

05

## **Механизм электрической перестройки частоты в композитных резонаторах на основе эпитаксиальных ферритовых пленок**

© М.А. Попов, И.В. Зависляк

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Украина  
E-mail: maxim\_porov@univ.kiev.ua

Поступило в Редакцию 23 апреля 2012 г.

Представлены результаты исследования планарной структуры, состоящей из эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната и цирконата-титаната свинца. Теоретически и экспериментально показано, что электрическая перестройка частоты обусловлена наведенными упругими напряжениями изменениями поля одноосной анизотропии первого порядка, при этом поле одноосной анизотропии второго порядка меняется существенно меньше. Найдено, что склеивание феррита и металлизированного пьезоэлектрика незначительно увеличивает потери магнитостатического резонатора.

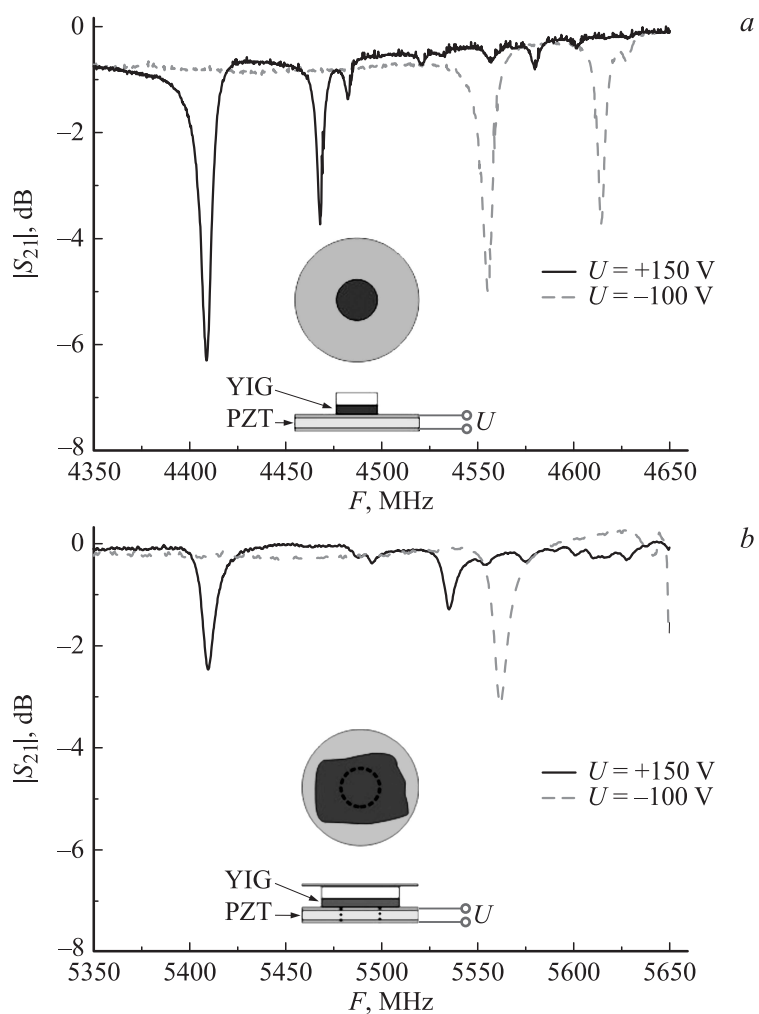
Спиновые колебания и волны, возбуждаемые в ферро- и ферримагнитных материалах, используются для создания устройств аналоговой обработки сигналов СВЧ диапазона [1,2]. Важной особенностью подобных приборов является возможность управления их параметрами внешним магнитным полем. Однако, это преимущество сопровождается присущими магнитной перестройке недостатками: инерционностью и большой потребляемой мощностью. В последние годы одним из направлений исследований является изучение новых композитных материалов на основе планарных структур феррит/пьезоэлектрик, допускающих двойную перестройку как магнитным, так и электрическим полями [3,4]. В этом случае можно расширить функциональные возможности СВЧ приборов, реализовав новый механизм управления их характеристиками: деформация слоя пьезоэлектрика, вызванная электрическим полем  $E$ , передается механически связанному с ним слою феррита, а созданное в феррите упругое напряжение приводит к сдвигу резонансной частоты. При этом, несмотря на многочисленные

экспериментальные исследования, конкретный механизм, связывающий упругие деформации феррита с изменением его магнитных параметров, детально не исследовался.

Как известно [5], при выращивании эпитаксиальных пленок ферритов, в частности, железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  (ЖИГ), механические напряжения, возникающие на границе пленка-подложка вследствие несовпадения постоянных решеток, не оказывая заметного влияния на намагниченность насыщения и кубическую анизотропию феррита, приводят к появлению в пленке одноосной анизотропии первого и второго порядков [2]. Поскольку в исследуемой слоистой структуре механическое напряжение (сжатие либо растяжение) точно так же прикладывается в плоскости пленки на границе между ферритом и немагнитным материалом, то можно предположить, что механизмом сдвига частоты магнитостатического резонанса будет изменение наведенной одноосной анизотропии как первого, так и второго порядков, однако их вклады требуют специального исследования.

Для проверки данного предположения в работе было проведено исследование электрической перестройки частоты двух типов композитных магнитостатических резонаторов феррит/пьезоэлектрик: а) размерного резонатора в форме диска, и б) запредельного резонатора (см. вставки на рис. 1). Пьезоэлектриком выступал металлизированный с двух сторон диск цирконата-титаната свинца (ЦТС) толщиной 0.2 mm, с пьезоэлектрическим коэффициентом  $d_{31}$  равным  $-270 \cdot 10^{-12}$  m/V. Феррит представлял собой одностороннюю эпитаксиальную пленку ЖИГ толщиной 26.8  $\mu$ m, выращенную на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ , причем слой ГГГ был механически сошлифован до толщины в 230  $\mu$ m. Размерный резонатор имел форму диска диаметром 2.95 mm, который затем приклеивался на ЦТС эпоксидным клеем ЭКС-4. Для получения запредельного резонатора в ЦТС высверливалось отверстие диаметром 3 mm, на него наклеивался фрагмент пленки неправильной формы, который затем накрывался металлическим экраном. В такой конфигурации в односторонне металлизированной области пленки при нормальном намагничивании образовывался запредельный резонатор прямых объемных магнитостатических колебаний (МСК) [6].

Полученные резонаторы размещались на микрополосковой линии, вблизи от токонесущей полоски, и АЧХ образовавшейся структуры исследовалась при помощи измерителя КСВН панорамного Р2-57



**Рис. 1.** Перестройка АЧХ составного резонатора феррит/пьезоэлектрик при приложении напряжения к пьезоэлектрику. На вставках — схематическое изображение исследуемых резонаторов: размерного (а) и запредельного (b).

в диапазоне 3.2–5.6 GHz. Измерения проводились в двух режимах: при нормальном и касательном к пленке направлении внешнего магнитного поля  $H_0$ . Примеры перестройки АЧХ размерного и запредельного резонаторов при приложении электрического поля показаны на рис. 1. Центральная рабочая частота магнитоэлектрического резонанса в феррите при этом может перестраиваться в широких пределах при изменении приложенного к резонатору магнитного поля. Под действием же управляющего электрического поля (в эксперименте к ЦТС прикладывалось напряжение от +150 В до –120 В) частота смещается в более узком диапазоне ( $\approx 100$  MHz), что составляет примерно 2–3% от центральной частоты, и более чем на порядок превосходит ширину линии. Оба исследованных типа резонаторов показали аналогичные характеристики по перестройке.

На рис. 2 показана зависимость частоты дискового составного резонатора от напряженности приложенного электрического поля для нормального и касательного режимов подмагничивания при фиксированном значении внешнего магнитного поля. Наблюдаемый гистерезис обусловлен свойствами ЦТС.

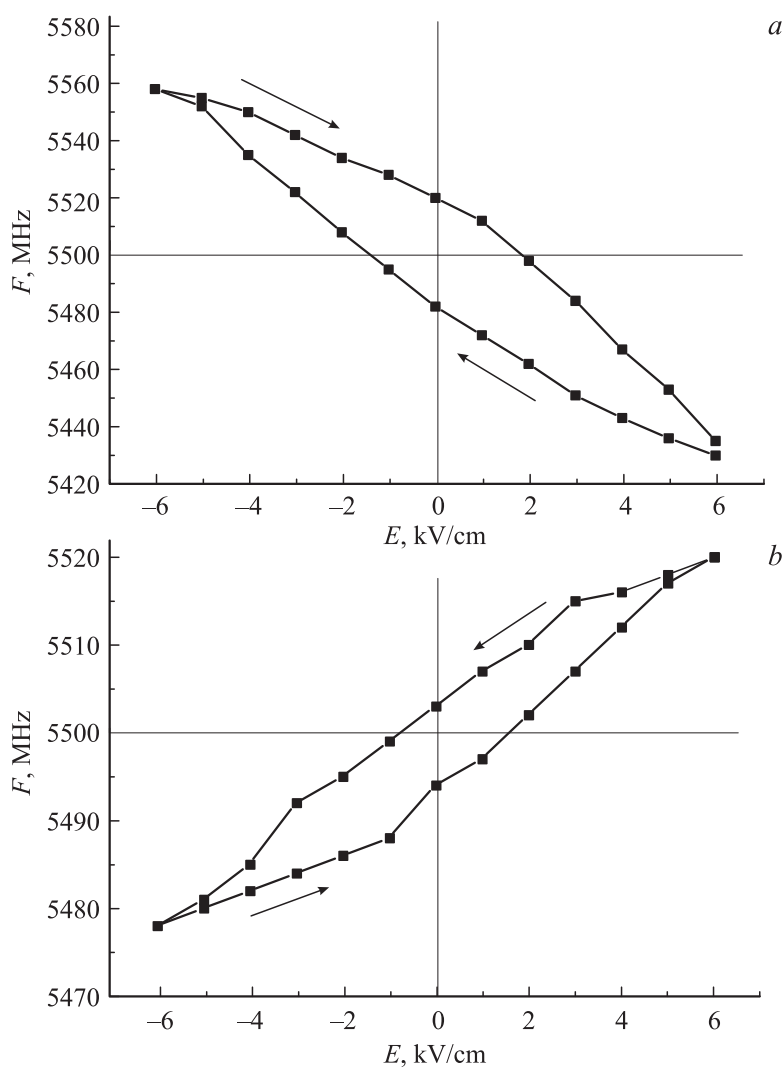
Для оценки влияния деформации на поле анизотропии обратимся к выражениям для частоты основной моды ( $k \approx 0$ ) прямых объемных МСК (магнитное поле нормальное) и поверхностных МСК (магнитное поле касательное) в анизотропном материале [2]:

$$\omega_{\perp} = \omega_H - \omega_M N_{\perp} + \gamma H_{u1} - \frac{4}{3} \gamma H_{cub} + \gamma H_{u2},$$

$$\omega_{\parallel} = \sqrt{(\omega_H - \omega_M N_{\parallel})(\omega_H - \omega_M N_{\parallel} + \omega_M - \gamma H_{cub} - \gamma H_{u1}) - 2(\gamma H_{cub})^2} \quad (1)$$

(здесь  $H_{u1}$  и  $H_{u2}$  — поля одноосной анизотропии первого и второго порядков,  $H_{cub}$  — поле кубической анизотропии,  $\omega_H = \gamma H_0$ ,  $\omega_M = \gamma 4\pi M$ ,  $4\pi M = 1750$  G — намагниченность насыщения образца,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $N_{\perp}$ ,  $N_{\parallel}$  — размагничивающие факторы).

Приняв для ЖИГ типичное значение поля кубической анизотропии  $H_{cub} = -55$  Oe и зная точку перехода  $H_c = 73 \pm 1$  Oe из насыщенного в многодоменное состояние, можно, используя условие  $H_c(H_c - H_{u1} - H_{cub}) - 2H_{cub}^2 = 0$  [7], определить поле одноосной анизотропии первого порядка в недеформированной пленке  $H_{u1}(E = 0)$ . После чего для нескольких значений центральной частоты из указан-



**Рис. 2.** Зависимость резонансной частоты основной моды дискового размерного резонатора ЖИГ/ЦТС от напряженности электрического поля в пьезоэлектрике, при нормальном (*a*) и касательном (*b*) режимах подмагничивания. Направление обхода показано стрелками.

ного диапазона, исходя из (1) и измеренных экспериментально зависимостей  $\omega_{\parallel}(E)$  были получены зависимости  $H_{u1}(E)$ . Данные по электрической перестройке частоты при нормальном намагничивании  $\omega_{\perp}(E)$  позволили рассчитать  $H_{u2}(E)$ . Вызванные механической деформацией изменения в полях одноосной анизотропии показаны на рис. 3.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что механическая деформация пленки ЖИГ изменяет главным образом поле одноосной анизотропии первого порядка, при этом слабо влияя на поле второго порядка. Как показывает исследование выражения для магнитоупругой энергии ферромагнетика, поле одноосной анизотропии второго порядка зависит от магнитоупругих констант более высокого порядка малости, чем поле первого порядка, что является одной из причин разной величины эффекта. С другой стороны, в отличие от обычной эпитаксиальной структуры пленка-подложка, в данном случае имеет место более сложный, трехкомпонентный, композит. При этом оценка по приведенной в [5] теоретической формуле, дает, для типичных параметров ЖИГ и ЦТС,  $\Delta H_{u1} = \mp 28$  Ое при  $E = \pm 6$  кВ/см, что лишь немногим больше, чем экспериментально найденное значение.

Исходя из полученных результатов и воспользовавшись формулами (1), можно теоретически оценить величину электрической перестройки частоты резонатора из эпитаксиальной пленки ЖИГ:

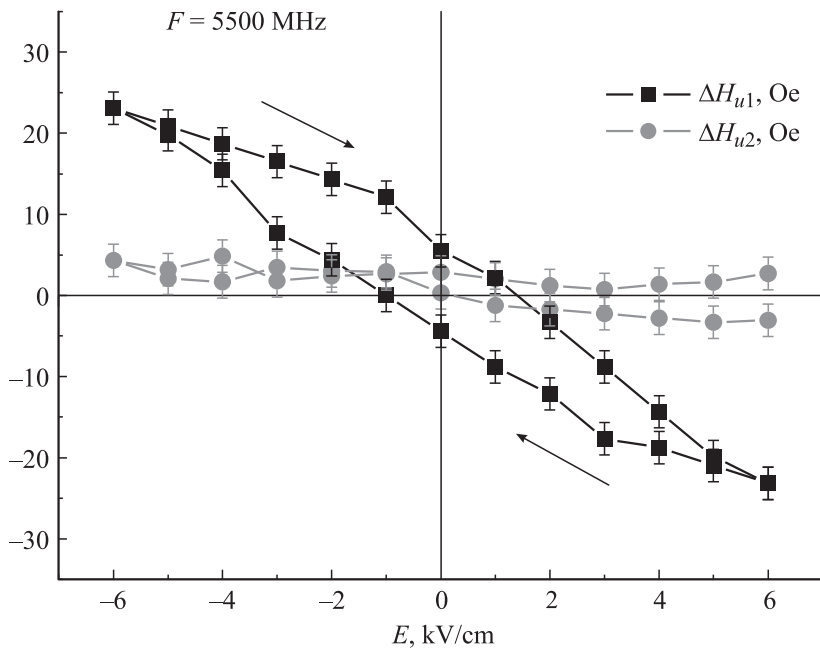
$$\Delta\omega_{\parallel}(E) = \frac{\partial\omega_{\parallel}}{\partial H_{u1}} \Delta H_{u1}(E) \approx -\frac{\gamma\delta H_{u1}(E)}{2\sqrt{(1 + \omega_M/\omega_H)}}, \quad \Delta\omega_{\perp}(E) = \gamma\Delta H_{u1}(E) \quad (2)$$

и, сравнивая, находим

$$\Delta\omega_{\perp}(E)/\Delta\omega_{\parallel}(E) = -2\sqrt{(1 + \omega_M/\omega_H)}. \quad (3)$$

Из выражения (3) можно сделать следующие выводы: а) сдвиг частоты в нормальном режиме, при прочих равных условиях, всегда больше (минимум в 2 раза), чем в касательном; б) одно и то же приложенное напряжение вызывает в разных режимах подмагничивания сдвиг частоты противоположных знаков. Оба этих вывода подтверждаются экспериментальными результатами (рис. 2).

Помимо измерения сдвига частоты были проведены исследования релаксационных свойств пленочного магнитоэлектрического резонатора, в соответствии с методикой, описанной в [8]. При этом, если для контрольных дисковых резонаторов ЖИГ собственная полуширина



**Рис. 3.** Рассчитанное из экспериментальных данных изменение полей одноосной анизотропии первого и второго порядков в пленке ЖИГ, вызванное приложенным к пленке механическим напряжением. Направление обхода показано стрелками.

линии релаксации по полю  $\Delta H$  составила 0.45–0.5 Oe, то для дисковых резонаторов, приклеенных на ЦТС,  $\Delta H$  была 0.55–0.6 Oe, а для запердельного резонатора — возрастала от 1.25 Oe при 3.5 GHz до 3.1 Oe при 5.5 GHz. Следовательно, приклеивание диска ЖИГ к ЦТС, т.е. добавление возможности по управлению частотой резонатора электрическим полем, не сопровождается существенным увеличением потерь. В запердельном резонаторе потери значительно больше, что, очевидно, обусловлено различными механизмами формирования резонансов.

Таким образом, в работе показано, что экспериментальные результаты по перестройке частоты магнитостатического резонанса в слоистой структуре феррит/пьезоэлектрик электрическим полем могут быть объяснены на основании имеющейся теории магнитостатических

волн в анизотропном материале, предполагая, что создаваемое пьезо-электриком в пленке механическое напряжение заметно влияет лишь на поле одноосной анизотропии первого порядка. Оценка эффекта, исходя из теоретической модели, хорошо согласуется с экспериментом. Полученный результат позволяет уточнить механизм электрического управления частотой композитных материалов на основе планарных структур феррит/пьезоэлектрик, и, основываясь на обнаруженной закономерности, целенаправленно изучать новые эффекты в данных материалах.

## Список литературы

- [1] *Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П.* Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд. Саратовского университета, 1993. 316 с.
- [2] *Бобков В.Б., Зависляк И.В., Романюк В.Ф.* // РЭ. 2003. Т. 48. N 2. С. 222–232.
- [3] *Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G.* // JAP. 2008. V. 103. N 3. P. 031101/1-35.
- [4] *Устинов А.Б., Фетисов Ю.К., Srinivasan G.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 14. С. 16–23.
- [5] *Балбашов А.М., Червоненский А.Я.* Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 216 с.
- [6] *Zavislyak I.V., Popov M.A., Srinivasan G.* // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20. N 11. P. 115704-5.
- [7] *Бобков В.Б., Зависляк И.В., Романюк В.Ф.* // ФТТ. 1993. Т. 35. В. 2. С. 431–435.
- [8] *Попов М.А., Зависляк И.В.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 4. С. 82–88.