

05;09

## **Нелинейный отклик пленочного ферромагнитного резонатора в условиях нелинейного затухания колебаний намагниченности**

© А.В. Дроздовский, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
E-mail: ustinov-rus@mail.ru

*Поступило в Редакцию 13 апреля 2010 г.*

Экспериментально исследован нелинейный отклик касательно намагниченного пленочного ферромагнитного резонатора в условиях, когда нелинейные эффекты в резонаторе обусловлены четырехволновыми параметрическими процессами. Показано, что увеличение СВЧ-мощности, подаваемой на резонатор, приводит как к нелинейному сдвигу собственных частот резонатора, так и к уширению пиков резонансного поглощения. Последнее явление обусловлено нелинейным затуханием колебаний намагниченности в резонаторе. Обнаружено, что эффект нелинейного сдвига частоты является беспороговым, а эффект нелинейного затухания является пороговым, причем его появление ведет к ограничению величины нелинейного сдвига частоты резонатора.

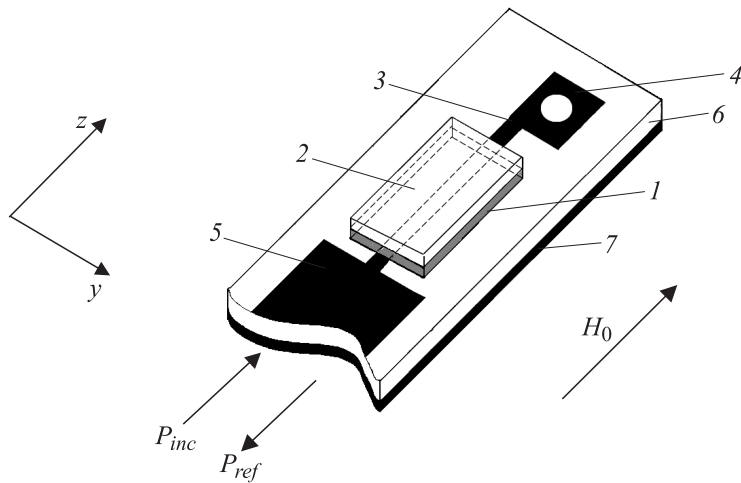
Резонаторы на основе высококачественных ферромагнитных пленок, таких как монокристаллические пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), могут найти различные применения в сверхвысокочастотной (СВЧ) электронике (см., например, [1]). Известно, что увеличение мощности СВЧ-сигнала, подаваемого на пленочный ферромагнитный резонатор, может приводить к различным нелинейным эффектам. С одной стороны, развитие нелинейных эффектов зачастую является нежелательным, а их возможное возникновение необходимо учитывать при разработке линейных спин-волновых СВЧ-приборов. С другой стороны, нелинейные эффекты в ферромагнитных пленках могут служить основой для создания новых способов и приборов обработки и генерации СВЧ-сигналов.

Нелинейные явления в ферромагнитных пленках обычно возникают в результате развития трехволновых и четырехволновых процессов параметрического взаимодействия спиновых волн. Если процессы трехволнового взаимодействия запрещены законами сохранения энергии импульса, то нелинейная динамика колебаний намагниченности определяется только четырехволновыми процессами. В этом случае одним из хорошо известных явлений, обуславливающих нелинейный отклик резонатора, является нелинейный сдвиг частот собственных колебаний намагниченности, появляющийся при увеличении их амплитуды. Это явление лежит в основе таких эффектов, как СВЧ-бистабильность [2] и нелинейный сдвиг резонансных частот [3]. Другим нелинейным явлением, которое наблюдается в ферромагнитных пленках, является нелинейное затухание спиновых волн [4–6]. Однако его влияние на нелинейные свойства резонаторов до сих пор остается мало изученным.

Целью настоящей работы являлось исследование нелинейного отклика пленочного ферромагнитного резонатора в условиях возникновения нелинейного затухания колебаний намагниченности. Резонатор представлял собой пленку феррита железо-иттриевого граната толщиной  $7.5 \mu\text{m}$  с размерами в плоскости  $a = 1.5 \text{ mm}$  и  $b = 0.5 \text{ mm}$ . Пленка была эпитаксиально выращена на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной  $0.5 \text{ mm}$ . Ее намагниченность насыщения  $M_s$  была равна  $140 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$  (в гауссовой системе единиц  $4\pi M_s = 1750 \text{ Gs}$ ), а ширина линии однородного ферромагнитного резонанса  $2\Delta H$  составляла около  $160 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  ( $2 \text{ Oe}$ ) на частоте  $5 \text{ GHz}$ .

Для возбуждения колебаний намагниченности использовалась микрополосковая антенна шириной  $50 \mu\text{m}$  и длиной  $2 \text{ mm}$ . Один конец антенны был соединен со стандартной микрополосковой линией передачи, имевшей волновое сопротивление величиной  $50 \Omega$ , а другой конец был закорочен. Микрополосковая структура была сформирована методом фотолитографии на поликоревой подложке толщиной  $0.5 \text{ mm}$ . Обратная сторона подложки была металлизирована. Резонатор накладывался непосредственно на микрополосковую антенну длиной стороной вдоль нее так, как показано на рис. 1. Микрополосковая структура с резонатором помещалась между полюсами постоянного магнита в однородное магнитное поле  $H_0$ , направленное вдоль антенны по касательной к плоскости пленки.

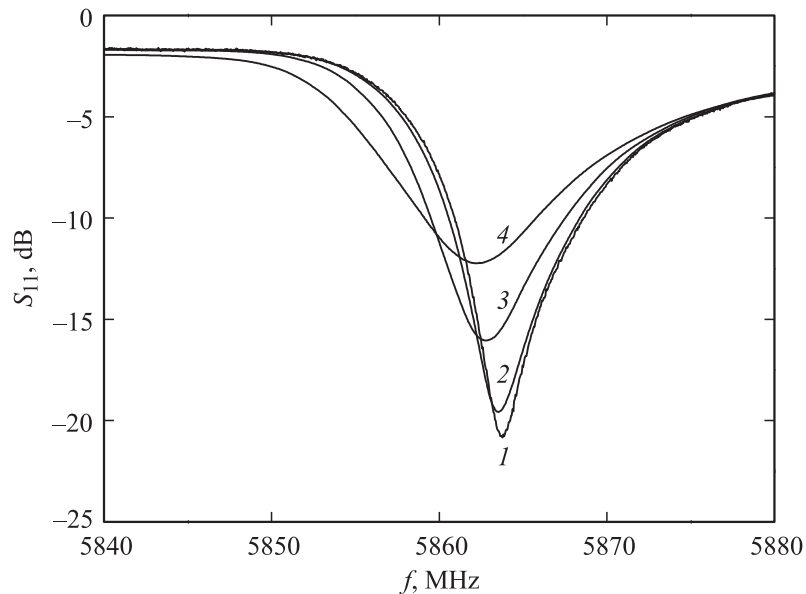
Исследование нелинейных свойств резонатора проводилось путем измерений его спектров поглощения при различных уровнях



**Рис. 1.** Эскиз экспериментального макета: 1 — резонатор из пленки ЖИГ; 2 — подложка из ГГГ; 3 — микрополосковая антенна; 4 — короткое замыкание; 5 — подводящая линия передач; 6 — подложка из поликора; 7 — металлизация.

подаваемой СВЧ-мощности. В ходе экспериментов измерялись частотные зависимости коэффициента отражения резонатора  $S_{11}(f) = 10 \cdot \lg(P_{ref}(f)/P_{inc})$ . Здесь  $f$  — частота СВЧ-сигнала, подаваемого на резонатор, а  $P_{inc}$  и  $P_{ref}$  — соответственно мощности падающего и отраженного сигналов. Измерения были выполнены в диапазоне мощностей  $P_{inc}$  от  $-30$  dBm ( $1 \mu\text{W}$ ) до  $18$  dBm ( $63 \text{ mW}$ ) с шагом  $1$  dBm. Величина напряженности магнитного поля  $H_0$  составляла  $112.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$  ( $1410 \text{ Oe}$ ). Для такого значения  $H_0$  спектр поглощения резонатора лежал на частотах около  $6 \text{ GHz}$ , а нелинейные свойства резонатора были обусловлены только четырехволновыми параметрическими процессами.

На рис. 2 показаны фрагменты характеристик  $S_{11}(f)$  для основной моды резонатора, измеренные при значениях мощности  $P_{inc}$ , указанных в подписи к рисунку. Как видно из рисунка, увеличение мощности входного сигнала приводит к уменьшению резонансной частоты, к увеличению ширины резонансной кривой (или уменьшению добротности

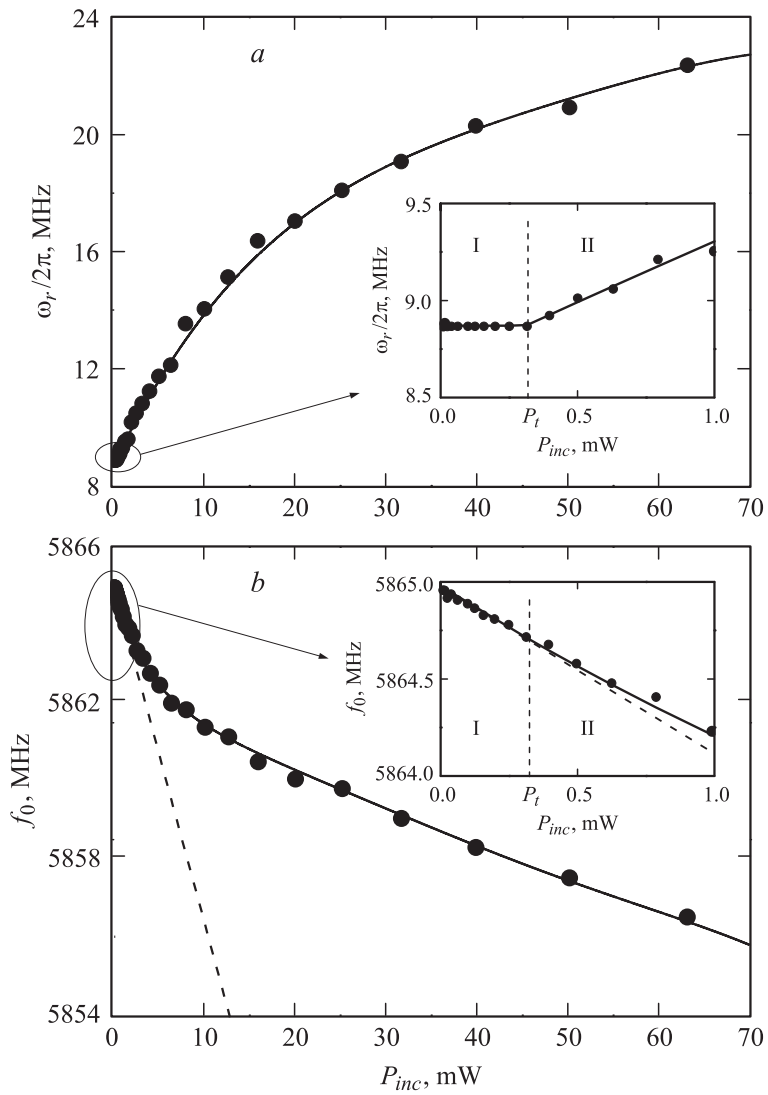


**Рис. 2.** Спектры отражения ферромагнитного резонатора при различных уровнях мощности сигнала  $P_{inc}$ : 1 —  $1 \mu\text{W}$ , 2 —  $4 \text{ mW}$ , 3 —  $16 \text{ mW}$ , 4 —  $63 \text{ mW}$ .

резонатора) и к увеличению коэффициента отражения на резонансной частоте.

По измеренным резонансным кривым были определены резонансная частота  $f_0 = \omega_0/2\pi$  и частота релаксации  $\omega_r$  колебаний намагниченности при различных уровнях мощности  $P_{inc}$ . Частота релаксации рассчитывалась следующим образом. Сначала по резонансной кривой определялись нагруженная добротность резонатора и его коэффициент связи с микрополосковой антенной. Затем, используя модель, в которой резонатор рассматривался в качестве неоднородности, включенной в короткозамкнутую линию передачи, рассчитывалась собственная добротность  $Q_0$  [7]. После этого частоту релаксации определяли как  $\omega_r = \omega_0/(2Q_0)$ .

На рис. 3 значками показаны экспериментальные зависимости частоты релаксации  $\omega_r/2\pi$  и резонансной частоты  $f_0$  от падающей



**Рис. 3.** Зависимости частоты релаксации (*a*) и резонансной частоты (*b*) от падающей мощности (линии — результаты расчета, значки — эксперимента). На вставках показаны те же зависимости в увеличенном масштабе.

мощности  $P_{inc}$ . Как видно из графиков, при возрастании  $P_{inc}$  от 1 до  $320 \mu\text{W}$  (область I) частота релаксации оставалась неизменной и равнялась  $8.87 \text{ MHz}$  (рис. 3, *a*), а  $f_0$  уменьшалась практически по линейному закону с угловым коэффициентом  $N = -0.85 \text{ MHz} \cdot \text{mW}^{-1}$  (пунктирная линия на рис. 3, *b*). Это говорит о том, что в области I нелинейное затухание колебаний в резонаторе отсутствует, в то время как нелинейный сдвиг частоты имеет место.

Такое поведение резонансной частоты типично для пленочных ферромагнитных резонаторов [3]. Его легко объяснить, если рассмотреть модель прецессии намагниченности. Согласно этой модели, увеличение амплитуды переменной намагниченности  $|\mathbf{m}|$  ведет к уменьшению постоянной составляющей намагниченности  $M_z$  в соответствии с приближенной формулой

$$M_z(|U|^2) \approx M_s(1 - |U|^2), \quad (1)$$

где  $|U|^2 = |\mathbf{m}|^2/2M_s^2$ . Величина  $M_z$  входит в выражение, определяющее резонансные частоты касательно намагниченного пленочного ферромагнитного резонатора (см., например, [8]). Для резонансного колебания низшего типа это выражение имеет вид

$$\omega_0(|U|^2) = [\omega_H + \omega_M(|U|^2)(1 - P_{00})]^{1/2} \left[ \omega_H + \omega_M(|U|^2)P_{00} \frac{k_z^2}{k_y^2 + k_z^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\omega_H = |g|\mu_0 H_0$ ,  $\omega_M(|U|^2) = |g|\mu_0 M_z(|U|^2)$ ,  $|g| = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$  — гиромагнитное отношение,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $P_{00} = 1 - (1 - e^{-kl})/kL$ ,  $k = \sqrt{k_y^2 + k_z^2}$ ,  $k_y = \pi/b$  и  $k_z = \pi/a$ . Учитывая, что мощность  $P_{inc}$  прямо пропорциональна  $|U|^2$ , из выражения (2) для области I имеем практически линейную зависимость  $f_0(P_{inc})$ .

Увеличение  $P_{inc}$  выше значения  $P_t = 320 \mu\text{W}$  приводило к пороговому возникновению нелинейного затухания колебаний намагниченности в резонаторе. При этом частота релаксации  $\omega_r$  начинала возрастать, а ход зависимости  $f_0(P_{inc})$  начинал отклоняться от первоначального. Это отклонение объясняется тем, что нелинейное затухание ограничивает рост амплитуды колебаний в резонаторе, а следовательно, и нелинейный сдвиг резонансных частот (область II на рис. 3). Заметим, что при сравнительно больших значениях  $P_{inc}$  (порядка нескольких десятков

милливатт) скорость роста частоты релаксации значительно уменьшалась. Скорость изменения резонансной частоты также уменьшалась.

Обращает на себя внимание наличие порога возникновения нелинейного затухания. Данный экспериментальный факт подтверждает то, что нелинейное затухание колебаний намагниченности возникает в результате развития в ферромагнитной пленке четырехволновых параметрических процессов типа  $2\omega_k = \omega_{k+\kappa} + \omega_{k-\kappa}$ , при которых  $\kappa \gg k$ . Возникновение нелинейного затухания пороговым образом также наблюдалось ранее для волн намагниченности, распространяющихся в волноводах из пленок ЖИГ [4]. Отметим также, что в проведенных экспериментах порога возникновения нелинейного сдвига частоты не наблюдалось. Это хорошо согласуется с классической моделью прецессии намагниченности и формулой (1).

Для теоретического описания результатов эксперимента была использована модель нелинейного затухания, аналогичная предложенной в [4,5]. Для описания порога возникновения нелинейного затухания в модель была введена функция Хевисайда. В результате частота релаксации была представлена в виде следующего разложения по степеням мощности:

$$\omega_r(P_{inc}) = \omega_{r0} + H(P_{inc} - P_t)(v_1(P_{inc} - P_t) + v_2(P_{inc} - P_t)^2 + v_3(P_{inc} - P_t)^3 + v_4(P_{inc} - P_t)^4), \quad (3)$$

где  $\omega_{r0}$  — частота релаксации в отсутствие нелинейного затухания,  $H(P_{inc} - P_t)$  — функция Хевисайда,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  и  $v_4$  суть коэффициенты разложения. Анализ показал, что для адекватного описания экспериментальных данных достаточно ограничиться первыми тремя членами разложения. Коэффициенты разложения были найдены из условия совпадения теории и эксперимента с использованием метода наименьших квадратов. Коэффициенты оказались равными  $v_1 = 4.02 \cdot 10^6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mW}^{-1}$ ,  $v_2 = -9.43 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mW}^{-2}$ ,  $v_3 = 1/19 \cdot 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mW}^{-3}$  и  $v_4 = -5.91 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mW}^{-4}$ . Полученная теоретическая зависимость  $\omega_r(P_{inc})$  показана сплошной линией на рис. 3, а.

Для построения зависимости резонансной частоты от падающей мощности был использован следующий метод. Из экспериментальных зависимостей, приведенных на рис. 2, видно, что резонансные кривые

имеют форму, близкую к лоренцевой. Поэтому нормированная амплитуда колебаний намагниченности была представлена в виде стандартного выражения для амплитуды вынужденных колебаний, в котором учтена зависимость частоты релаксации  $\omega_r$  от мощности возбуждающего сигнала  $P_{inc}$ :

$$|U(\omega, P_{inc})| = \frac{A(P_{inc})}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega_r(P_{inc})\omega)^2}}. \quad (4)$$

С помощью этого выражения по заданным значениям мощности  $P_{inc}$  рассчитывалась амплитуда намагниченности  $|U|$  на резонансной частоте. Затем она подставлялась в формулу (2), по которой вычислялись резонансные частоты. В выражении (4) величина  $A(P_{inc})$  есть амплитуда возбуждающего СВЧ-колебания, которая определялась как  $A(P_{inc}) = B\sqrt{P_{inc}}$ . Коэффициент  $B$  определялся феноменологически из условия совпадения теоретической и экспериментальной зависимостей  $f_0(P_{inc})$  в области I, где нелинейное затухание отсутствует. Он оказался равен  $1.6 \cdot 10^4 \text{ MHz}^2 \cdot \text{mW}^{-1/2}$ . Значение резонансной частоты  $\omega_0$  в формуле (4) бралось постоянным, рассчитанным по формуле (2) при  $|U|^2 = 0$ , что не влияло на результаты расчета значения  $|U|$  на резонансной частоте.

На рис. 3, *b* сплошной линией показана зависимость  $f_0(P_{inc})$ , численно рассчитанная описанным выше методом. Хорошее совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей подтверждает то, что уменьшение скорости изменения резонансной частоты при увеличении входной мощности обусловлено нелинейным затуханием колебаний намагниченности.

Таким образом, проведенное исследование показало, что увеличение мощности входного СВЧ-сигнала ведет не только к изменению резонансных частот пленочного ферромагнитного резонатора, но и к увеличению ширины кривой поглощения (т.е. к уменьшению добротности резонатора), а также к увеличению коэффициента отражения на резонансной частоте. Кроме того, показано, что эффект нелинейного сдвига частоты является беспороговым, а эффект нелинейного затухания характеризуется наличием порога. Описанные нелинейные явления могут быть использованы, например, для разработки фильтров-ограничителей СВЧ-сигналов на основе пленочных ферромагнитных резонаторов.



Работа поддержана грантами РФФИ № 08-02-00959, президента РФ, Министерства образования и науки РФ и Немецкого научного общества DFG # 436 RUS 113/644/0-1.

## Список литературы

- [1] *Ishak W.S., Chang K.* // IEEE Trans. MTT. 1986. V. 34. N 12. P. 1383–1393.
- [2] *Фетисов Ю.К., Маковкин А.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 1. С. 86–91.
- [3] *Demidov V.E., Hansen U.H., Demokritov S.O.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 157203.
- [4] *Scott M.M., Patton C.E., Kostylev M.P., Kalinikos B.A.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. N 11. P. 6294–6301.
- [5] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 172511.
- [6] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 102504.
- [7] *Ильченко М.Е., Кудинов Е.В.* Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев.: Изд-во Киевского ун-та, 1973. С. 176.
- [8] *Ustinov A.B., Srinivasan G., Fetisov Y.K.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 063901.