

09

## Планарный феррит-пьезоэлектрический сверхвысокочастотный резонатор с электрической и магнитной перестройкой частоты

© А.Б. Устинов, Ю.К. Фетисов, G. Srinivasan

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,  
Россия

E-mail: spinlab@eltech.ru

Московский государственный институт радиотехники, электроники  
и автоматики (технический университет), Россия  
Oakland University, Rochester, 48309 Michigan, USA

Поступило в Редакцию 19 ноября 2007 г.

Экспериментально исследован планарный композитный резонатор на основе двухслойной структуры, содержащей монокристаллическую пленку феррита железо-иттриевого граната и пластину пьезоэлектрического магнийобататитаната свинца. Продемонстрированы магнитная и электрическая перестройка частоты резонатора. Магнитная перестройка частоты в диапазоне от 2 до 18 GHz реализована путем изменения поля подмагничивания структуры. Электрическая перестройка частоты достигала 20 MHz при приложении к пьезоэлектрику электрического поля 8 kV/cm. С увеличением центральной частоты резонатора его добротность возрастала от 110 до 990, а величина электрической перестройки не изменялась.

PACS: 76.50.+g, 75.80.+q, 77.84.-s

В последние годы для создания микроэлектронных приборов обработки сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов активно используются новые композитные материалы. В частности, разработаны резонаторы на основе структур, состоящих из двух или более слоев феррита и пьезоэлектрика [1–4].

Частота феррит-пьезоэлектрического резонатора определяется частотой колебаний намагниченности в ферритовом слое. Поэтому частоту резонатора можно перестраивать в широких пределах (от единиц до десятков гигагерц) за счет изменения магнитного поля (магнитная

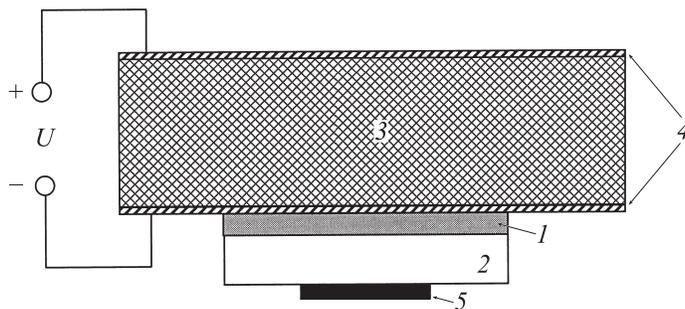
перестройка). Однако перестройка частоты магнитным полем сравнительно медленная из-за индуктивности управляющих катушек и требует больших энергетических затрат.

Частоту композитного резонатора можно также изменять в узком диапазоне (на десятки мегагерц), прикладывая электрическое поле к слою пьезоэлектрика. Электрическая перестройка частоты возможна благодаря магнитоэлектрическому (МЭ) взаимодействию в структуре, которое заключается в следующем. Электрическое поле вызывает деформацию слоя пьезоэлектрика вследствие обратного пьезоэффекта. Деформация передается ферритовому слою, который механически связан с пьезоэлектрическим слоем. Из-за пьезомагнитного эффекта изменяется внутреннее магнитное поле в феррите. Это приводит к изменению резонансной частоты композитного резонатора.

Электрическая перестройка частоты композитного резонатора потенциально более быстрая и требует затрат энергии. Энергия потребляется только в процессе перестройки частоты. В стационарных условиях потребляемая энергия резко падает, поскольку протекающий через пьезоэлектрик ток очень мал. Таким образом, композитный феррит-пьезоэлектрический резонатор сочетает в себе преимущества широкополосной магнитной перестройки и низкоэнергетической электрической перестройки.

Сильное МЭ взаимодействие обнаружено в композитных структурах, где в качестве пьезоэлектрика применяли магнониобат-титанат свинца  $(x)\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - (1-x)\text{PbTiO}_3$  (PMN-PT) [2] или цирконат-титанат свинца  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$  [3,4], обладающие высокими пьезоконстантами. В качестве феррита обычно используют монокристаллические пленки железо-иттриевого граната  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG), имеющие малую ширину линии ферромагнитного резонанса и, как следствие, низкие потери в СВЧ-диапазоне [5].

Экспериментальное и теоретическое исследование МЭ взаимодействия в СВЧ-диапазоне для композитных феррит-пьезоэлектрических структур выполнено в [2]. Измерения проводили с использованием объемного СВЧ-резонатора на фиксированной частоте 9.3 GHz. Двухслойную YIG/PMN-PT структуру помещали вне резонатора вблизи маленького отверстия в его стенке и фиксировали изменение резонансного магнитного поля при приложении электрического напряжения к PMN-PT кристаллу. Вместе с тем для практических применений структуры YIG/PMN-PT необходимо знать частотную зависимость величины



**Рис. 1.** Конструкция композитного YIG/PMN-PT резонатора.

электрической перестройки и добротности резонатора, изготовленного на основе такой структуры, в широком диапазоне частот.

Целью настоящей работы являлось исследование планарного СВЧ-резонатора на основе двухслойной структуры YIG/PMN-PT, перестраиваемого магнитным и электрическим полем в диапазоне частот 2–18 GHz. Для возбуждения структуры использовали нерезонансный микрополосковый преобразователь, что позволило провести изучение характеристик резонатора в сравнительно широком диапазоне частот.

Конструкция исследованного резонатора схематически показана на рис. 1. Ферритовый слой резонатора был изготовлен из монокристаллической пленки YIG (1) толщиной  $7.5\ \mu\text{m}$ , с намагниченностью насыщения  $4\pi M = 1800\ \text{G}$  и шириной линии однородного ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 0.6\ \text{Oe}$ , измеренной на частоте 5 GHz. Пленка была выращена методом жидкофазной эпитаксии на подложке 2 из немагнитного галлий-гадолиниевого граната  $\text{Ga}_3\text{Gd}_5\text{O}_{12}$  (GGG) толщиной  $160\ \mu\text{m}$ . Размеры пленки в плоскости составляли  $1 \times 1\ \text{mm}$ .

В качестве пьезоэлектрика использовали монокристаллическую пластину PMN-PT (3) состава  $0.7[\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3]-0.3[\text{PbTiO}_3]$  с ориентацией (001), толщиной  $500\ \mu\text{m}$  и размерами в плоскости  $1.25 \times 4\ \text{mm}$ . На обе поверхности пластины были нанесены проводящие электроды 4, содержащие подслой из Cr толщиной 30 nm и слой Au толщиной 200 nm. Пластина PMN-PT была поляризована по нормали к плоскости, для чего ее сначала нагревали до  $140^\circ\text{C}$ , а затем медленно охлаждали до комнатной температуры в электрическом поле напряженностью

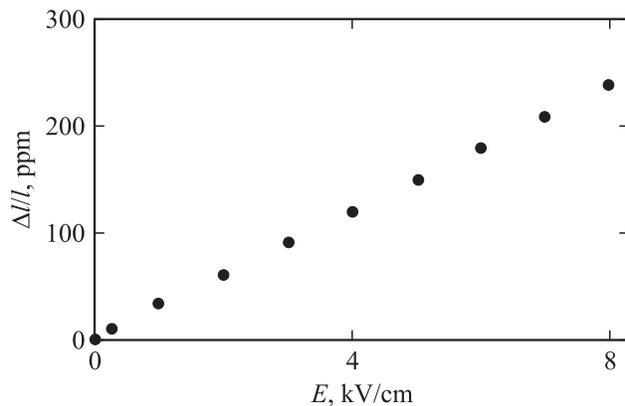
4 кВ/см. Для обеспечения жесткой механической связи пленка YIG была приклеена к пластине PMN-PT клеем „Loctite 499“.

СВЧ-колебания в резонаторе возбуждали с помощью микрополоскового преобразователя 5 шириной 0.5 мм и длиной 3 мм, выполненного методом фотолитографии на поликоревой подложке толщиной 0.5 мм. Один конец преобразователя был соединен со стандартной микрополосковой линией с волновым сопротивлением 50 Ω, а другой конец был закорочен. Величина связи между резонатором и микрополосковым преобразователем была оптимизирована за счет выбора толщины GGG подложки. Резонатор помещался в однородное магнитное поле электромагнита, направленное по касательной к плоскости YIG/PMN-PT структуры вдоль преобразователя.

Магнитная перестройка частоты YIG/PMN-PT резонатора выполнялась путем изменения напряженности поля  $H$ . Электрическая перестройка частоты осуществлялась путем приложения к электродам PMN-PT пластины постоянного напряжения  $U$ , создающего в ней электрическое поле  $E$ .

Исследование добротности и параметров электрической и магнитной перестройки частоты резонатора выполнено в диапазоне магнитных полей от 0.2 до 5.5 кОе и диапазоне электрических полей от 0 до 8 кВ/см. Измерения проводили с помощью панорамного измерителя Agilent E8361A в диапазоне частот  $f = 2-18$  GHz при мощности возбуждающего СВЧ-сигнала 0.1 мВт. Регистрировали частотную зависимость коэффициента отражения резонатора  $S_{11} = 20 \text{Lg}(P_{ref}/P_{in})$ , где  $P_{in}$  и  $P_{ref}$  — мощности падающего и отраженного сигналов соответственно для различных  $H$  при фиксированном значении поля  $E$  (магнитная перестройка) и для различных  $E$  при фиксированном значении поля  $H$  (электрическая перестройка).

Сначала были изучены свойства пластины PMN-PT и пленки YIG по отдельности. На рис. 2 показана измеренная зависимость относительной деформации  $\Delta l/l$  образца PMN-PT от приложенного поля  $E$ . Направление поля  $E$  совпадало с направлением начальной поляризации PMN-PT. Видно, что относительная деформация линейно возрастает с увеличением  $E$  и достигает максимальной величины, равной  $235 \cdot 10^{-6}$ . По измеренной зависимости определена пьезоэлектрическая константа кристалла  $d_{31} = (\Delta l/l)/E = 292$  рС/Н. При обратном направлении поля  $E$  значение  $d_{31}$  было существенно меньше. Образец PMN-PT не проявлял резонансных свойств в СВЧ-диапазоне частот, что можно

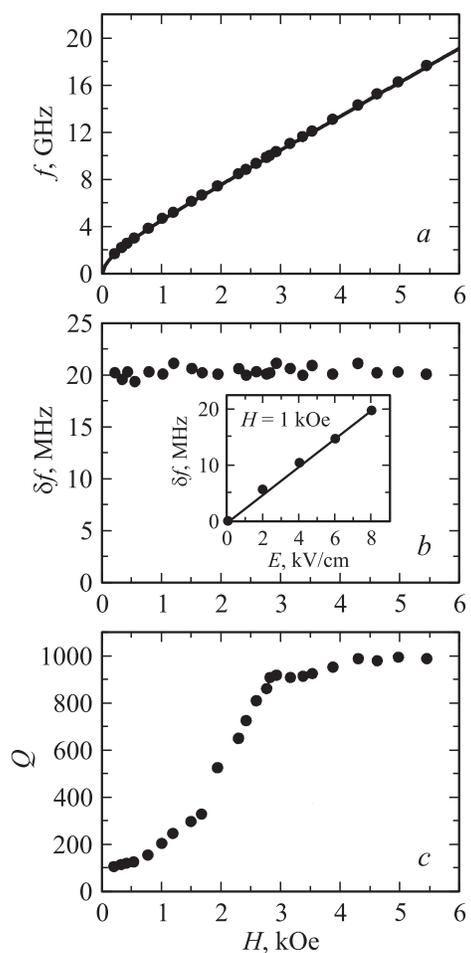


**Рис. 2.** Зависимость относительной деформации PMN-PT кристалла от электрического поля.

объяснить сравнительно высокой проводимостью материала. Измерения характеристик пленочного YIG резонатора (в отсутствие пластины PMN-PT) в диапазоне частот 2–18 GHz, проведенные с помощью описанного микрополоскового преобразователя, показали, что во всем частотном диапазоне нагруженная добротность резонатора варьировалась в пределах от 900 до 1200.

Затем были изучены характеристики композитного резонатора, содержащего пленку YIG и пластину PMN-PT. Магнитную перестройку YIG/PMN-PT резонатора демонстрирует рис. 3, *a*, на котором точками изображена зависимость резонансной частоты  $f$  резонатора от напряженности поля  $H$ , измеренная для  $E = 0$ . При изменении  $H$  в интервале 0.2–5.5 kOe диапазон перестройки частоты составлял 2–18 GHz. Сплошной линией на рис. 3, *a* изображена зависимость, рассчитанная в предположении, что частота резонатора определяется в основном частотой колебаний намагниченности в ферритовом слое [6]. Видно, что теория количественно описывает магнитную перестройку частоты YIG/PMN-PT резонатора с хорошей степенью точности.

Электрическую перестройку YIG/PMN-PT резонатора демонстрирует рис. 3, *b*. На графике точками показаны значения сдвига резонансной частоты  $\delta f$  при приложении поля  $E = 8$  kV/cm, измеренные для различных  $H$ . Видно, что величина сдвига частоты при фиксированном  $E$  прак-



**Рис. 3.** Характеристики композитного YIG/PMN-PT резонатора: *a* — зависимость резонансной частоты  $f$  от магнитного поля  $H$ ; *b* — зависимость сдвига частоты резонатора  $\delta f$  от магнитного поля  $H$ , измеренная при напряженности электрического поля  $E = 8$  kV/cm, на вставке зависимость  $\delta f$  от  $E$  при  $H = 1$  kOe; *c* — зависимость нагруженной добротности резонатора  $Q$  от магнитного поля  $H$ .

тически не зависит от центральной частоты резонатора, определяемой магнитным полем  $H$ . На вставке рис. 3,  $b$  точками показан типичный график зависимости смещения резонансной частоты от прикладываемого поля  $E$ , измеренный для  $H = 1$  кОе. Сплошной линией показана линейная аппроксимация экспериментальных данных. Таким образом, при приложении электрического поля линейная деформация PMN-PT ведет к линейному изменению частоты композитного резонатора, что согласуется с предсказанием теории [1].

На рис. 3,  $c$  приведена зависимость нагруженной добротности  $Q$  резонатора от поля  $H$ , определенная по результатам измерения частотных зависимостей коэффициента отражения резонатора  $S_{11}$  при различных значениях  $H$ . Добротность композитного резонатора была сравнительно небольшой:  $Q \sim 110$  при  $H = 206$  Ое, когда резонансная частота равнялась 1.84 GHz. Низкое значение  $Q$  объясняется тем, что на частотах около 2 GHz глубина скин-слоя на порядок превышает толщину электродов на поверхности PMN-PT кристалла. Поле СВЧ-колебаний намагниченности в слое YIG проникает в слой PMN-PT, обладающий сравнительно высокой проводимостью, что и приводит к большим потерям в гибридном резонаторе. Добротность резонатора возрастала до  $Q \sim 900$  при увеличении поля до  $H = 2.8$  кОе, когда резонансная частота составляла около 10 GHz. Такое поведение добротности объясняется постепенным уменьшением глубины скин-слоя и соответственно вносимых потерь с ростом частоты. При дальнейшем увеличении  $H$  от 2.8 до 5.5 кОе добротность резонатора изменялась незначительно, что свидетельствует о слабом проникновении электромагнитного поля в PMN-PT кристалл на частотах выше 10 GHz.

Полученные данные позволяют оценить коэффициент МЭ взаимодействия в исследованной YIG/PMN-PT структуре. Эквивалентное изменение поля  $\delta H$ , соответствующее сдвигу частоты  $\delta f = 20$  MHz резонатора, составляет 6.5 Ое. Используя формулу  $\alpha = \delta H / \delta E$ , получаем  $\alpha = 0.8 \cdot 10^{-3}$  Ое  $\cdot$  см/V, что удовлетворительно согласуется с результатами [2].

Таким образом, в работе предложен и исследован планарный композитный YIG/PMN-PT резонатор СВЧ-диапазона. Частота резонатора перестраивалась в диапазоне 2–18 GHz путем изменения касательного поля подмагничивания в пределах 0.2–5.5 кОе и на  $\sim 20$  MHz при приложении к пьезоэлектрику электрического поля величиной до 8 kV/cm. При перестройке частоты резонатора магнитным полем

его добротность возрасла примерно на порядок, а величина электрической перестройки частоты практически не изменялась. Эффективность МЭ-взаимодействия для исследованной структуры составляла  $\alpha = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ Ое} \cdot \text{см}/\text{В}$ .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 05-02-17714), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-8860.2006.2), Федерального агентства по образованию РФ (проекты РНП/2.1.1.1382 и РНП/2.1.1.1351), а также администрации Санкт-Петербурга.

## Список литературы

- [1] Антоненков О.В., Бичурин М.И., Филиппов Д.А., Петров В.М., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 15. С. 90–94.
- [2] Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M.I., Petrov V.M., Tatarenko A.S. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 064416/1-6.
- [3] Fetisov Y.K., Srinivasan G. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 1. P. 143503/1-3.
- [4] Fetisov Y.K., Srinivasan G. // Electron. Lett. 2005. V. 41. N 19. P. 1066–1067.
- [5] Яковлев Ю.М., Генделев С.Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Сов. радио, 1975. 190 с.
- [6] Semenov A.A., Karmanenko S.F., Demidov V.E., Kalinikos B.A., Srinivasan G., Slavin A.N., Mantese J.V. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 033503/1-3.