

НЕЛИНЕЙНЫЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ФЕРРИТ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С МАГНИТНОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

УДК 537.62

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

Фетисов Ю. К., Сринивазан Г.*

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет), 119454 Москва, Россия

* Оклэндский университет, Рочестер, Мичиган, 48309 США

Описан и исследован сверхвысокочастотный резонатор, основанный на явлении ферромагнитного резонанса и содержащий механически связанные ферромагнитную пленку железиттриевого граната и пьезоэлектрическую пластину цирконата-титаната свинца. Резонатор перестраивался в широком диапазоне частот 2,8–8,5 ГГц магнитным полем H и в узком диапазоне частот ~ 80 МГц электрическим полем E . Частота резонатора нелинейно зависит от поля E и повторяет зависимость пьезодеформации от E . При мощностях возбуждающего сигнала более 1 мВт в резонаторе наблюдается бистабильность дисперсионного типа. Резонатор можно переключать между стабильными состояниями с помощью слабых магнитного и электрического полей за время порядка 1 мкс.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные плёночные структуры, содержащие механически связанные слои феррита и пьезоэлектрика, интенсивно исследуются в последнее время в связи с перспективой создания на их основе сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств, перестраиваемых по частоте как магнитным, так и электрическим полем [1, 2]. Резонансная частота f композитной структуры определяется частотой ферромагнитного резонанса (ФМР) ферритового слоя и ее можно перестраивать в широком диапазоне, изменяя внешнее магнитное поле H . Кроме того, резонансную частоту структуры можно перестра-

ивать в узком диапазоне частот, прикладывая электрическое поле E к слою пьезоэлектрика. Электрическая перестройка частоты возможна благодаря пьезоэффекту и магнитострикции в компонентах структуры и механической связи между слоями [3]. Поле E вызывает растяжение или сжатие слоя пьезоэлектрика из-за обратного пьезоэффекта, эта деформация передается ферритовому слою. Вследствие эффекта Виллари (обратной магнитострикции) изменяется эффективное внутреннее магнитное поле в феррите, что и приводит к сдвигу частоты ФМР. Электрическая перестройка частоты ФМР композитной структуры потенциально более быстрая и требует меньших затрат энергии, чем магнитная, что важно для применений. Среди первых устройств на основе композитных структур были созданы и исследованы СВЧ резонатор [4], фазовращатель [5] и линии задержки [6].

В качестве магнитного слоя структур для диапазона частот до 20 ГГц обычно используют монокристаллические плёнки железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной 1–100 μm , обладающие рекордно малыми магнитными потерями, либо монокристаллы литиевого феррита, а в структурах для диапазона частот до 50 ГГц – монокристаллы бариевого гексаферрита с большой одноосной магнитной анизотропией. В качестве пьезоэлектрика применяют керамический цирконат-титанат свинца (ЦТС), либо магнийниобат-титанат свинца (PMN-PN), которые имеют высокие значения пьезокоэффициентов и малые диэлектрические потери в СВЧ диапазоне.

Для планарного ЖИГ/ЦТС резонатора, частота ФМР которого перестраивалась касательным магнитным полем в диапазоне 3–9 ГГц, достигнута электрическая перестройка частоты на $\delta f = 18$ МГц при приложении к пьезоэлектрику поля 10 кВ/см [4]. Для ЖИГ/PMN-РТ резонатора с частотой в диапазоне 2–18 ГГц наибольшая величина электрической перестройки составила 40 МГц при приложении к PMN-РТ слою поля 8 кВ/см [2, 7]. В структуре литиевый феррит/ЦТС на частоте резонанса 9,3 ГГц получена перестройка магнитного поля ФМР на ~ 20 Ое с помощью электрического поля 85 кВ/см [8]. В структуре гексаферрит/ЦТС с резонансной частотой 44–50 ГГц достигнута электрическая перестройка частоты ФМР на ~ 8 МГц при поле в пьезоэлектрике 10 кВ/см [9].

Для большинства исследованных композитных структур величина δf зависит от поля E практически линейно и δf меняет знак при инверсии направления поля. Нелинейную зависимость частоты ЖИГ/ЦТС резонатора от поля E наблюдали только в работе [10]. Это свидетельствует о том, что магнитный и пьезоэлектрический слои работают на линейных участках характеристик, далёких от насыщения, и о возможности увеличения электрической перестройкой частоты структур. При изгибной деформации свободной плёнки ЖИГ, близкой к её разрушению, сдвиг частоты ФМР может достигать значений $\delta f \sim 200$ МГц. В композитных структурах, где плёнку деформирует пьезоэлектрический слой, реализовать перестройку частоты ФМР предельной величины пока не удалось.

В этой связи представляет интерес исследование электрической перестройки частоты ФМР композитных структур при больших E , когда начинают проявляться нелинейности пьезоэлектрических и магнитострикционных характеристик слоёв структуры. Кроме того, при больших уровнях возбуждающей СВЧ мощности в ферритовых структурах могут наблюдаться нелинейные явления [11], что также может влиять на свойства резонатора.

Изучению нелинейных характеристик композитных феррит-пьезоэлектрических резонаторов при больших значениях управляющего электрического поля и высоких уровнях возбуждающей мощности и посвящена настоящая работа.

1. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА

В измерениях использовали резонатор на основе композитной двухслойной структуры, конструкция которого схематически показана на рис. 1. Резонатор содержал плёнку ЖИГ толщиной 15 $\mu\text{м}$ с размерами в плоскости 1,0 $\times$ 2,2 мм^2 , выращенную методом жидкофазной эпитаксии на подложке из галлийгадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 0,2 мм. Плёнка имела намаг-

нитненность насыщения $4\pi M = 1750$ Гс и ширину линии однородного ФМР $\Delta H = 0,6$ Э, измеренную на частоте 5 ГГц. Пластина ЦТС имела размеры 0,5 $\times$ 4,0 $\times$ 4,0 мм^3 , на её поверхности были нанесены электроды из Ag толщиной по 5 $\mu\text{м}$. Пластина ЦТС была электрически поляризована по нормали к плоскости путём приложения к электродам напряжения 1 кВ в течение 3 часов при температуре 100° С. Пленка ЖИГ была приклеена к поверхности ЦТС с помощью клея «Loctite 499». Для возбуждения резонатора использовали микрополосковый преобразователь шириной 50 $\mu\text{м}$ и длиной 4 мм, изготовленный на подложке из поликора толщиной 0,5 мм методами фотолитографии. Один конец преобразователя был закорочен, а другой соединён с отрезком стандартной 50-ти омной линии. Резонатор накладывали на преобразователь так, чтобы длинная сторона плёнки ЖИГ была параллельна преобразователю. Толщина ГГГ подложки 0,2 мм задавала расстояние от плёнки ЖИГ до микрополоска и обеспечивала оптимальное согласование микрополоска с резонатором. Конструкцию помещали между полюсами электромагнита, который создавал поле $H = 0\text{--}5$ кЭ, направленное параллельно или перпендикулярно к плоскости структуры. При измерениях величину H всегда выбирали таким образом, чтобы плёнка ЖИГ была намагничена до насыщения. Электрическое поле в пластине ЦТС величиной до $E = 20$ кВ/см создавали, прикладывая к электродам пластины постоянное напряжение величиной до $U = 1000$ В.

Частотные характеристики резонатора измеряли при комнатной температуре с помощью панорамного измерителя Agilent E5071B в диапазоне частот $f = 2,0\text{--}8,5$ ГГц. При этом на преоб-

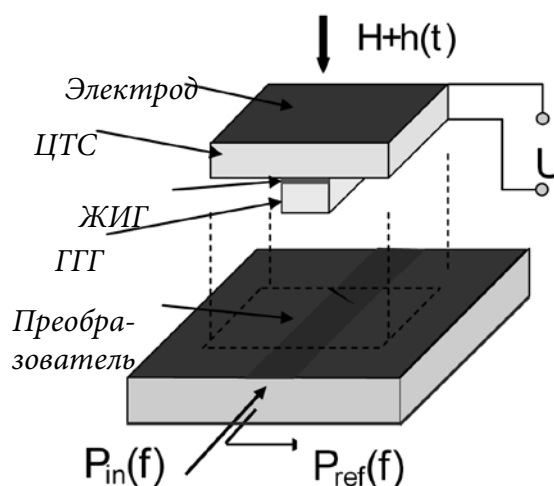


Рис. 1. Конструкция ЖИГ/ЦТС резонатора с микрополосковым преобразователем.

разователь подавали сигнал мощностью P_{in} менее 1 мВт, чтобы избежать нагрева плёнки ЖИГ в результате поглощения СВЧ мощности в момент резонанса. Регистрировали зависимость отражённой от структуры мощности P_{ref} при изменении частоты сигнала f для различных значений полей H и E , приложенных к структуре. Электрическую перестройку частоты резонатора проводили путем медленного изменения E по циклическому закону с максимальной амплитудой до 20 кВ/см. При исследовании динамических характеристик резонатора магнитное и электрическое поля модулировали с частотой $F = 0-200$ кГц и амплитудами $h = 5$ Э и $E = 1$ кВ/см, соответственно.

2. ЛИНЕЙНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРА

На рис. 2 в качестве примера показан измеренный спектр отражения описанного резонатора $S_{11}(f) = 20 \cdot \log[P_{ref}(f)/P_{in}(f)]$, намагниченного внешним полем $H = 1,12$ кЭ параллельно к плоскости структуры. Спектр отражения содержал один пик с центральной частотой $f_0 = 5$ ГГц, шириной на полувысоте $\Delta f = 3,4$ МГц и глубиной -16 дБ. Потери вне резонанса составляли ~ 2 дБ и были обусловлены поглощением в диэлектриках.

Пик поглощения на рис. 2 возникает из-за возбуждения ФМР в плёнке феррита. Частота ФМР для неограниченной плёнки, намагниченной касательно к плоскости, дается выражением

$$f = \gamma \left| H(H + 4\pi M) \right|^{1/2}, \quad (1)$$

а для плёнки, намагниченной перпендикулярно к плоскости, выражением

$$f = \gamma \left| H_{ef} - 4\pi M \right|. \quad (2)$$

Здесь обозначено: $\gamma = 2,8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение, $H_{ef} = H + H_a$ – эффективное внутреннее поле в феррите, H – внешнее магнитное поле, $4\pi M$ – намагненность насыщения феррита. Поле магнитной анизотропии H_a , конечные размеры плёнки и металлические экраны вблизи поверхности феррита приводят к незначительному отклонению частоты резонанса от значения, даваемого формулами (1, 2).

Рис. 2 демонстрирует также электрическую перестройку частоты ЖИГ/ЦТС резонатора. При приложении к слою ЦТС поля $E = 5$ кВ/см пик поглощения смещался в область более высоких частот на $\delta f = f - f_0 = 8$ МГц при одной полярности поля и смещался вниз по частоте на ~ 9 МГц при инверсии направления поля E путём изменения полярности приложенного к пластине напряже-

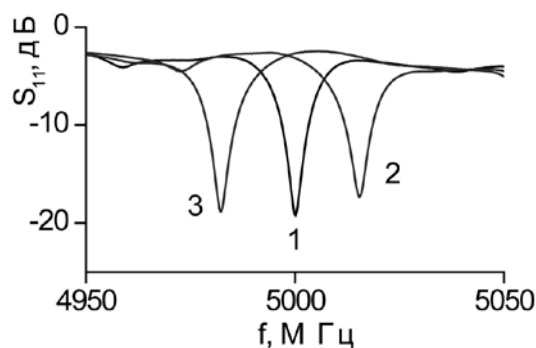


Рис. 2. Спектры отражения ЖИГ/ЦТС резонатора в отсутствие электрического поля (кривая 1) и при $E = \pm 8$ кВ/см (кривые 2 и 3).

ния U . Как видно из рис. 2, при электрической перестройке частоты форма линии поглощения изменялась незначительно.

Рис. 3 демонстрирует магнитную перестройку частоты ЖИГ/ЦТС резонатора. При изменении поля H от 0,4 кЭ до 2,4 кЭ частота резонатора перестраивалась в диапазоне $f = 2,8-8,5$ ГГц, что хорошо совпадает с расчётом по формулам (1, 2).

На рис. 4 показана измеренная зависимость сдвига δf частоты резонатора от электрического поля при малой амплитуде поля $E < 2$ кВ/см. Стрелки на рисунке указывают направление изменения поля. Перед измерениями несколько раз меняли направление приложенного к PZT пластине поля E с одновременным плавным уменьше-

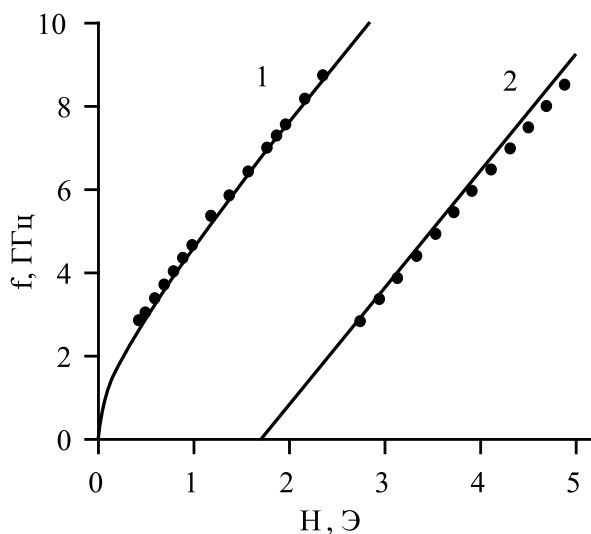


Рис. 3. Зависимость частоты ЖИГ/ЦТС резонатора от поля H при намагничивании структуры касательно (1) и перпендикулярно (2) к плоскости. Точки – измерение, линии – расчёт.

нием его амплитуды до нуля. В процессе измерений при каждом фиксированном значении E проводили выдержку в течение одной минуты и потом фиксировали величину сдвига частоты резонанса δf .

Из рис. 4 видно, что при увеличении E от нуля до 2 кВ/см в положительном направлении сдвиг частоты растёт практически линейно с коэффициентом $\alpha_1 = 1$ МГц/(В/см). При последующем уменьшении E до нуля сдвиг частоты уменьшается практически по той же кривой, что и возрастал, и обращается в ноль при $E = 0$. Затем, при смене направления и увеличении E сдвиг частоты меняет знак и увеличивается по модулю примерно по линейному закону, но с большим коэффициентом $\alpha_2 = 1,1$ МГц/(В/см). В результате, после изменения поля от $E = -2$ кВ/см до $E = 0$ сдвиг частоты не обращается в ноль. Таким образом, формируется зависимость $\delta f(E)$ гистерезисного типа, смещённая вниз относительно нуля на вертикальной оси. Измерения при меньших амплитудах поля E показали, что петля гистерезиса сужается с уменьшением амплитуды поля и коэффициент перестройки частоты также незначительно падает.

Зависимости, аналогичные показанной на рис. 4, получены для нескольких частот при перестройке центральной частоты резонатора f_0 магнитным полем. Величина коэффициента α при этом оставалась примерно постоянной.

3. НЕЛИНЕЙНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА РЕЗОНАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

На рис. 5 приведена измеренная зависимость сдвига δf частоты резонатора от электрического

поля при большой амплитуде поля $E = 18$ кВ/см. В этом случае при увеличении E в положительном направлении и его последующем уменьшении до нуля, как и ранее, формировалась двухзначная зависимость. При смене направления поля и увеличении E сдвиг частоты менял знак и увеличивался по модулю. Однако, при пороговом значении $E_1 = -10$ кВ/см частота резонанса скачкообразно изменялась δf от -30 МГц до $\sim +10$ МГц. Время перехода частоты из начального состояния в конечное до установления конечного значения δf составляло ~ 10 – 100 сек. Время перехода уменьшалось при возрастании превышения E над порогом. Затем, при дальнейшем увеличении E положительный сдвиг частоты возрастал и достигал максимального значения $\delta f = 40$ МГц. При последующем уменьшении E до нуля и возрастании напряжённости поля в положительном направлении процесс повторялся. Скачкообразное изменение сдвига частоты δf от -30 МГц до $\sim +10$ МГц происходило при пороговом поле $E_2 = +10$ кВ/см. В результате формировалась перестроечная характеристика типа «бабочка», приведённая на рис. 5. Характеристика устойчиво воспроизводилась при многократном циклическом изменении поля E , приложенного к PZT слою.

Для объяснения эффекта рассмотрим более подробно причину сдвига частоты ФМР в композитной структуре. Как отмечалось, электрическое поле E приводит к деформации S пьезоэлектрика, эта деформация вызывает изменение эффективного поля H_{ef} в плёнке феррита, что и даёт сдвиг частоты ФМР. Деформация пьезоэлектрика в линейном приближении пропорциональна приложенному полю $S = d_{13} E$, где d_{13} – пьезомодуль ЦТС. Возникающее в плёнке ЖИГ эффективное поле анизотропии в первом приближении пропорци-

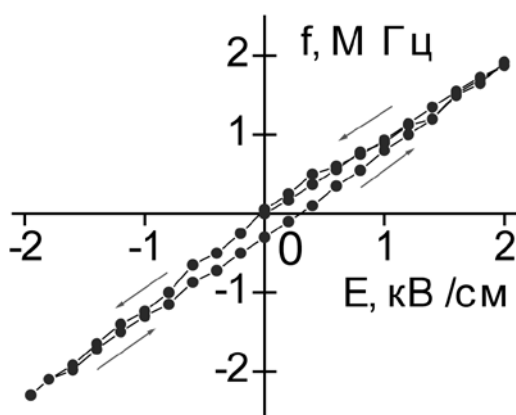


Рис. 4. Зависимость сдвига частоты резонатора от E при малой амплитуде поля.

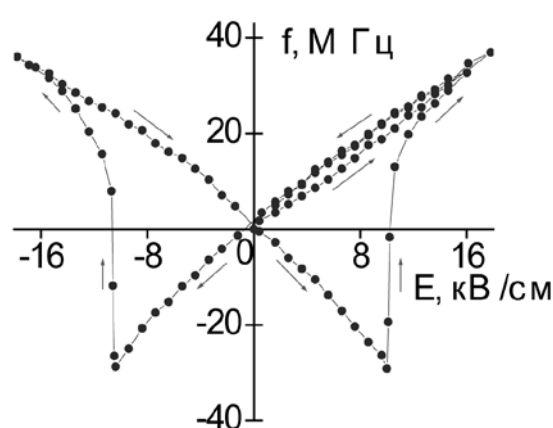


Рис. 5. Зависимость сдвига частоты резонатора от E при большой амплитуде поля.

онально деформации [9] $H_a = 3(\lambda_{11} Y/M)S$, где λ_{11} – магнитострикция насыщения ЖИГ, Y – модуль Юнга ЖИГ, M – намагниченность ЖИГ. Поэтому теория [6] предсказывает линейную зависимость сдвига частоты ФМР от приложенного поля $\delta f = A\lambda_{11}d_{13} \cdot E$, где A – коэффициент, величина которого зависит от механических характеристик, соотношения толщин слоёв структуры и степени связи между слоями. Оценка по приведённой формуле при значениях параметров, отвечающих эксперименту, даёт для $E = 2$ кВ/см значение $\delta f = 1,3$ МГц, что хорошо совпадает с данными рис.4.

Известно, что при увеличении поля E зависимость деформации S большинства пьезоэлектриков от E становится существенно нелинейной [12]. При больших деформациях нелинейный вид может иметь и зависимость H_a от S . Кроме того, при больших H_a , сравнимых по величине с внешним полем H или $4\pi M$ феррита, вклад в нелинейность сдвига частоты даёт сама формула (1).

Для выяснения вклада каждой нелинейности в конечный результат была измерена зависимость деформации ЦТС пластинки от поля E . Измерения проводили с помощью тензодатчика, наклеенного на поверхность ЦТС пластинки. Перед измерениями направление приложенного в ЦТС поля несколько раз изменяли с одновременным уменьшением E до нуля. На рис. 6 приведена зависимость $S(E)$, снятая при циклическом изменении поля с амплитудой $E = 18$ кВ/см. Стрелки на рисунке указывают направление изменения поля.

Из рис. 6 видно, что только на начальном участке $0 < E < 2$ кВ/см зависимость имеет линейный вид. При большой амплитуде изменения E зависимость $S(E)$ приобретает вид «бабочки», симметричной относительно вертикальной оси. Скачкообразное изменение знака S происходило при тех же пороговых значениях поля $|E| = 10$ кВ/см, что и скачкообразное изменение сдвига частоты ФМР резонанса. В области полей вблизи скачка деформация меняла знак и плавно релаксировала от начального до конечного значения за десятки секунд. Видно, что зависимость $S(E)$ на рис. 6 качественно повторяет форму зависимости $\delta f(E)$, показанную на рис. 5.

Из формулы (1) следует, что максимальному сдвигу частоты ФМР структуры $\delta f = 40$ МГц соответствует поле наведённой анизотропии $H_a = 7$ Э, много меньшее внешнего приложенного поля $H = 1,15$ кЭ и намагниченности ЖИГ $4\pi M = 1,75$ кГс. Поэтому вклад нелинейности обратной магнитострикции и нелинейности зависимости (1) в нелинейность зависимости сдвига частоты от приложенного поля E , по-видимому, очень мал. Тем более, что нелинейная магнитострикция не может вызвать изменение знака сдвига частоты ФМР в намагничённой до насыщения пленке ЖИГ.

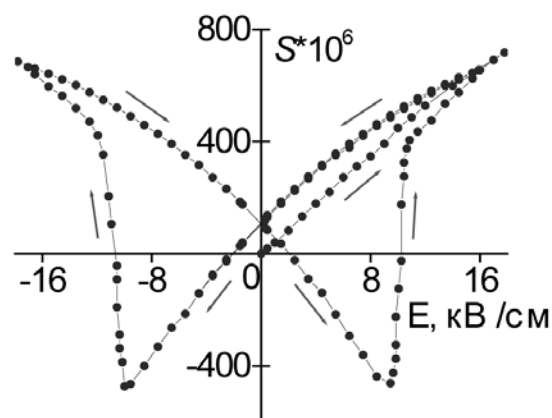


Рис. 6. Зависимость деформации ЦТС слоя от E при циклическом изменении поля с амплитудой 18 кВ/см.

Приведённые данные показывают, что вид зависимости $\delta f(E)$ сдвига частоты ФМР композитной ЖИГ/ЦТС структуры при больших амплитудах поля E , приложенного к слою ЦТС, целиком обусловлен видом зависимости $S(E)$ деформации ЦТС от поля. Зависимость $S(E)$ приводит к нелинейному закону перестройки частоты электрическим полем, двухзначной зависимости величины перестройки частоты от поля и ограничению диапазона перестройки частоты при одном из направлений приложенного поля.

4. БИСТАБИЛЬНОСТЬ В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЗОНАТОРЕ

Исследование нелинейных характеристик ЖИГ/ЦТС резонатора проводили при намагничивании структуры полем $H = 3,27$ кЭ перпендикулярно к плоскости и мощностях возбуждающего СВЧ сигнала до $P_{in} = 20$ мВт. Рис. 7 демонстрирует переход резонатора от линейного режима к бистабильному режиму работы при увеличении мощности.

При $P_{in} < 10$ мВт колебания в резонаторе носили линейный характер. Частота низшего типа колебаний составляла $f_0 = 4,4744$ ГГц для $H = 3,27$ кЭ и перестраивалась в диапазоне 2–8,5 ГГц при изменении напряженности поля H с коэффициентом $\gamma = 2,8$ МГц/Э. Линия поглощения имела симметричный лоренцевский вид и ее форма не искажалась при изменении уровня мощности (кривая 1 на рис. 7). С увеличением P_{in} от 10 мВт до 1 мВт линия поглощения сдвигалась в область более высоких частот и ее форма искажалась: крутизна высокочастотного склона линии увеличивалась, а низкочастотного – уменьшалась. При $P_{in} \approx 1$ мВт крутизна высокочастотного склона линии

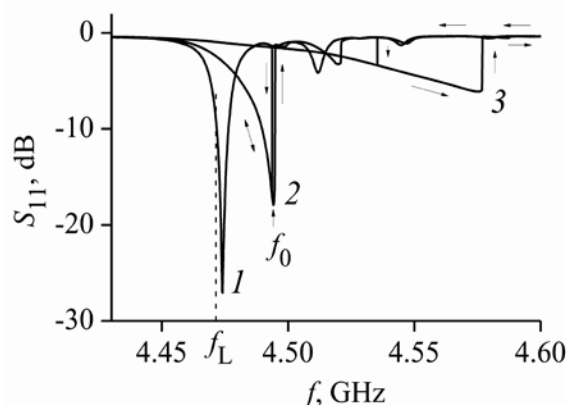


Рис. 7. Спектры отражения ЖИГ/ЦТС резонатора при уровнях мощности: 1 – 20 мВт, 2 – 2 мВт, 3 – 16 мВт. Стрелками показано направление изменения частоты.

на характеристике $S_{11}(f)$ становилась бесконечной (кривая 2 на рис. 7) и на частоте f_1 , отвечающей максимуму поглощения, наблюдали скачок мощности. При $P_{in} > 1$ мВт частота f_1 сдвигалась в область более высоких частот и на кривой $S_{11}(f)$ появлялась область бистабильности. В интервале частот от f_1 до f_2 (кривая 3 на рис. 7) при циклическом сканировании частоты снизу вверх и сверху вниз коэффициент отражения СВЧ мощности от резонатора S_{11} имел разные значения. На частоте f_1 отраженная от резонатора мощность P_{ref} скачкообразно возрастала, а на частоте f_2 – падала. Такое поведение ЖИГ/ЦТС резонатора при увеличении уровня СВЧ мощности хорошо описывается теорией дисперсионной бистабильности [11].

5. ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ БИСТАБИЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Динамику переключения бистабильного ЖИГ/ЦТС резонатора электрическим и магнитным полями [13] исследовали при мощности возбуждающего СВЧ сигнала $P_{in} = 2$ мВт, когда петля бистабильности была достаточно узкая, ее ширина по частоте составляла $f_1 - f_2 = 2$ МГц (кривая 2 на рис. 7). На резонатор подавали непрерывный СВЧ сигнал с частотой $f = 4494$ МГц, лежащей внутри области бистабильности, к электродам ЦТС пластины прикладывали гармоническое напряжение с амплитудой 20 В (создающее поле с амплитудой $E = 1$ кВ/см) и частотой 200 Гц и регистрировали временную зависимость отраженной от резонатора мощности $P_{ref}(t)$.

На рис. 8 показаны осциллограммы напряжения $U(t)$ и мощности $P_{ref}(t)$, демонстрирующие переключение резонатора между устойчивыми состояниями. Глубина модуляции отраженной мощ-

ности достигала $P_{max}/P_{min} \sim 40$, что соответствует изменению коэффициента отражения $\Delta S_{11} = 16$ дБ на кривой 2 рис. 7 вблизи частоты f_1 . Установлено, что вид зависимости $P_{ref}(t)$ определяется формой петли СВЧ бистабильности и законом модуляции напряжения. Если резонатор первоначально находится в состоянии с высоким коэффициентом отражения, то при увеличении U область бистабильности смещается вверх по частоте (в соответствии с характеристикой рис. 7) и резонатор переключается из состояния с высокой отраженной мощностью P_{ref} в состояние с малой P_{ref} , формируя задний фронт импульсов. При отрицательных значениях U петля бистабильности смещается вниз по частоте и резонатор переключается из состояния с малой P_{ref} в состояние с высокой P_{ref} , формируя передний фронт импульса.

Зависимости $P_{ref}(t)$, аналогичные показанным на рис. 8b, были получены при тех же значениях параметров путем гармонической модуляции магнитного поля с амплитудой $h \sim 1$ Э и частотой 200 Гц. Такая амплитуда модуляции поля соответствует сдвигу петли бистабильности резонатора на величину $\sim 2,8$ МГц, также превышающей ширину петли.

На рис. 9 в более крупном масштабе показаны фронты импульсов $P_{ref}(t)$ при переключении бистабильного резонатора с помощью гармонических полей E или h . Длительность переднего и заднего фронтов, измеренная по уровням 0,1 и 0,9 от пиковой мощности, составляли $\sim 1,7$ мс и $\sim 1,2$ мс, соответственно. Времена переключения резонатора практически не изменялись при приложении к пластине ЦТС напряжения $U(t)$ в форме меандра с той же амплитудой 10 В и частотой 200 Гц, но с длительностью фронтов менее 1 мс.

Это свидетельствует о том, что время переключения бистабильного резонатора между устойчи-

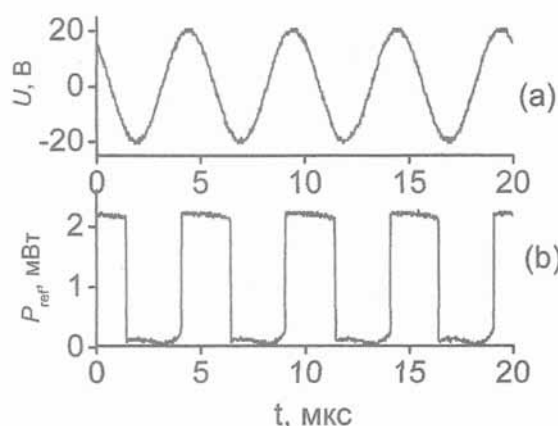


Рис. 8. Осциллограммы напряжения (a) и отраженной мощности (b) при переключении бистабильного резонатора.

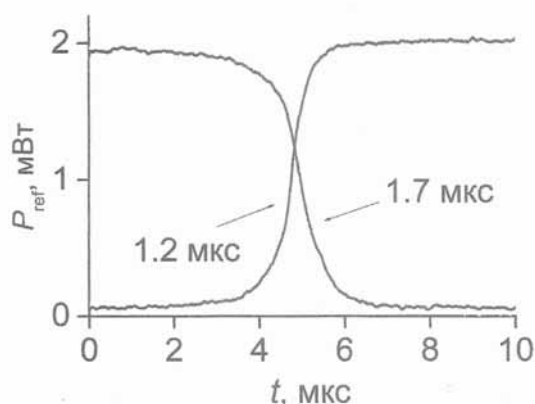


Рис. 9. Осциллограммы переднего и заднего фронтов импульсов при переключении бистабильного резонатора.

выми состояниями определяется нелинейными свойствами феррита, а не скоростью изменения полей. Измеренные времена соответствуют времени релаксации колебаний намагниченности в феррите $\tau = 1/(\gamma\Delta H) \approx 0,7 \mu\text{с}$ с шириной линии ФМР 0,5 Э. Отметим, что для изменения в ~ 40 раз за время $\sim 1 \mu\text{с}$ СВЧ мощности, отраженной от линейного ФМР резонатора с лоренцевской формой линии стандартным методом модуляции магнитного поля, необходима на порядок большая амплитуда h и скорость перестройки поля $\sim 10^7 \text{ Э/с}$, что сложно реализовать на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе экспериментально показано, что частоту ФМР композитной структуры плёнка ЖИГ-пластина ЦТС можно перестраивать на ~ 40 МГц, прикладывая к слою ЦТС электрическое поле E . При малых $E < 2 \text{ кВ/см}$ сдвиг частоты линейно зависит от поля и меняет знак при инверсии направления поля. С увеличением E сдвиг частоты ФМР начинает зависеть от поля нелинейно и также меняет знак при инверсии направления поля. В полях $E > 10 \text{ кВ/см}$ зависимость сдвига частоты от поля имеет вид «бабочки» с двумя скачкообразными изменениями знака сдвига вблизи порогового поля $E \sim 10 \text{ кВ/см}$. Продemonстрировано, что нелинейность электрической перестройки частоты ФМР в ЖИГ/ЦТС структуре при больших E целиком обусловлена видом нелинейной зависимости $S(E)$ деформации ЦТС от приложенного поля. Пьезоэлектрическая нелинейность ограничивает величину максимально достижимой перестройки частоты ФМР структуры. При уровнях возбуждающей мощности выше $\sim 1 \text{ мВт}$ ЖИГ/ЦТС резонатор переходит в нелинейный режим работы и в нем возник-

ает бистабильность дисперсионного типа. Внутри области частот бистабильности существуют два устойчивых состояния, отвечающие низкому или высокому уровню отраженной от резонатора СВЧ мощности. Прикладывая к структуре слабое магнитное ($< 1 \text{ Э}$) или слабое электрическое ($E < 1 \text{ кВ/см}$) поля, можно переключать резонатор между устойчивыми состояниями. Характерное время переключения бистабильного ЖИГ/ЦТС резонатора $\sim 1 \text{ мкс}$ определяется нелинейными свойствами феррита и существенно меньше времени перестройки резонатора в линейном режиме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект №2.1.1.6650), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-12439) и Национального научного фонда США

ЛИТЕРАТУРА

1. SRINIVASAN G., FETISOV YU.K. Ferrite-piezoelectric layered structures: microwave magnetoelectric effects and electrical field tunable devices // *Ferroelectrics*, 2006. v. 342. n9. p. 65–71.
2. SRINIVASAN G., FETISOV YU.K. Microwave magnetoelectric effects and signal processing devices // *Integrated Ferroelectrics*, 2006. v. 83. p. 1–10.
3. SHASTRY S., SRINIVASAN G., BICHURIN M.I. et al. Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate // *Phys. Rev.*, 2004, v. B70, paper 064416.
4. FETISOV YU.K., SRINIVASAN G. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator // *Appl. Phys. Lett.*, 2006. v. 88, n1, paper 143503.
5. FETISOV YU.K., SRINIVASAN G. Ferrite/ferroelectric microwave phase shifter: studies on electric field tunability // *Electronics Lett.*, 2005. v. 41, n19. P. 1066–1067.
6. FETISOV YU.K., SRINIVASAN G. Electrically tunable ferrite-ferroelectric delay lines // *Appl. Phys. Letters*, 2005. v. 87, n8, paper 103502.
7. USTINOV A.B., FETISOV YU.K., SRINIVASAN G. Microwave resonators based on single-crystal yttrium iron garnet and lead magnesium niobate – lead titanate layered structures // *J. Appl. Phys.*, 2008. v. 103, p. 063901.
8. SRINIVASAN G., HAYES R., BICHURIN M.I. // *Solid State Comm.*, 2003. v. 128. p. 261–266.
9. SRINIVASAN G., ZAVISLYAK I.V., TATARENKO A.S. Millimeter-wave magnetoelectric effects in bilayer of barium hexaferrite and lead zirconate titanate // *Appl. Phys. Lett.*, 2006, v.89, P. 152508.
10. FETISOV YU.K., SRINIVASAN G. Nonlinear electrical field tuning characteristics of yttrium iron garnet - lead zirconate titanate microwave resonators // *Appl. Phys. Lett.*, 2008. v. 93. P. 033508.

11. FETISOV YU.K., PATTON C.E., SYNOGACH V.T.
Nonlinear ferromagnetic resonance nad foldover in
yttrium iron garnet thin films – inadequacy of the clas-
sical model // IEEE Trans. on Magn., 1999. v. 35, n6.
p. 4511–4521.
12. ЯФФЕ Б., КУК У., ЯФФЕ Г. Пьезоэлектрическая
керамика. М.: Мир, 1974. 288 с.
13. УСТИНОВ А.Б., ФЕТИСОВ Ю.К., ЛЕБЕДЕВ С.В.,
SRINIVASAN G. Электрическое переключение
бистабильного феррит-пьезоэлектрического
резонатора // Письма в ЖТФ, 2010. т. 36, вып. 4. с.
41–47.

Фетисов Юрий Константинович,
действительный член РАЕН, д.ф.-м.н., профессор, декан факуль-
тета электроники МИРЭА,
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78,
тел.: + 7 (495) 434-91-43, E-mail: fetisov@mirea.ru.

Сринивазан Гопалан (SRINIVASAN GOPALAN),
профессор кафедры физики Оклендского университета
Oakland University, Rochester, Michigan 48309, USA,
e-mail: srinivas@oakland.edu.

NONLINEAR CHARACTERISTICS OF MICROWAVE FERRITE- PIEZOELECTRIC RESONATOR WITH ELECTRICAL AND MAGNETIC TUNABLE FREQUENCY

FETISOV YU.K., *SRINIVASAN G.

Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation, 119454 Moscow, Russia.

*Oakland University, Rochester, Michigan, 48309 USA

Ferromagnetic resonance resonator consisting of mechanically coupled yttrium iron garnet film and piezoelectric lead zirconate titanate plate is described and investigated. The resonator is tuned in wide frequency band 2.8-8.5 GHz by magnetic field H and in narrow frequency band ~ 80 MHz by electrical field E . The resonator frequency is a nonlinear function of electrical field E and traces dependence of piezoelectric strain on E . The bistability of dispersion type was observed in the resonator at microwave power level higher than 1 mW. The resonator was switched between steady states with characteristic times of ~ 1 μ s by using weak magnetic or electrical fields.