

01;09

## Нелинейный отклик бистабильного ферромагнитного резонатора при импульсном возбуждении

© Ю.К. Фетисов, А.В. Маковкин

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет),  
117454 Москва, Россия  
E-mail: fetisov@orc.ru

(Поступило в Редакцию 7 февраля 2000 г.)

Исследованы спектры частот и бистабильные характеристики ферромагнитного резонатора, выполненного в виде пленки феррита железиттриевого граната толщиной  $25 \mu\text{m}$  прямоугольной формы, намагниченной по нормали к ее поверхности. Разработан метод построения бистабильных характеристик резонатора по результатам измерений его отклика на импульсный возбуждающий сигнал. Показано, что физической причиной возникновения сверхвысокочастотной бистабильности в резонаторе является собственная нелинейность ферромагнитного резонанса. Параметры бистабильной характеристики резонатора удовлетворительно описываются в рамках модели дисперсионной бистабильности.

### Введение

При взаимодействии мощного электромагнитного излучения в пассивных резонансных системах наблюдаются различные нелинейные явления, одним из которых является бистабильность [1]. Бистабильная система может находиться в одном из двух устойчивых состояний, различающихся уровнем поглощаемой (отражаемой) мощности. Причиной возникновения бистабильности является, как правило, зависимость резонансной частоты или коэффициента поглощения системы от мощности излучения.

В сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне бистабильность имеет место при нелинейном ферромагнитном резонансе (ФМР) в ферритовых образцах, помещенных во внешнее магнитное поле. Впервые она была обнаружена как фолдовер-эффект в ферритовых резонаторах [2]: при фиксированной высокой мощности излучения возникало искажение формы линии ФМР поглощения, приводящее к существованию низкого либо высокого уровня поглощаемой мощности при одном и том же значении поля. В ферритовых резонаторах наблюдалась [3] также бистабильность классического типа, т.е. двухзначная зависимость отраженной мощности от уровня падающей на резонатор мощности при фиксированной частоте излучения и постоянном магнитном поле. Детальные исследования нелинейных характеристик пленочного ферритового резонатора [4] подтвердили, что оба эффекта имеют одну физическую природу и могут возникать либо из-за собственной нелинейности ФМР [5,6], либо вследствие нагрева образца поглощенным излучением [7,8].

До настоящего времени бистабильность в ферритовых резонаторах исследовалась только в квазистатическом режиме. На образец подавался непрерывный или импульсный СВЧ сигнал, но все измерения проводились в режиме медленного по сравнению с характерными временами магнитной релаксации измерения магнитного поля или мощности излучения. Представляет интерес изучение отклика бистабильного резонатора при его

возбуждении короткими СВЧ импульсами. Это позволит непосредственно измерить характерные времена переключения резонатора, определить механизм нелинейности, ответственный за формирование бистабильной характеристики, и важно для возможных приложений.

Данная работа посвящена как раз исследованию нелинейного отклика бистабильного ферритового резонатора при его возбуждении мощными короткими СВЧ импульсами.

### Ферромагнитный резонатор и методика измерений

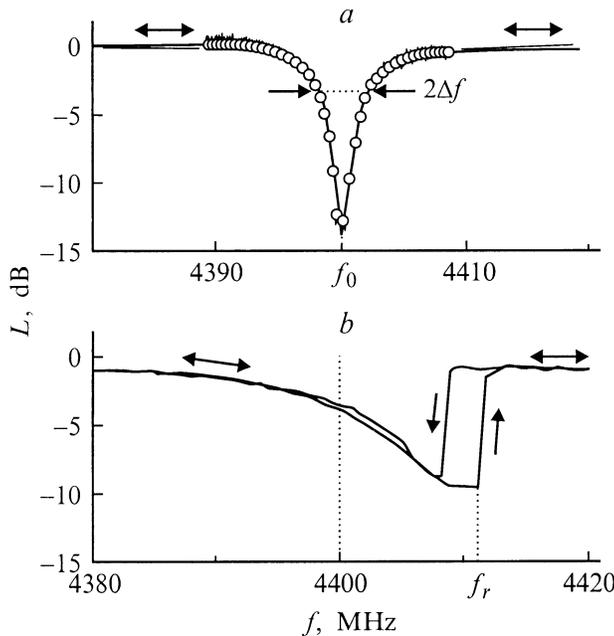
Ферромагнитный резонатор представлял собой пленку феррита железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной  $25 \mu\text{m}$  с размером в плоскости  $1 \times 4 \text{mm}^2$ , намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1750 \text{Gs}$  и шириной линии однородного ФМР  $\Delta H \approx 0.6 \text{Oe}$ , выращенную методом жидкофазной эпитаксии на подложке из галлий-гадолиниевого граната толщиной  $0.6 \text{mm}$ . Для возбуждения резонатора использовался микрополосок шириной  $100 \mu\text{m}$  и длиной  $4 \text{mm}$ , напыленный на поликоробовую подложку. Микрополосок располагался вблизи центральной части резонатора параллельно его длинной грани. Для уменьшения коэффициента связи между микрополоском и пленкой ЖИГ располагалась тефлоновая прокладка толщиной  $80 \mu\text{m}$ . Вся структура помещалась между полюсами постоянного магнита в однородное магнитное поле напряженностью  $H_0 = 3200 \text{Oe}$ , направленное по нормали к плоскости пленки. СВЧ сигнал подавался на микрополосок через ферритовый циркулятор. Измерялись параметры отраженного от резонатора сигнала. В непрерывном режиме с помощью панорамного измерителя P2-78 регистрировались спектры отражения резонатора в диапазоне частот  $4\text{--}5 \text{GHz}$  при различных фиксированных уровнях падающей мощности. Время свипирования частоты при измерениях в режиме непрерывного сигнала составляло  $60 \text{s}$ . При импульсных

измерениях на резонатор подавались СВЧ импульсы с плавной огибающей, фиксированной центральной частотой в диапазоне 4–5 GHz, пиковой мощностью до 300 mW, длительностью на полувысоте около 27 μs и периодом повторения 50 ms. Отраженные от резонатора СВЧ импульсы детектировались калиброванным диодом и форма их огибающей записывалась с помощью цифрового осциллографа Wiltron в виде файлов данных, содержащих по 512 точек.

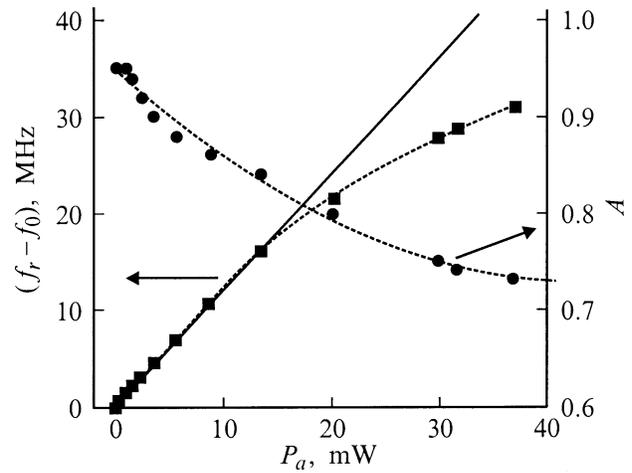
### Спектры отражения резонатора

На рис. 1, *a* приведен спектр отражения резонатора при низком уровне мощности, т.е. зависимость потерь отражения, выраженных в dB ( $L = 10 \log (P_{ref}/P)$ ), от частоты сигнала  $f$ , где  $P$  — мощность падающего на резонатор сигнала,  $P_{ref}$  — мощность отраженного сигнала. Спектр содержал один пик поглощения с центральной частотой  $f_0 = 4400$  MHz, глубиной около 12 dB и шириной  $2\Delta f = 4.4$  MHz по уровню отражения — 3 dB. Форма спектра сохранялась при изменении уровня падающей на резонатор мощности от -60 до -10 dBm, что свидетельствовало о линейности системы при низких уровнях мощности. Отметим, что на рис. 1, *a* и всюду далее уже учтены нерезонансные потери в соединениях измерительной схемы и циркуляторе, мощности  $P$  и  $P_{ref}$  пересчитаны к входу ферритового резонатора. Кружками на рис. 1, *a* представлена рассчитанная форма линии резонатора, о чем будет подробнее сказано ниже.

При увеличении падающей на резонатор мощности  $P$  от -10 до +20 dBm наблюдалось сначала несимметрич-



**Рис. 1.** Спектры отражения ФМР резонатора при низком (*a*) и высоком (*b*) уровнях мощности сигнала. Сплошные кривые — эксперимент, кружки — расчет. Стрелки указывают направления изменения частоты сигнала.  $P$ , dBm: *a* — -20, *b* — +10.



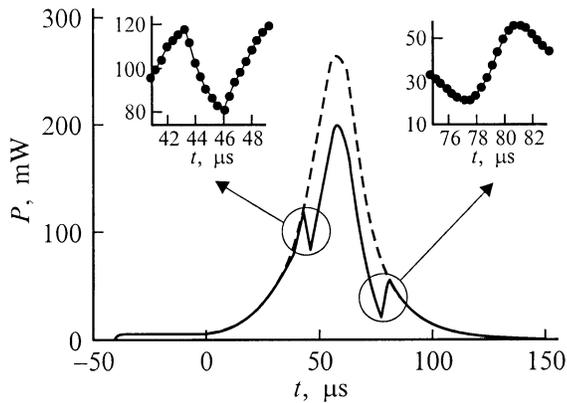
**Рис. 2.** Зависимости сдвига резонансной частоты и коэффициента поглощения резонатора на частоте  $f_r$  от поглощенной в резонаторе мощности: значки — эксперимент, сплошная кривая — линейная аппроксимация экспериментальных данных.

ное искажение формы линии поглощения резонатора, а затем и появление гистерезиса в зависимости потерь отражения резонатора от частоты сигнала, что демонстрирует рис. 1, *b*. При этом резонансная частота  $f_r$ , отвечающая максимуму поглощения при свипировании частоты входного сигнала снизу вверх, возрастала, а коэффициент поглощения мощности на этой частоте уменьшался.

Используя данные измерений, аналогичные приведенным на рис. 1, *b*, были рассчитаны зависимости сдвига резонансной частоты  $f_r - f_0$  и коэффициента поглощения  $A = P_a/P$  резонатора на этой частоте от уровня поглощенной мощности  $P_a$ . Как видно из рис. 2, сдвиг частоты резонатора практически линейно возрастал с коэффициентом  $B = 1.18$  MHz z/mW при увеличении поглощенной мощности от нуля до 13 MHz. Максимальный измеренный сдвиг частоты резонатора достигал 30 MHz при поглощенной мощности 40 mW. Коэффициент поглощения  $A$  резонатора при этом монотонно уменьшался от значения  $A_0 = 0.95$  в режиме слабого сигнала до 0.72 при поглощенной мощности 40 mW.

### Импульсное возбуждение резонатора

В импульсном режиме измерений на резонатор подавались квазимонохроматические СВЧ импульсы с пиковой мощностью, достаточной для наблюдения нелинейности. Форма возбуждающего импульса показана штриховой линией на рис. 3. Если несущая частота импульса  $f$  была меньше или равна частоте  $f_0$  резонатора при малом уровне мощности, то форма отраженного от резонатора сигнала полностью повторяла форму падающего импульса. Если же частота сигнала  $f$  превышала частоту  $f_0$ , то форма отраженного импульса искажалась, как показано сплошной линией на рис. 3. На переднем и заднем



**Рис. 3.** Формы огибающих возбуждающего (штриховая кривая) и отраженного от бистабильного резонатора (сплошная кривая) СВЧ импульсов при отстройке несущей частоты импульса  $\delta f = 18$  MHz. На вставках в более крупном масштабе показаны области переключения резонатора.

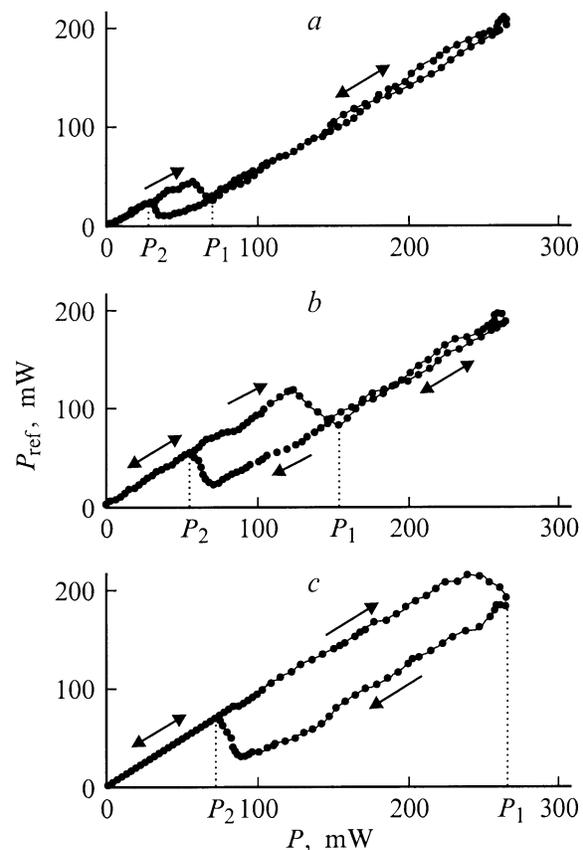
фронтах отраженного импульса появлялись характерные скачки мощности, расположенные на различной высоте. При малых отстройках частоты  $\delta f = f - f_0$  скачки наблюдались на крыльях импульса в области низких мощностей, а затем с увеличением отстройки частоты они смещались ближе к вершине импульса в область больших мощностей.

Используя цифровые файлы данных для формы временной огибающей возбуждающего импульса  $P(t)$  и формы огибающей отраженного импульса  $P_{\text{ref}}(t)$ , легко получить бистабильную характеристику, т.е. зависимость  $P_{\text{ref}}$  от  $P$ , для ферритового резонатора. На рис. 4 приведены зависимости мгновенной мощности отраженного сигнала  $P_{\text{ref}}$  от мгновенной мощности возбуждающего сигнала  $P$  для различных несущих частот возбуждающего сигнала, построенные с помощью данных, аналогичных представленным на рис. 3.

При увеличении падающей мощности  $P$  от нуля (что соответствует переднему фронту возбуждающего импульса) отраженная от резонатора мощность линейно росла, затем скачком уменьшалась при значении  $P = P_1$  и после этого снова продолжала расти. При уменьшении мощности СВЧ сигнала от максимального значения до нуля (что соответствует заднему фронту возбуждающего импульса) отраженная мощность вначале плавно уменьшалась, затем скачком возрастала при значении  $P = P_2$  и после этого снова линейно уменьшалась, следуя кривой возрастания входной мощности. В области изменения входной мощности  $P_2 < P < P_1$  имела место бистабильность, т.е. одному значению мощности входного сигнала соответствовал в зависимости от предыстории либо низкий, либо высокий уровень отраженной мощности. С увеличением начальной отстройки частоты сигнала, как видно из рис. 4, петля бистабильности расширялась и смещалась в область больших входных мощностей. Максимальная ширина петли бистабильности составляла  $10 \log(P_1/P_2)_{\text{max}} = 12$  dB, а максимальная

высота петли достигала 10 dB, что согласуется с глубиной пика поглощения резонатора при низком уровне мощности.

Отклик бистабильного резонатора на импульсный возбуждающий сигнал позволяет непосредственно измерить времена переключения резонатора из одного устойчивого состояния в другое. Из вставок на рис. 3 видно, что времена включения резонатора при мощности  $P_1$  и выключения резонатора при мощности  $P_2$  были практически равны друг другу и составляли около  $\tau \approx 3 \mu\text{s}$ . Оба характерных времени переключения монотонно уменьшались примерно в 2 раза с ростом абсолютных значений отстройки частоты и мощности падающего сигнала в момент переключения. Измеренные времена переключения резонатора по порядку величины согласуются со временем магнитной релаксации в ЖИГ  $\tau = 1/(\gamma \cdot \Delta H) \approx 0.5 \mu\text{s}$  ( $\gamma = 2.8 \text{ MHz/Oe}$ ) и значительно меньше характерных тепловых времен для пленочной ферритовой структуры, которые составляют десятки–сотни миллисекунд [9]. Это обстоятельство свидетельствует, что в данном резонаторе бистабильность была обусловлена собственной нелинейностью ФМР, а не нагревом образца феррита из-за поглощения СВЧ мощности.



**Рис. 4.** Бистабильные характеристики ФМР резонатора при различных отстройках частоты сигнала. Стрелки указывают направления увеличения или уменьшения уровня входной мощности.  $\delta f$ , MHz: *a* — 15, *b* — 20, *c* — 23.

## Расчеты и обсуждение результатов

Для описания бистабильности используем модель дисперсионной бистабильности, предложенную в оптике [10], модифицировав ее применительно к ФМР резонатору. Модель основана на характеристиках резонатора в линейном режиме при низком уровне возбуждающей мощности и зависимости частоты резонатора от поглощенной мощности.

Спектр частот пленочного ФМР резонатора формируется в результате возбуждения в феррите неоднородных магнитостатических колебаний. Частота основного колебания в пленке феррита прямоугольной формы толщиной  $d$  с длиной граней  $a$  и  $b$  дается следующим приближенным выражением:

$$f_0 = \gamma(H_0 - 4\pi M_z) + \gamma 4\pi M_z \left( \frac{d}{a} + \frac{d}{b} \right) + \gamma 4\pi M_z \frac{\pi d}{4} \sqrt{\left( \frac{1}{a} \right)^2 + \left( \frac{1}{b} \right)^2}. \quad (1)$$

Первое слагаемое в формуле (1) совпадает с частотой однородного ФМР в безграничной пленке феррита, намагниченной по нормали к ее поверхности, где  $H_0$  — напряженность внешнего постоянного магнитного поля,  $M_z$  — статический компонент вектора намагниченности, направленный параллельно полю и перпендикулярно к плоскости пленки,  $\gamma$  — модуль гиромагнитного отношения. При низком уровне мощности, когда угол раскрыва прецессии вектора намагниченности мал, компонент  $M_z$  равен намагниченности насыщения феррита  $M_0$ . Второе слагаемое в формуле (1) дает поправку первого порядка к частоте, возникающую из-за эффектов размагничивания. Третье слагаемое учитывает гармоническое распределение амплитуды высокочастотной намагниченности по ширине  $a$  и по длине  $b$  резонатора. Вычисление по формуле (1) при отвечающих эксперименту величинах параметров дает значение резонансной частоты  $f_0 = 4312$  МГц, которое согласуется с измеренным. Различие в 2% между рассчитанной и измеренной частотами обусловлено кристаллографической анизотропией феррита и неоднородностью внутреннего магнитного поля в образце, что не учитывалось в расчете и несущественно для последующего рассмотрения.

Формы линии поглощения ФМР резонатора при низком уровне мощности описывается известным лоренцевским выражением

$$P_a(f) = P \frac{A_0}{1 + \{(f - f_0) / \Delta f\}^2}. \quad (2)$$

Тогда частотная зависимость потерь отражения резонатора может быть найдена по формуле  $L(f) = 10 \log\{P_{\text{ref}}(f)/P\}$ , где  $P_{\text{ref}}(f) = P - P_a(f)$  и  $P_a(f)$  дается выражением (2). На рис. 1,  $a$  кружком показана форма линии поглощения резонатора, рассчитанная для значений резонансной частоты  $f_0 = 4400$  МГц,

ширины резонансной кривой  $\Delta f = 2.2$  МГц и коэффициента поглощения  $A_0 = 0.95$ . Значения параметров резонатора, найденные из условия наилучшего совпадения расчета с экспериментом при низком уровне мощности, будут использованы в дальнейшем.

Теперь рассмотрим подробнее зависимости характеристик резонатора от уровня СВЧ мощности, показанные на рис. 2. Сдвиг частоты  $f_r$  при увеличении мощности сигнала, как отмечалось, обусловлен собственной нелинейностью ФМР. Действительно, из выражения (1), где главную роль играет первое слагаемое, следует, что частота резонанса должна возрастать при уменьшении продольного компонента намагниченности  $M_z$ . Из условия сохранения модуля вектора намагниченности  $M_0$  в первом приближении получаем выражение  $M_z = M_0 - 2m^2/M_0$ . Поскольку квадрат амплитуды высокочастотной намагниченности  $m$  пропорционален поглощенной в феррите мощности  $P_a$ , то из выражения (1) и следует наблюдаемое экспериментально линейное увеличение частоты  $f_r$  при возрастании  $P_a$ . Зависимость частоты резонатора от поглощенной мощности запишем в виде

$$f_r = f_0 + B \cdot P_a, \quad (3)$$

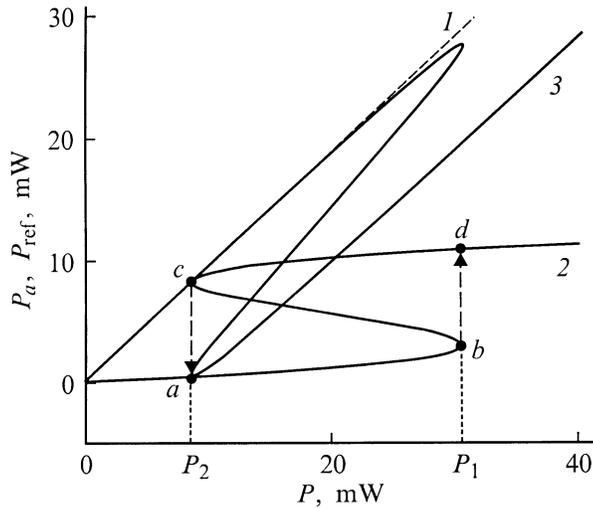
где используем найденный из эксперимента коэффициент  $B = 1.18$  МГц/mW.

Подставляя выражение (3) в формулу (2), получаем кубическое уравнение, связывающее падающую на резонатор мощность  $P$  с поглощенной в резонаторе мощностью  $P_a$ ,

$$P = \frac{P_a}{A_0} \left[ 1 + \left( \frac{\delta f - B P_a}{\Delta f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $\delta f = f - f_0$  — начальная отстройка частоты сигнала.

Используя выражение (4), можно построить зависимость  $P_a$  от  $P$  при фиксированной частоте сигнала  $f$ . Типичный вид кривых  $P_a(P)$ , рассчитанных по изложенной методике при отвечающих эксперименту значениях параметров, приведен на рис. 5. Штриховая линия 1 демонстрирует линейную зависимость между падающей и поглощенной мощностями  $P_a = A_0 P$  в линейном резонаторе ( $B = 0$ ) при нулевой отстройке частоты  $f = f_0$ . Кривая 2 соответствует нелинейному резонатору и отстройке частоты  $\delta f = 10$  МГц. В этом случае на зависимости  $P_a(P)$  существует участок неустойчивости между точками  $b$  и  $c$ , где поглощенная мощность уменьшается с увеличением падающей на резонатор мощности. При увеличении  $P$  от нуля мощность  $P_a$  вначале растет вдоль кривой 2, затем  $P_a$  скачком увеличивается при  $P = P_1$  от значения в точке  $b$  до значения в точке  $d$  и снова продолжает возрастать. При уменьшении  $P$  от максимального значения  $P_a$  вначале монотонно уменьшается, проходит точку  $d$ , скачком падает при  $P = P_2$  от значения в точке  $c$  до значения в точке  $a$ , а затем снова продолжает уменьшаться. Таким образом, при изменении входной мощности в диапазоне  $P_2 < P < P_1$  в резонаторе



**Рис. 5.** Рассчитанные зависимости поглощенной (1, 2) и отраженной (3) мощности от падающей на резонатор мощности.

существует бистабильность: одному значению падающей на резонатор мощности может соответствовать в зависимости от предыстории либо низкий, либо высокий уровень поглощенной в резонаторе мощности.

Кривой 3 на рис. 5 показана зависимость отраженной мощности  $P_{\text{ref}}$  от уровня падающей на резонатор мощности  $P$ . В этом случае на границах бистабильной области должны происходить скачкообразное уменьшение отраженной мощности при  $P = P_1$  и скачкообразное увеличение отраженной мощности при  $P = P_2$ , что качественно полностью соответствует экспериментальным данным рис. 4.

Модель дисперсионной бистабильности позволяет рассчитать характерные значения мощностей, при которых происходят скачкообразные переходы между стабильными состояниями. Из рис. 5 видно, что первая производная  $\partial P / \partial P_a$  обращается в нуль в точках перехода  $b$  и  $c$ . Выполнив дифференцирование уравнения (4) и приравняв производную нулю, находим два значения для поглощенной мощности в точках перехода

$$P_a^{1,2} = \frac{2\delta f \pm \sqrt{\delta f^2 - 3\Delta f^2}}{3B}. \quad (5)$$

Подставив затем эти значения в уравнение (4), находим характерные мощности  $P_1$  и  $P_2$ .

Из выражения (5), условия исчезновения петли при равенстве мощностей  $P_{a1} = P_{a2}$  и уравнения (4) следуют условия существования бистабильности в аналитическом виде

$$\delta f > \delta f_{\text{th}} = \sqrt{3}\Delta f, \quad P > P_{\text{th}} = \frac{8}{3\sqrt{3}} \frac{\Delta f}{A_0 B}. \quad (6)$$

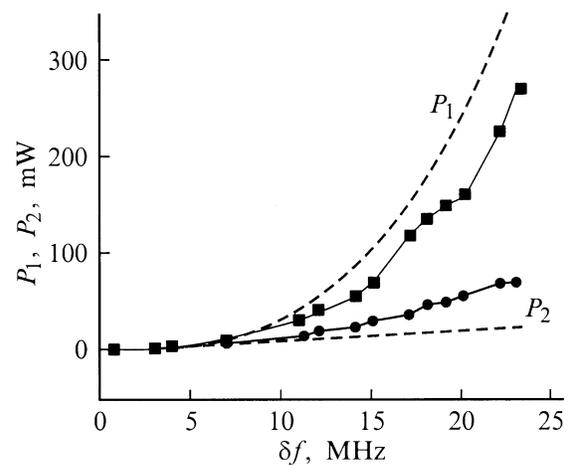
Следовательно, для возникновения бистабильности в ФМР резонаторе с лоренцевской формой линии поглощения отстройка частоты сигнала должна превышать

пороговое значение  $\delta f_{\text{th}}$ , для уменьшения пороговой мощности  $P_{\text{th}}$  резонатор должен обладать узкой линией, близким к единице коэффициентом поглощения и значительной нелинейностью.

В описанных экспериментах бистабильность возникла при минимальной отстройке частоты сигнала  $\delta f_{\text{min}} \approx 7$  МГц и минимальной мощности падающего сигнала  $P_{\text{min}} \approx 5$  мВт, что удовлетворительно согласуется со значениями  $\delta f_{\text{th}} = 3.8$  МГц и  $P_{\text{th}} = 3.02$  мВт, рассчитанными по формулам (6) при значениях параметров, отвечающих эксперименту.

На рис. 6 значками показаны измеренные зависимости характерных мощностей  $P_1$  и  $P_2$ , соответствующих скачкообразному переходу резонатора из одного устойчивого состояния в другое, от величины начальной отстройки частоты сигнала  $\delta f$ ; штриховые кривые — теоретические зависимости, рассчитанные по изложенной методике. Видно качественное совпадение результатов расчета с экспериментом. Для любых значений отстройки частоты сигнала наблюдаемая бистабильная петля находится внутри рассчитанного интервала мощностей, однако она уже, чем предсказывает теория.

Количественное отличие предсказаний теории от эксперимента связано, по-видимому, с условием параметрических процессов возбуждения спиновых волн в феррите. Как известно (см., например, [11]), увеличение амплитуды прецессии намагниченности выше некоторого порогового значения приводит к перекачке от однородной прецессии к обменным спиновым волнам. Это вызывает насыщение поглощения ФМР и уширение резонансной кривой. В описанных экспериментах насыщение ФМР проявлялось в значительном уменьшении коэффициента поглощения резонатора при увеличении мощности, что видно из рис. 2. Кроме того, максимальный зарегистрированный сдвиг частоты резонатора на 30 МГц соответствует углу прецессии вектора намагниченности  $\theta = \text{Arccos}(M_z/M) \approx 5.5^\circ$ , что существенно



**Рис. 6.** Зависимости верхней  $P_1$  и нижней  $P_2$  границ области существования бистабильности в ФМР резонаторе от  $\delta f$ . Значки — эксперимент, штриховые кривые — расчет.

больше предельного угла  $\theta_c \sim 1^\circ$ , при котором в феррите начинаются процессы параметрического возбуждения спиновых волн.

## Заключение

Таким образом, в работе экспериментально исследовано явление сверхвысокочастотной бистабильности в ферромагнитном резонаторе, изготовленном из пленки ЖИГ прямоугольной формы толщиной  $25 \mu\text{m}$ , помещенной в магнитном поле, направленное перпендикулярно к плоскости пленки. С помощью измеренного отклика резонатора на импульсный возбуждающий сигнал получены бистабильные характеристики резонатора для различных отстроек частоты возбуждающего сигнала относительно частоты резонатора при низком уровне мощности. Время переключения резонатора между стабильными состояниями составляло единицы микросекунд. Установлено, что причиной возникновения бистабильности в резонаторе является собственная нелинейность ферромагнитного резонанса, вызванная увеличением угла прецессии вектора намагниченности. Сравнение измеренных и рассчитанных характеристик бистабильного резонатора показало, что феноменологическая модель дисперсионной бистабильности качественно хорошо описывает поведение резонатора при высоких уровнях сигнала. Однако для количественного описания эксперимента необходимо в теории бистабильности учесть параметрическое возбуждение спиновых волн в феррите при больших мощностях сигнала.

Бистабильные пленочные ФМР резонаторы могут найти применение для создания различных твердотельных устройств формирования обработки радиосигналов, таких как ограничители и модуляторы уровня СВЧ мощности или элементы логических СВЧ устройств, переключаемые из одного устойчивого состояния в другое дополнительным управляющим СВЧ сигналом.

Работа частично поддержана грантами Минобразования РФ и Немецкой службы академических обменов (DAAD).

Авторы признательны профессорам С.Е. Patton и J. Pelzl за обсуждения и интерес к работе.

## Список литературы

- [1] Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. М.: Мир, 1988. 520 с.
- [2] Weiss M.T. // Phys. Rev. Lett. 1958. Vol. 1. N 2. P. 239–241.
- [3] Фетисов Ю.К., Пэттон К.Е. // Тез. докл. XVI Междунар. школы-семинара "Новые магнитные материалы микроэлектроники". М., 1998. Ч. 1. С. 276–277.
- [4] Fetisov Y.K., Synogach V.T., Patton C.E. // IEEE Trans. Magn. 1999. Vol. 35. N 6. P. 4511–4521.
- [5] Anderson P.V., Suhl H. // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. N 2. P. 1788–1789.

- [6] Fetisov Y.K., Patton C.E. // Abstracts of the 1998 MMM Conf. Miami (Florida), 1998. P. 103.
- [7] Zhang Y.T., Patton C.E., Kogekar M.V. // IEEE Trans. Magn. 1986. Vol. 22. N 2. P. 993–995.
- [8] Fetisov Y.K., Patton C.E. // Abstracts of the 44 MMM Conf. San Jose (California), 1999. P. 371.
- [9] Мясоедов А.Н., Фетисов Ю.К., Маряхин А.В. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 118–123.
- [10] Felberg F.S., Magburger J.H. // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 28. N 12. P. 731–734.
- [11] Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.