

05

Электрическое переключение бистабильного феррит-пьезоэлектрического сверхвысокочастотного резонатора

© А.Б. Устинов, Ю.К. Фетисов, С.В. Лебедев, G. Srinivasan

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

E-mail: ustinov-rus@mail.ru

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

Oakland University, Rochester, 48309 Michigan, USA

Поступило в Редакцию 11 августа 2009 г.

Исследовано электрическое переключение бистабильного феррит-пьезоэлектрического сверхвысокочастотного резонатора, состоявшего из механически связанных пленки железо-иттриевого граната и пластины цирконата-титаната свинца. Резонатор переключался между состояниями с малым и высоким коэффициентом отражения за время порядка микросекунды.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию сверхвысокочастотных (СВЧ) резонаторов на основе планарных структур феррит-пьезоэлектрик, перестраиваемых магнитным и электрическим полями [1,2]. Рабочая частота таких резонаторов задается частотой ферромагнитного резонанса (ФМР) слоя феррита и перестраивается в широком диапазоне (на десятки гигагерц) при изменении приложенного к резонатору магнитного поля H . Частоту резонаторов можно также перестраивать в узком диапазоне (на десятки мегагерц), прикладывая электрическое поле E к пьезоэлектрику [3]. Деформация слоя пьезоэлектрика, вызванная полем E за счет обратного пьезоэффекта, передается механически связанному с ним слою феррита. Вследствие пьезомагнитного эффекта изменяется внутренне магнитное поле в феррите, что и приводит к смещению частоты ФМР.

В планарных ферритовых резонаторах при возрастании СВЧ-мощности может наблюдаться бистабильность [4]. Она возникает из-за

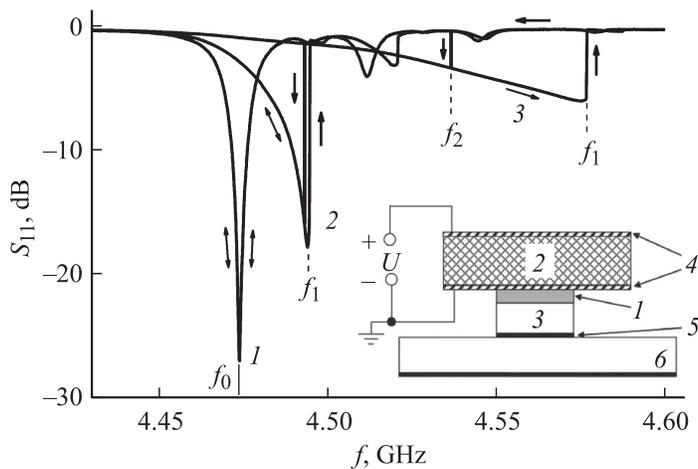


Рис. 1. Спектры отражения YIG–PZT резонатора при различных уровнях падающей мощности: 1 — $20\mu\text{W}$, 2 — 2mW , 3 — 16mW . Стрелками показано направление изменения частоты. На вставке схематически изображена конструкция резонатора.

собственной нелинейности феррита, приводящей к сдвигу частоты ФМР с увеличением амплитуды колебаний намагниченности, и проявляется в существовании на одной и той же частоте двух устойчивых состояний резонатора, отличающихся уровнем поглощенной (отраженной) мощности. Модулируя магнитное поле, такой бистабильный резонатор можно переключать из состояния с малым поглощением в состояние с большим поглощением и обратно.

Цель настоящей работы состояла в исследовании бистабильного СВЧ-резонатора на основе планарной структуры феррит-пьезоэлектрик и демонстрации возможности переключения такого резонатора с помощью электрического поля.

В измерениях использовали резонатор, содержащий пленку 1 феррита железо-иттриевого граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) и пьезоэлектрическую пластину 2 цирконата-титаната свинца $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (PZT) (см. вставку на рис. 1). Пленка YIG, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на подложке 3 из галлий-гадолиниевого граната $\text{Ga}_3\text{Gd}_5\text{O}_{12}$ (GGG), имела размеры в плоскости $0.5 \times 3\text{ mm}$, толщину $7\mu\text{m}$, намагниченность насыщения $4\pi M = 1780\text{ G}$ и ширину линии однородного ФМР $\Delta H = 0.5\text{ Oe}$,

измеренную на частоте 5 GHz. Керамическая пластина PZT имела размеры в плоскости 3×3 mm, толщину $200 \mu\text{m}$ и пьезоэлектрическую константу $d_{31} = 175$ pC/N. На поверхности пластины были нанесены Ag электроды 4 толщиной $4 \mu\text{m}$. Пластина была поляризована перпендикулярно к плоскости путем нагрева до 150°C и последующего охлаждения в поле 10 kV/cm. Для обеспечения механической связи пленка YIG была приклеена к пластине PZT клеем „Loctite 499“.

Резонатор возбуждали с помощью микрополоска 5 шириной 0.5 mm и длиной 3 mm, нанесенного методом фотолитографии на поликоровую подложку 6 толщиной 0.5 mm, металлизированную с обратной стороны. Один конец микрополоска был заземлен, а другой конец был соединен со стандартной линией передачи с волновым сопротивлением 50Ω . Величину связи между резонатором и микрополоском оптимизировали за счет подбора толщины подложки GGG. Структуру намагничивали полем $H = 0-5$ kOe перпендикулярно к плоскости. К электродам пластины PZT прикладывали постоянное напряжение $U = 0-100$ V, которое создавало в пьезоэлектрике поле $E = 0-5$ kV/cm. С помощью панорамного измерителя Agilent E5071B регистрировали частотные зависимости коэффициента отражения резонатора $S_{11}(f) = 20 \lg(P_{ref}(f)/P_{in})$ (где f — частота, P_{in} и P_{ref} — мощности падающего и отраженного СВЧ-сигналов соответственно) при различных уровнях P_{in} и значениях полей H и E .

Рис. 1 демонстрирует переход от линейного режима к бистабильному режиму работы YIG-PZT резонатора при увеличении уровня падающей на резонатор СВЧ-мощности. При $P_{in} < 10 \mu\text{W}$ колебания в резонаторе носили линейный характер. Частота низшего типа колебаний составляла $f_0 = 4474.4$ MHz для $H = 3.27$ kOe и перестраивалась в диапазоне $2-8.5$ GHz при изменении напряженности поля H с коэффициентом $\gamma = 2.8$ MHz/Oe. Линия поглощения имела симметричный лоренцевский вид, и ее форма не искажалась при изменении уровня мощности (кривая 1 на рис. 1). С увеличением P_{in} от $10 \mu\text{W}$ до 1 mW линия поглощения сдвигалась в область более высоких частот и ее форма искажалась: крутизна высокочастотного склона линии увеличивалась, а низкочастотного — уменьшалась. При $P_{in} = 1$ mW крутизна высокочастотного склона линии на характеристике $S_{11}(f)$ становилась бесконечной (кривая 2 на рис. 1) и на частоте f_1 , отвечающей максимуму поглощения, наблюдали скачок мощности. При $P_{in} > 1$ mW 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. 1) 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 YIG–PZT резонатора при увеличении уровня СВЧ-мощности хорошо количественно описывается теорией дисперсионной бистабильности, подробно изложенной в [5].

Затем были измерена зависимость сдвига частоты $\Delta f_1(E) = f_1(E) - f_1(0)$ для YIG–PZT резонатора от напряженности приложенного к пьезоэлектрику электрического поля E при $H = 3.27$ кОе. В случае циклического изменения поля с амплитудой до $E = 1$ кВ/см частота f_1 линейно смещалась вверх или вниз, в зависимости от полярности приложенного E , с коэффициентом 2.4 МГц/(кВ/см). При изменении поля с амплитудой до $E = 5$ кВ/см наблюдали гистерезисную зависимость $\Delta f_1(E)$. Максимальная перестройка частоты в этом случае достигала 24 МГц. Гистерезис электрической перестройки частоты резонатора обусловлен характерной для PZT гистерезисной зависимостью механической деформации от приложенного поля [1,2].

Заметим, что зависимости $\Delta f_1(E)$ были аналогичными для всех уровней возбуждающей мощности P_{in} . Это позволяло управлять частотным положением области бистабильности путем приложения электрического поля за счет магнитоэлектрического эффекта. Такой способ управления является более предпочтительным по сравнению со способом модуляции магнитного поля, так как он низкоэнергетичен, не требует катушек управления, а также может быть реализован при стандартных в микроэлектронике напряжениях.

Далее была изучена динамика переключения YIG–PZT резонатора электрическим полем. Ее 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. 1). На резонатор подавали непрерывный СВЧ-сигнал с частотой $f = 4494$ МГц, лежавшей внутри области бистабильности. К электродам PZT пластины прикладывали гармоническое напряжение с амплитудой 20 В (создающее поле с амплитудой $E = 1$ кВ/см) и частотой 200 Hz и регистрировали временную зависимость отраженной от резонатора мощности $P_{ref}(t)$.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения $U(t)$ и мощности $P_{ref}(t)$, демонстрирующие переключение резонатора между устойчивы-

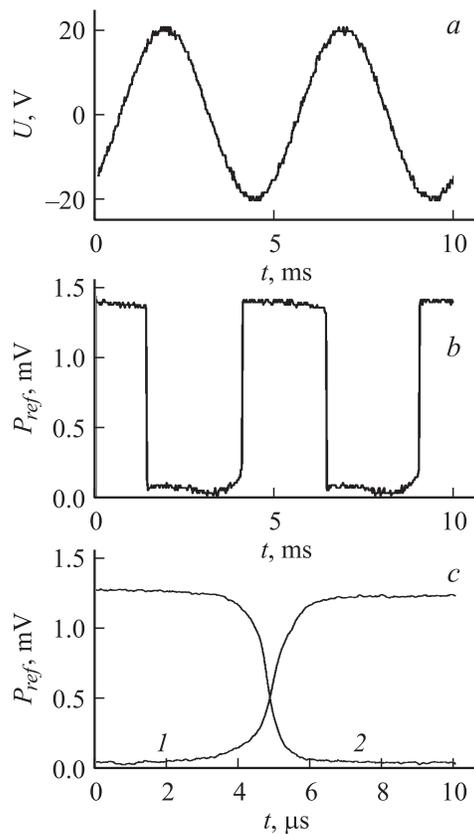


Рис. 2. Осциллограммы: *a* — напряжения, приложенного к слою пьезоэлектрика; *b* — отраженной от резонатора мощности P_{in} ; *c* — переднего и заднего фронтов импульсов отраженной мощности.

ми состояниями. Глубина модуляции отраженной мощности достигала $P_{\max}/P_{\min} \sim 40$, что соответствовало изменению коэффициента отражения на $\Delta S_{11} = 16$ dB вблизи частоты f_1 (см. кривую 2 на рис. 1). Вид зависимости $P_{ref}(t)$ определялся формой петли СВЧ-бистабильности и законом модуляции напряжения. Если резонатор первоначально находился в состоянии с высоким коэффициентом отражения, то при увеличении U область бистабильности смещалась вверх по частоте и

резонатор переключался из состояния с высоким уровнем отраженной мощности P_{ref} в состояние с низким уровнем P_{ref} , формируя задний фронт импульсов. При отрицательных значениях U петля бистабильности смещалась вниз по частоте и резонатор переключался из состояния с низким уровнем P_{ref} в состояние с высоким уровнем P_{ref} , формируя передний фронт импульсов.

Зависимости $P_{ref}(t)$, аналогичные показанным на рис. 2, были получены и без приложения к структуре электрического напряжения при тех же значениях параметров путем гармонической модуляции магнитного поля с амплитудой $h \sim 1$ Ое и частотой 200 Hz. Такая амплитуда модуляции поля соответствовала сдвигу петли бистабильности резонатора на величину около 2.8 МHz, также превышающую ширину петли.

На рис. 2, *с* в более крупном масштабе показаны фронты импульсов $P_{ref}(t)$ при переключении 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 около 1.7 и 1.2 μ s соответственно. Времена переключения резонатора практически не изменялись при приложении к пьезоэлектрику напряжения $U(t)$ в форме меандра с той же амплитудой 20 V и частотой 200 Hz, но с длительностью фронтов менее 1 μ s. Это свидетельствовало о том, что время переключения бистабильного резонатора между устойчивыми состояниями определялось нелинейными свойствами феррита, а не скоростью изменения полей. Измеренные времена соответствуют времени релаксации колебаний намагниченности в феррите $\tau = 1/(\gamma\Delta H) \approx 0.7 \mu$ s с шириной линии ФМР 0.5 Ое. Отметим, что для изменения уровня СВЧ-мощности, отраженной от линейного ФМР резонатора с лоренцевской кривой поглощения, в 40 раз за время порядка 1 μ s, используя стандартный метод модуляции магнитного поля, необходимы на порядок большая амплитуда h и скорость перестройки поля порядка 10^7 Ое/s, что сложно реализовать на практике.

Эффективность модуляции определяется коэффициентом связи резонатора с возбуждающим микрополоском, а также величиной сдвига резонансной частоты, которые зависят от геометрии резонатора. Поэтому путем выбора параметров конструкции можно получать устройства с требуемыми характеристиками. Так, например, динамический диапазон модуляции амплитуды можно варьировать до значений порядка 50 dB, что сопоставимо с известными способами модуляции.

Из проведенного исследования следует, что резонатор можно переключать между стабильными состояниями, отвечающими низкому и высокому уровням отраженной СВЧ-мощности, прикладывая к пластине пьезоэлектрика электрическое напряжение величиной около 20 В или модулируя магнитное поле с амплитудой около 1 Ое. Время переключения резонатора определяется нелинейными свойствами использованного феррита и составляет единицы микросекунд, что существенно меньше, чем для резонаторов, работающих в линейном режиме. Таким образом, бистабильные резонаторы могут найти применения для создания СВЧ-модуляторов и логических элементов. В частности, они могут применяться в схемах обработки цифровых сигналов непосредственно в диапазоне СВЧ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-02-00959 и 09-02-12439-офи_м), 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), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП 2.1.1/1617), а также правительства Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] Fetisov Y.K., Srinivasan G. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. N 1. P. 143503/1-3.
- [2] Устинов А.Б., Фетисов Ю.К., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 14. С. 16–23.
- [3] Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M.I., Petrov V.M., Tatarenko A.S. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 064416/1–6.
- [4] Suhl H. // J. Phys. Chem. Solids. 1957. V. 1. N 4. P. 209–227.
- [5] Фетисов Ю.К., Пэттон К.Е. // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 6. С. 735–741.