, p.094409, 2001.
2. Ivanov S.N. Formirovanie IZhG-rezonatorov zhidkostnym khimicheskim travleniem [Forming YIG-resonators by wet chemical etching]. Materialy XII nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Tverdotel'naya elektronika. Slozhnye funktsional'nye bloki REA» [Proc. of the 12th Scient. and Tech. Conf. "Solid-state electronics. REA compound functional blocks"]. Moscow, 2013, pp. 308-310.
3. Ivanov S.N., Bichurin M.I., Semenov G.A. Tekhnologiya IZhG-rezonatorov dlia magnitoelektricheskikh SVCh-ustroystv [The technology of YIG-resonator forming for magnetoelectric microwave devices]. Vestnik NovGU. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Physico-Mathematical Sciences, 2013, no. 73, vol. 2, pp. 97-100.
4. Pettiford C., Dasgupta S., Lou J., Yoon S., Sun N.X. Bias field effects on the microwave frequency behavior of a PZT/YIG magnetolectric bilayer. IEEE Transactions on Magnetics, vol.43, p.3343, 2007.
5. Tatarenko A.S., Srinivasan G., Bichurin M.I. Magnetolectric Microwave Phase Shifter. Applied Physics Letters, vol.88, p.183507, 2006.
6. Fetisov Y.K., Srinivasan G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator. Applied Physics Letters, 88, 143503, 2006.
7. Bichurin M.I., Viehland D., eds. Magnetolectricity in Composites. Singapore, Pan Stanford Publ., 2012. 273 p.