

Быстродействие планарного феррит-сегнетоэлектрического сверхвысокочастотного резонатора

© А.Б. Устинов,¹ G. Srinivasan²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197376 Санкт-Петербург, Россия

² Oakland University, Rochester, 48309 Michigan, USA

(Поступило в Редакцию 21 октября 2009 г.)

Исследовано быстродействие планарного феррит-сегнетоэлектрического сверхвысокочастотного резонатора, изготовленного на основе пленки железо-иттриевого граната и пластины титаната бария-стронция. Показано, что быстродействие резонатора определяется скоростью электронной перестройки его резонансных частот, характеризуемой изменением электрического поля смещения. При этом скорость перестройки резонатора составила 1.3–3.3 МГц/μs.

Одним из путей развития электроники является освоение новых композитных материалов с целью их использования для разработки микроэлектронных сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов [1]. В последние годы одним из актуальных направлений СВЧ-микроэлектроники стало исследование планарных резонаторов на основе слоистых феррит-сегнетоэлектрических структур [2–6]. Спектр колебаний таких резонаторов состоит из резонансных мод двух типов: квазидиэлектрических (КД) и квазиферромагнитных (КФ). Первые из них локализованы в основном в сегнетоэлектрике, а вторые — в феррите. Эти моды могут связываться, образуя единое гибридное электромагнитно-спиновое колебание, резонансными частотами которого можно управлять как магнитным, так и электрическим полями смещения. В соответствии с этим перестройку резонансных частот разделяют на магнитную и электрическую.

Магнитная перестройка реализуется за счет вариации магнитной восприимчивости феррита при изменении поля подмагничивания резонатора. Электрическая перестройка обеспечивается за счет уменьшения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя при приложении к нему электрического поля.

В работах [2,3] было показано, что электрическая перестройка наиболее эффективна в случае сильной связи КД и КФ-мод резонатора, когда его ферритовый и сегнетоэлектрический слои имеют одинаковые размеры в плоскости. Так, в работе [3] наблюдалась максимальная электрическая перестройка частоты КФ-моды на 260 МГц в области ее максимальной гибридации с КД-модой. При магнитной перестройке частота КФ-моды изменялась в интервале 4–6.5 GHz. Несмотря на сравнительную узкополосность электрическая перестройка является более быстрой и низкоэнергетичной по сравнению с магнитной [7,8]. Поэтому максимальное быстродействие феррит-сегнетоэлектрических резонаторов определяется скоростью электрической перестройки их резонансных частот.

Цель настоящей работы состояла в исследовании быстродействия СВЧ-резонатора на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик, а именно в исследовании скорости электрической перестройки его резонансных мод. Конструкция экспериментального макета резонатора схематически показана на рис. 1. Ферритовый слой резонатора 1 представлял собой пленочный образец длиной и шириной по 1 мм, вырезанный из монокристаллической пленки железо-иттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) толщиной $7.5 \mu m$ с намагниченностью насыщения 1800 G. Пленка была выращена методом жидкофазной эпитаксии на подложке 2 галлий-гадолиниевый граната $Ga_3Gd_5O_{12}$ (GGG) толщиной 0.5 mm. Она имела свободные поверхностные спины. Параметр диссипации (ширина кривой ферромагнитного резонанса) $2\Delta H$ составлял 0.6 Oe на частоте 5 GHz. Измерение ΔH , а также контроль качества пленок осуществлялись методом „магнитной ямы“ [9].

В качестве сегнетоэлектрического слоя резонатора 3 использовался керамический образец титаната бария-стронция состава $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ (BST) толщиной 0.5, длиной 1.15 и шириной 1 mm. Тангенс угла диэлектрических потерь BST на частоте 5 GHz составлял

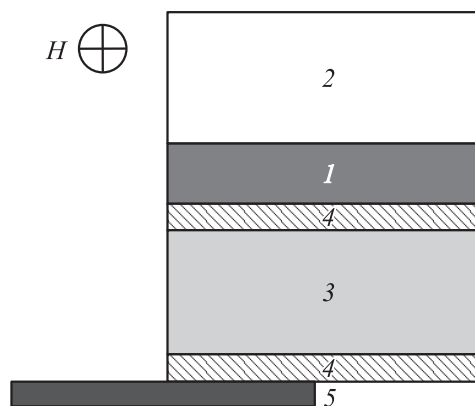


Рис. 1. Конструкция композитного резонатора YIG-BST.

около 10^{-2} . Керамика BST находилась в параэлектрической фазе. Она имела изотропную (относительную) диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 2947$ при комнатной температуре. На обе стороны образца были напылены хромовые электроды 4 толщиной около 20 nm, которые использовались для приложения электрического напряжения U , создававшего поле смещения E . Заметим, что толщина электродов была много меньше величины скин-слоя для СВЧ электромагнитного поля в исследуемом диапазоне частот. Это обуславливало возможность гибридизации квазидиэлектрических и квазиферромагнитных мод слоистого резонатора YIG-BST.

Гибридные электромагнитные спиновые СВЧ-колебания в резонаторе возбуждали с помощью микрополоскового преобразователя 5 шириной 0.5 и длиной 3 mm, изготовленного методом фотолитографии на поликорковой подложке толщиной 0.5 mm. Один конец преобразователя был соединен со стандартной микрополосковой линией с волновым сопротивлением 50Ω , а другой конец был закорочен. Резонатор помещался в однородное магнитное поле H электромагнита, направленное по касательной к плоскости YIG-BST структуры вдоль преобразователя.

Измерения характеристик резонатора YIG-BST проводились в статическом и динамическом режимах. Затем по полученным данным рассчитывалась скорость электрической перестройки мод резонатора YIG-BST.

Рассмотрим вначале результаты измерений, выполненных в статическом режиме. На рис. 2 приведены основные результаты этих измерений. Магнитная перестройка резонансных частот представлена на рис. 2, *a*. Частоты высокочастотной моды обозначены квадратиками, а низкочастотной — треугольниками. Видно, что наибольшая гибридизация мод наблюдалась при значении магнитного поля $H = 1033$ Oe. На рис. 2, *b* показаны зависимости электрической перестройки резонансных частот Δf от H при приложении напряжения $U = 500$ V. Как и ожидалось, частота КФ-моды эффективно перестраивалась электрическим полем в области ее наибольшей гибридизации с КД-модой. Сплошными кривыми на рис. 2, *a* и *b* показаны результаты расчета характеристик исследуемого композитного резонатора по теории, изложенной в [2]. Отметим, что подгоночных параметров при этом не использовалось. Как видно из рисунка, результаты измерений находятся в хорошем соответствии с теорией.

Нами также были проведены измерения характеристик перестройки образцов YIG и BST по отдельности. Результаты этих измерений с высокой точностью совпадали с теоретическими зависимостями, показанными пунктиром на рис. 2, *a*. Кроме того, эти измерения показали электрическую перестройку резонансной частоты образца BST с 4779 до 5106 MHz (т.е. на 327 MHz) при приложении U до 500 V.

Рассмотрим теперь результаты измерений, выполненных в динамическом режиме. В динамическом режиме измерялся отклик резонатора на приложенное

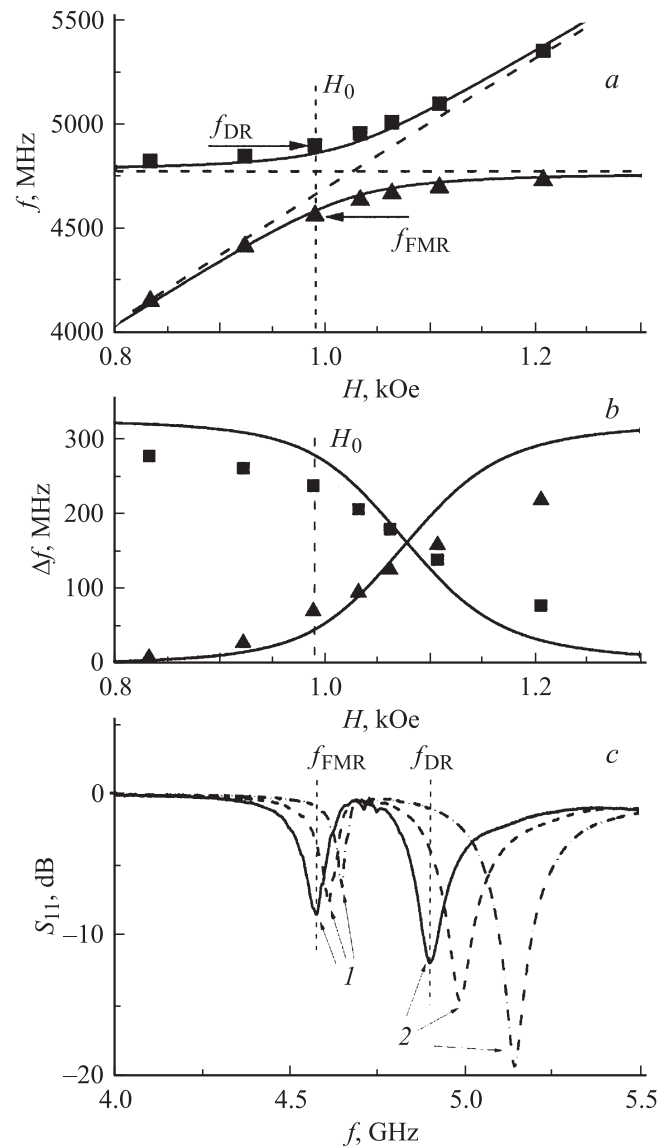


Рис. 2. Характеристики резонатора YIG-BST в статическом режиме: *a* — зависимость резонансных частот от магнитного поля, *b* — зависимость сдвига резонансных частот от магнитного поля H при приложении электрического напряжения $U = 500$ V (кривые — теория, значки — эксперимент). *c* — спектр отражения, измеренный при $H = 990$ Oe для разных значений U : 1 — КФ-мода; 2 — КД-мода; сплошная кривая — 0, пунктир — 300, штрихпунктир — 500 V.

импульсное напряжение U . Для этого на вход резонатора подавался непрерывный СВЧ-сигнал мощностью $P_{inc} = 100 \mu W$ на частотах КФ-моды f_{FMR} или КД-моды f_{DR} . Отраженный от резонатора сигнал детектировался и подавался на осциллограф. Детектор был предварительно откалиброван. На электроды пластины BST подавалось напряжение в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов амплитудой $U = 500$ V. Длительность переднего и заднего фронтов импульсов составляла 15 ns.

Для исследования характеристик феррит-сегнетоэлектрического резонатора в динамическом режиме было выбрано значение магнитного поля $H_0 = 990$ Ое. Типичные спектры отражения $S_{11}(f)$ резонатора, полученные для $H_0 = 990$ Ое при разных значениях U , показаны на рис. 2, с. Из графиков видно, что при таком значении поля гибридизация мод была эффективной, а спектр колебаний имел простой вид. Он состоял из КФ-моды низшего типа с частотой $f_{\text{FMR}} = 4575$ МГц и КД-моды низшего типа с частотой $f_{\text{DR}} = 4903$ МГц. Отметим, что при $H > 1090$ Ое частоты КФ-мод лежали между первой и второй КД-модами, поэтому спектр колебаний резонатора YIG-BST усложнялся. В нем начинали появляться КФ-моды высших типов.

Типичная осциллограмма отраженного от резонатора сигнала для КФ-моды приведена на рис. 3, а. При подаче импульса напряжения резонансная частота этой моды смещалась, а отраженная при этом от резонатора мощность возрастала. По времени возрастания мощности определялась скорость изменения резонансной частоты. Делалось это следующим образом. По результатам измерений, приведенным на рис. 2, с, определяли зависимость отраженной мощности P_{ref} на частоте f_{FMR} от сдвига резонансной частоты КФ-моды. Полученная зависимость $P_{\text{ref}}(\Delta f)$ показана на рис. 3, б. Далее из сопоставления зависимостей $P_{\text{ref}}(\Delta f)$ и $P_{\text{ref}}(t)$ получали зависимость сдвига резонансной частоты КФ-моды резонатора YIG-BST от времени. Она показана на рис. 3, с точками. Аналогичным образом были получены зависимости для КД-моды резонатора YIG-BST, а также для негибридизированной диэлектрической моды пластины BST. Эти зависимости приведены на рис. 3, с соответственно треугольниками и квадратами.

По наклону зависимостей, изображенных на рис. 3, с, была определена скорость перестройки частот различных мод резонатора. Наибольшей скоростью перестройки $4.2 \text{ МГц}/\mu\text{s}$ обладала негибридизированная диэлектрическая мода пластины BST. Скорость перестройки гибридизированных КД- и КФ-мод равнялась соответственно 3.3 и $1.3 \text{ МГц}/\mu\text{s}$.

Полученный результат можно объяснить следующим образом. Скорость электрической перестройки резонансных частот для исследованной конструкции резонатора определяется двумя факторами. Первым фактором является величина сдвига частоты КД- и КФ-моды, которая определяется степенью их гибридизации. Из результатов статических измерений, показанных на рис. 2, б, видно, что при приложении напряжения максимальным сдвигом частоты обладает негибридизированная диэлектрическая мода; при этом частота негибридизированной ферромагнитной моды не изменяется. Гибридизация мод приводит к уменьшению сдвига частоты КД-моды и к появлению сдвига частоты КФ-моды. В соответствии с этим сдвиг частоты КФ-моды всегда либо меньше, либо равен сдвигу частоты КД-моды.

Вторым фактором, определявшим быстродействие резонатора, являлось время накопления и стекания элек-

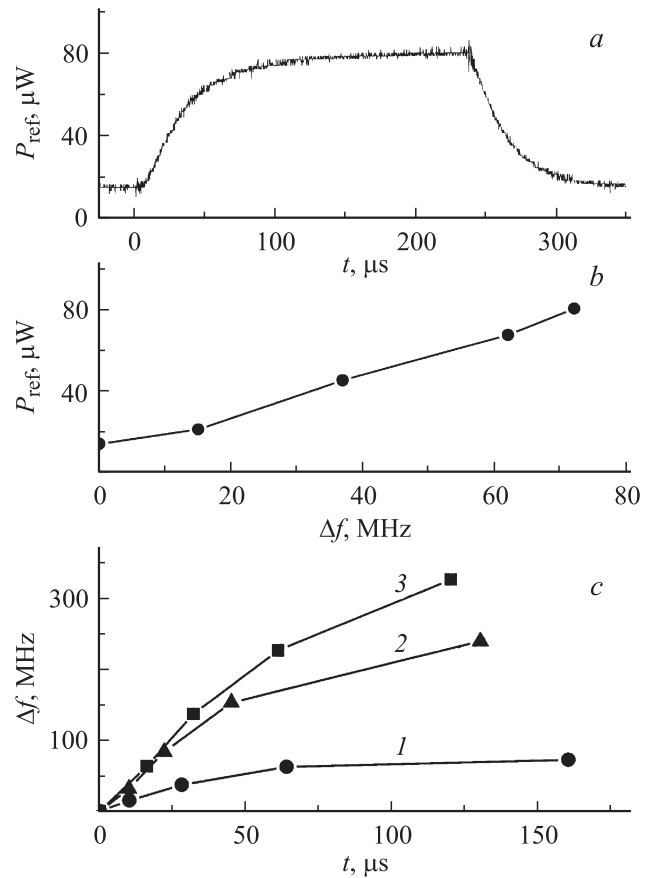


Рис. 3. а — осциллограмма СВЧ-сигнала, отраженного от резонатора YIG-BST, на частоте $f_{\text{FMR}} = 4575$ МГц при приложении импульса электрического напряжения. б — зависимость отраженной мощности P_{ref} на частоте f_{FMR} от сдвига резонансной частоты КФ-моды. в — зависимость сдвига резонансной частоты от времени для КФ-моды (1), КД-моды (2) и негибридизированной диэлектрической моды в образце BST (3).

трического заряда с электродов BST. Это время легко оценить, если представить пластину BST с электродами в виде последовательной эквивалентной RC цепи. В исследованной экспериментальной конструкции сопротивление электродов R составляло приблизительно $500\text{--}800 \text{ к}\Omega$, а емкость пластины C составляла около 55 пФ . Время переходного процесса $\tau = RC$ было равно $30\text{--}40 \mu\text{s}$. На практике принято считать, что переходный процесс заканчивается за время $t = (3\text{--}5)\tau$. Из осциллограммы на рис. 3, а видно, что время перехода резонатора из одного установившегося состояния в другое составляло порядка $100\text{--}200 \mu\text{s}$. Это хорошо согласуется с численной оценкой. Отметим, что для получения подобного быстродействия за счет магнитной перестройки необходимо изменять магнитное поле смещения со скоростью порядка $10^6 \text{ Ое}/\text{s}$, что достаточно трудно реализовать на практике.

Отметим, что известен еще один фактор, который может влиять на быстродействие феррит-сегнетоэлектрических резонаторов, а именно образование объ-

емного заряда в сегнетоэлектрике [10]. Однако в нашей работе он не наблюдался. По-видимому, этот фактор не являлся определяющим для исследованного резонатора.

Таким образом, в работе экспериментально показано, что композитные резонаторы YIG-BST обладают широкополосной магнитной перестройкой, а также быстрой и низкоэнергетичной электрической перестройкой резонансных частот. Для исследованной планарной конструкции феррит-сегнетоэлектрического резонатора в области сильной гибридизации квазиферромагнитной и квазидиэлектрической мод скорость электрической перестройки составляла $1.3\text{--}3.3\text{ МГц}/\mu\text{с}$. Сравнение с данными по быстрдействию планарных сегнетоэлектрических конденсаторов [8] говорит о том, что эти значения могут быть увеличены. В качестве возможных вариантов увеличения скорости электрической перестройки резонаторов YIG-BST можно предложить оптимизацию толщины электродов BST.

Авторы приносят благодарность Б.А. Калиникосу за внимание к работе и полезные замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 08-02-00959), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проекты НШ-2124.2008.2 и МК-2804.2008.8) и Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/1617). В Oakland University работа выполнялась при поддержке ARO.

Список литературы

- [1] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. N 3. P. 031 101 (1–35).
- [2] Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G., Slavin A.N., Semenov A.A., Karmanenko S.F., Kalinikos B.A., Mantese J.V., Ramer R. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. N 9. P. 093 905 (1–7).
- [3] Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Tiberkevich V.S., Slavin A.N., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. N 6. P. 063 908 (1–3).
- [4] Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. N 19. P. 193 512 (1–3).
- [5] Song Y.-Y., Das J., Krivosik P., Mo N., Patton C.E. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. N 18. P. 182 505 (1–3).
- [6] Белявский П.Ю., Никитин А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А. // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 7. С. 1446–1447.
- [7] Вендик О.Г. // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 7. С. 1441–1445.
- [8] Козырев А.Б., Солдатенков О.И., Иванов А.В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 19. С. 19–25.
- [9] Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Колодин П.А., Панчурин И.П. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 10 (382). С. 53–55.
- [10] Козырев А.Б., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г., Разумов С.В., Тумакин А.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 13. С. 1–7.