

05.2;09;12

Стохастическая генерация при параметрическом возбуждении спиновых волн в пленках железоиттриевого граната

© В.Е. Демидов, Н.Г. Ковшиков

С.-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 2 октября 1997 г.

Излагаются результаты экспериментальных исследований хаотической автомодуляции огибающей поверхностных спиновых волн, обусловленной их параметрической неустойчивостью первого порядка. Эксперимент проводился на установке, представляющей собой СВЧ генератор со спин-волновой линией задержки в цепи обратной связи.

Последние годы все больше внимания уделяется исследованию поведения нелинейных динамических систем. Их свойства оказываются намного богаче, чем в линейном случае. Они приводят к целому ряду своеобразных явлений. В частности, представляет интерес стохастическое поведение детерминированных нелинейных систем [1], особенно систем с большим числом степеней свободы и распределенными параметрами. Примером такой системы может служить ферромагнетик, в котором существуют параметрически связанные спиновые колебания и волны.

Стохастическая автомодуляция сверхвысокочастотного сигнала накачки наблюдалась в ряде работ в объемных ферромагнитных образцах при спин-волновой неустойчивости первого порядка [2,3]. В тонких ферромагнитных пленках данный эффект также исследовался для некоторых частных случаев. В работе [4] рассматривался случай однородной продольной накачки. В работах [5,6] накачка производилась прямыми объемными спиновыми волнами. При накачке поверхностными спиновыми волнами стохастическая автомодуляция наблюдалась только в работе [7], посвященной изучению регулярной автомодуляции, связанной с невырожденностью распада первого порядка [8]. В связи с

этим целью данной работы является экспериментальное исследование стохастической автомодуляции поверхностных спиновых волн в касательно намагниченной пленке железиттриевого граната в условиях спин-волновой неустойчивости первого порядка.

Известно, что начиная с некоторого порога по мощности P_{th} поверхностные спиновые волны становятся параметрически неустойчивыми по отношению к распаду на объемные волны (см., например, [9] и пороговые зависимости в [10]). Наибольшая эффективность распада достигается при выполнении условий временного и пространственного синхронизма:

$$\begin{aligned} n\omega_p(\mathbf{k}_p) &= \omega_1(\mathbf{k}_1) + \omega_2(\mathbf{k}_2), \\ \mathbf{k}_p &= \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где ω_p , ω_1 , ω_2 — частоты волны накачки и параметрически возбуждаемых волн, \mathbf{k}_p , \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 — волновые векторы волны накачки и параметрически возбуждаемых волн, n — порядок параметрической неустойчивости (в нашем случае $n = 1$). Для существования параметрической неустойчивости первого порядка необходимо попадание в спектр спиновых волн трех частот, что выполняется только при определенных условиях. Эти условия определяются полем подмагничивания, волновым числом и частотой волны накачки, намагниченностью насыщения и толщиной пленки. В том случае, если $\mathbf{k}_p \approx 0$, т.е. волна накачки возбуждается вблизи резонансной частоты касательно намагниченной пленки ω_{\perp} , условия (1) примут вид

$$\begin{aligned} \omega_p &\approx \omega_{\perp}, \\ \omega_p/2 &\approx \omega_1(\mathbf{k}_1) \approx \omega_2(\mathbf{k}_2), \\ \mathbf{k}_1 &\approx -\mathbf{k}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Условия (2) выполняются, если $\omega_p = \omega_{\perp} < 2/3\omega_M$ (см., например, [11]), что связано с необходимостью попадания половинной частоты накачки в спектр объемных спиновых волн. Для пленки железиттриевого граната с намагниченностью 1750 Gs частота верхней границы неустойчивости первого порядка составляет величину $\omega_{\perp \max} \approx 3.2$ Hz, что соответствует магнитному полю $H_0 \approx 565$ Oe.

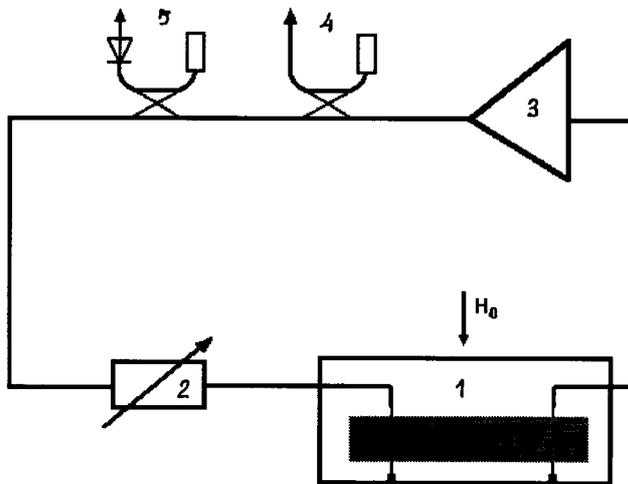


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — линия задержки, 2 — аттенюатор, 3 — усилитель, 4 — к анализатору спектра, 5 — к осциллографу.

Для исследования процессов автомодуляции поверхностных спиновых волн в данной работе использовалась установка, представляющая собой генератор СВЧ диапазона 2–3.3 GHz с нелинейной спиволновой линией задержки в цепи обратной связи (рис. 1). Линия задержки была реализована на касательно намагниченной пленке железиттриевого граната толщиной $15 \mu\text{m}$ с намагниченностью насыщения 1750Gs и линейным параметром диссипации 0.5Oe . Возбуждение и прием поверхностных спиновых волн осуществлялись с помощью микрополосковых преобразователей шириной $30 \mu\text{m}$, расстояние между которыми составляло 10mm . Для обеспечения одномодовой генерации ширина полосы пропускания линии задержки искусственно уменьшалась, для чего пленка железиттриевого граната приподнималась над преобразователями на высоту $d = 100 \mu\text{m}$. В этом случае эффективно возбуждаются только длинные поверхностные волны вблизи начала спектра, для которых $kd < 1$ [12]. Вся структура помещалась в постоянное магнитное поле, напряженность которого изменялась в пределах $200\text{--}600 \text{Oe}$, что позволяло перестраивать частоту генера-

тора. В качестве активного элемента генератора использовались два интегральных усилителя VNA-25 фирмы Mini-Circuits с коэффициентом усиления 16 dB, включенных последовательно. Коэффициент усиления в кольце генератора изменялся при помощи регулируемого аттенюатора. Таким образом варьировалась сверхвысокочастотная мощность P_{IN} , подаваемая на вход линии задержки, т.е. степень надкритичности режима. Средняя мощность на выходе линии задержки P_{OUT} слабо менялась при изменении P_{IN} и составляла величину порядка $42 \mu\text{W}$ при генерации на частоте 2750 МГц.

Исследование огибающей выходного сигнала дало следующие качественные результаты: при $P_{IN} = P_{th}$ модуляция отсутствует. Увеличение P_{IN} приводит к возникновению колебательного обмена энергией между волной накачки и параметрически возбуждаемой волной. При этом возникает модуляция волны накачки. При малых надкритичностях модуляция практически всегда носит периодический характер (частота от десятков килогерц до единиц мегагерц), хотя ее форма может существенно изменяться при изменении поля подмагничивания. По мере увеличения надкритичности периодические колебания огибающей эволюционируют в стохастические. Характерно, что пути развития хаоса не совпадают с известными модельными путями, такими как переход к хаосу через ряд бифуркаций удвоения периода или через перемежаемость [13,14], хотя их элементы наблюдаются. Кроме того, было обнаружено, что характер возникающего хаоса, а следовательно топология и размерность соответствующего странного аттрактора, существенно зависит от величины постоянного магнитного поля.

Развитие хаоса в малых полях подмагничивания (200–400 Oe) при увеличении надкритичности происходит скачком. Начальная периодическая модуляция теряет ближний порядок, и спектр сигнала уширяется.

В полях 400–500 Oe наблюдалось развитие хаоса через бифуркации удвоения периода. С увеличением мощности в спектре сигнала появлялись дополнительные линии, соответствующие половинным частотам. При дальнейшем увеличении надкритичности они уширялись и сливались в единый непрерывный спектр.

При полях порядка 530 Oe модуляция сохраняет строго периодический характер в широком диапазоне надкритичности и не переходит в шумовую. Если увеличивать надкритичность, то при достижении некоторого порога модуляция исчезает.

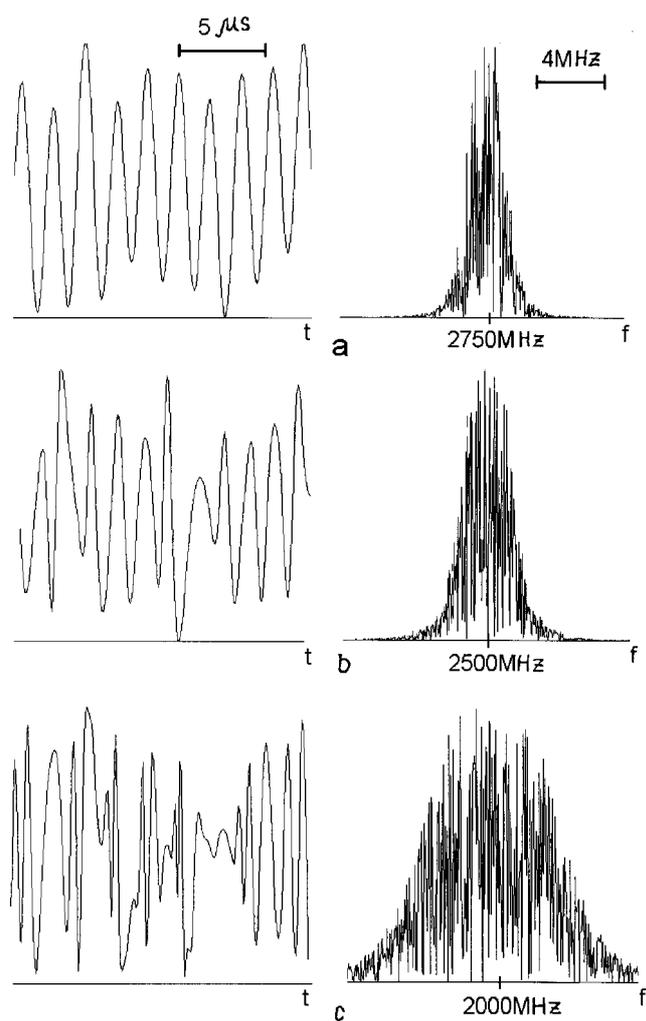


Рис. 2. Осциллограммы огибающей и спектры мощности СВЧ сигнала при различных значениях поля подмагничивания.

В полях выше 580 Ое, где процессы распада первого порядка для используемых значений волновых чисел запрещены, модуляция не наблюдалась.

На рис. 2 представлены осциллограммы огибающей и спектры генерируемого СВЧ сигнала при величинах надкритичности порядка 10 dB, соответствующих развитому стохастическому поведению. Три случая отвечают трем различным полям подмагничивания: а) 450 Ое, б) 380 Ое и с) 250 Ое. Из рисунка видно, что по мере уменьшения напряженности поля структура хаоса становится все более сложной, а спектр генерации все более широким. Напротив, при приближении магнитного поля к верхней границе существования процессов первого порядка структура хаоса упрощается. Колебания огибающей приобретают квазипериодический характер.

Полученные результаты демонстрируют многообразие стохастических эффектов, существующих в рассмотренной системе, и позволяет предложить ее в качестве инструмента для изучения хаотической динамики. Результаты представляют интерес и с технической точки зрения. Они демонстрируют возможность построения шумовых генераторов в СВЧ диапазоне с возможностью управления структурой шума при помощи изменения поля подмагничивания и величины затухания в цепи обратной связи.

Авторы выражают искреннюю признательность Б.А. Калиникосу за обсуждение результатов работы.

Данная работа профинансирована Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-19515).

Список литературы

- [1] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М: Наука, 1992. 454 с.
- [2] Смирнов А.И. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. В. 1. С. 385–397.
- [3] Беннер Г., Хейн Р. // Изв. вузов. ПНД. 1995. Т. 3. В. 1. С. 32–50.
- [4] Мелков Г.А., Шолом С.В. // ЖЭТФ. 1991. Т. 99. В. 2. С. 610–618.
- [5] Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 12. С. 736–740.
- [6] Дудко Г.М., Славин А.Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. В. 6. С. 114–119.
- [7] Медников А.М. // ФТТ. 1981. Т. 23. В.1. С. 242–245.

- [8] *Темиряев А.Г.* // ФТТ. 1987. Т. 29. В.1. С. 313–319.
- [9] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994. 464 с.
- [10] *Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Колодин П.А.* // Тез. докл. II Всес. шк.-семинара "Спинволновая электроника СВЧ". Ашхабад, 1985. С. 77–78.
- [11] *Гусев Б.Н., Гуревич А.Г., Анисимов А.Н.* // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 10. С. 2969–2974.
- [12] *Дмитриев В.Ф., Калиникос Б.А.* // Изв. вузов. Физика. 1988. Т. 31. В. 11. С. 24–53.
- [13] *Шустер Г.* Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
- [14] *Ескманн J.-P.* // Rev. Mod. Phys. 1981. V. 53. P. 643–651.