

09;12

## **Отображения, приводящие к стохастизации огибающей интенсивных спиновых волн**

© В.Е. Демидов, Н.Г. Ковшиков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 6 ноября 1997 г.

Экспериментально исследован переход к хаосу автомодуляции интенсивных поверхностных спиновых волн в магнитных пленках с нелинейностью, обусловленной трехмагнитным взаимодействием. Построены одномерные отображения, приводящие к стохастизации огибающей. Выявлена универсальность отображений, не зависящих от сценария перехода к хаосу.

Стохастизация огибающей спиновых волн в условиях трехмагнитного распада была подробно исследована для случая объемных магнитных образцов (см., например, [1,2]). При этом наблюдалось большое разнообразие сценариев перехода к хаосу в зависимости от напряженности постоянного магнитного поля и характеристик параметрически возбужденных спиновых волн. В магнитных пленках это явление изучено явно недостаточно. Известно лишь небольшое число работ, посвященных детерминированному хаосу спиновых волн в магнитных пленках при трехмагнитном взаимодействии [3,4]. В то же время пленки обладают существенной особенностью по сравнению с объемными образцами. Благодаря дискретности спектра в широком диапазоне интенсивности возбуждения спин-системы количество взаимодействующих спиновых волн ограничено. Это приводит к стохастической динамике, характеризующейся небольшим числом степеней свободы, для исследования которой может быть эффективно применен аппарат теории точечных отображений.

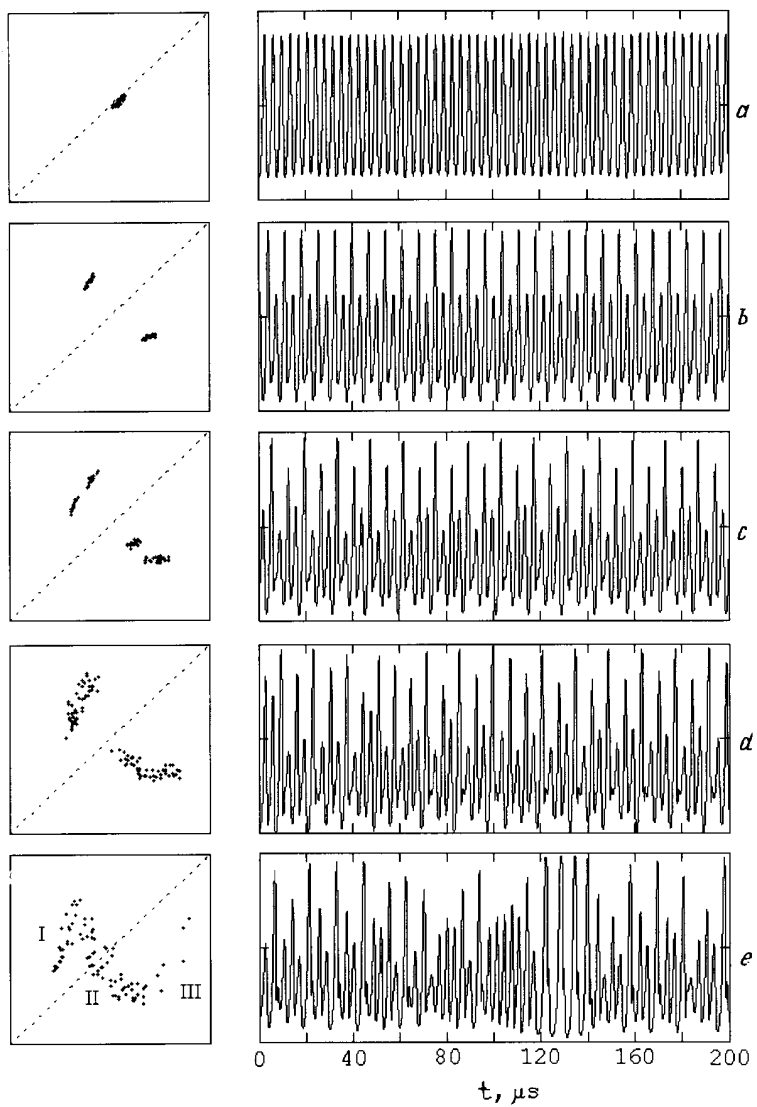
В работе [4] был подробно исследован переход к хаосу автомодуляции спиновых волн в пленочных образцах через бифуркации удвоения периода. В то же время до сих пор остается неясным, как происходит стохастизация в общем случае и какие точечные отображения приводят к такому разнообразию сценариев. Перед данной работой была поставлена

цель — выявить общие закономерности перехода к хаосу огибающей интенсивных спиновых волн в условиях трехмагнотного распада в магнитных пленках.

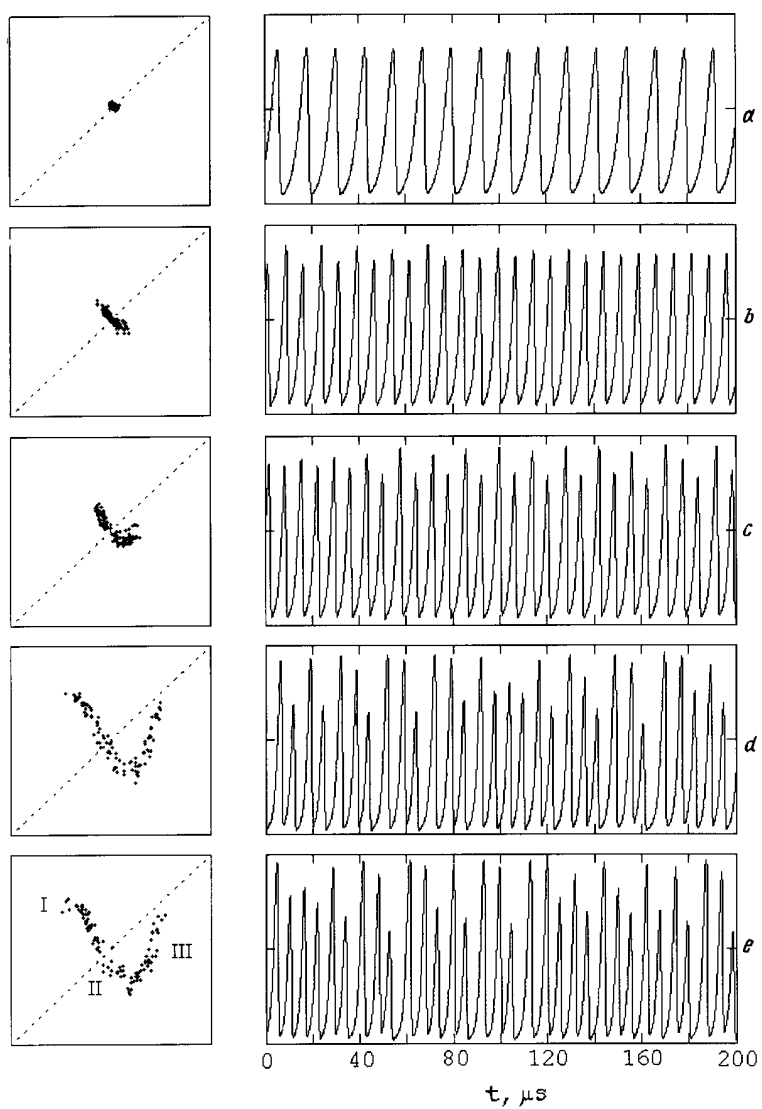
Эксперимент производился на установке, представляющей собой "кольцо", состоящее из спин-волновой линии задержки с усилителем СВЧ в цепи обратной связи. Такая схема позволяет обеспечить усиление во времени спиновой волны, ограниченное нелинейными эффектами в магнитной пленке. Для изменения коэффициента усиления в "кольце"  $\gamma$  последовательно с усилителем включался регулируемый аттенюатор. Макет линии задержки помещался в постоянное магнитное поле, касательное к поверхности магнитной пленки. Его напряженность  $H_0$  изменялась в диапазоне 400–500 Ое. В эксперименте использовались пленки железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной  $17 \mu\text{m}$  с намагниченностью насыщения  $1750 \text{Cs}$  и линейным параметром диссипации  $0.5 \text{Ое}$ . Поверхностная спиновая волна возбуждалась и принималась с помощью микрополосковых преобразователей шириной  $30 \mu\text{m}$ , расположенных на расстоянии  $5 \text{mm}$ . Интенсивность спиновой волны определялась путем детектирования сигнала на выходном преобразователе. Сигнал с детектора после усиления поступал на быстродействующий АЦП вычислительной машины.

При увеличении коэффициента усиления в "кольце" наблюдались возникновение автомодуляции спиновой волны и дальнейшая стохастизация ее огибающей. Сценарий перехода к хаосу оказался очень чувствительным к величине внешнего подмагничивающего поля  $H_0$  и к значению волнового числа спиновой волны  $k$ . Был произведен ряд измерений временных реализаций интенсивности спиновой волны. Осциллограммы огибающей, записанные при значениях  $H_0 = 496$  и  $472 \text{Ое}$  соответственно показаны на рис. 1 и 2 в правых колонках. Несущие частоты спиновых волн составляли  $3200$  и  $3100 \text{MHz}$ , а их волновые числа —  $85$  и  $77 \text{cm}^{-1}$  соответственно. Осциллограммы  $a-e$  снимались при последовательном увеличении коэффициента усиления в "кольце"  $\gamma$ . В первом случае переход к хаосу происходил через ряд бифуркаций удвоения периода. При этом наблюдались двух- и четырехпериодические колебания, после которых огибающая приобретала явно стохастический характер. Во втором случае переход к хаосу не описывался никаким из известных модельных сценариев.

По полученным временным реализациям были построены зависимости абсолютного значения последующего максимума на осциллограмме



**Рис. 1.** Точечные отображения и осциллограммы огибающей при  $H_0 = 496$  Ое и  $\gamma = 0.4-0.7 \mu\text{s}^{-1}$ .



**Рис. 2.** Точечные отображения и осциллограммы огибающей при  $H_0 = 472 \text{ Oe}$  и  $\gamma = 0.1 - 0.3 \mu s^{-1}$ .

от предыдущего. Такое построение определяет функцию последования точек прокола траекториями аттрактора секущей поверхности Пуанкаре, параметризуемой условием максимальности данной координаты в фазовом пространстве — точечное отображение [5]. Полученные отображения представлены на рис. 1 и 2 в левых колонках. Видно, что в обоих случаях отображения имеют качественно одинаковый вид. Они представляют собой кривую с двумя экстремумами, близкими к параболическим, но имеющими существенно различную кривизну (рис. 1 *e*, 2 *e*). Однако количественные отличия отображений приводят к существенно различной динамике огибающей спиновых волн.

Для удобства анализа разобьем отображение на три области: I — ветвь до первого экстремума, II — ветвь между экстремумами, III — ветвь за вторым экстремумом.

В первом случае изображающая точка движется на ветвях I и II параболы первого экстремума в областях кривой, где ее производная больше единицы (растягивающее отображение). Согласно теории Фейгенбаума [6], этих условий достаточно, чтобы колебания огибающей испытывали каскад бифуркаций удвоения периода. Из первых трех отображений рис. 1 видно, что так оно и происходит. Однако с увеличением коэффициента в "кольце" отображение изменяется. При этом области, посещаемые изображающей точкой, перемещаются ко второму экстремуму, где производная кривой становится меньше единицы (сжимающее отображение). В результате удвоения прекращаются, а движение распространяется на все отображение. Таким образом, в системе не реализуется в чистом виде сценарий перехода к хаосу через удвоения периода, что связано с отличием отображения от параболического. Однако наличие параболических участков приводит к возможности существования серии удвоений.

Во втором случае движение изображающей точки изначально локализовано на ветви II. По-видимому, это связано с тем, что рабочая часть отображения сдвинута в сторону второго экстремума, то есть рабочими являются ветви II и III. В то же время эти ветви обладают существенно разными производными: ветвь II — растягивающая, ветвь III — сжимающая. В результате при увеличении коэффициента усиления движение изображающей точки распространяется с ветви II на ветвь III по мере увеличения ее производной. При этом колебания огибающей стохастизированы изначально, а эволюция режима колебаний происходит в направлении увеличения глубины скачков максимумов интенсивности

спиновой волны. Таким образом, рассмотренное отображение допускает не только "мягкий", но и "жесткий" переход к стохастичности.

Следует отметить, что двумя представленными вариантами не исчерпываются наблюдавшиеся нами сценарии перехода к хаосу огибающей спиновых волн в ферромагнитных пленках. Они описаны здесь для того, чтобы показать, что даже такие на первый взгляд различные пути стохастизации порождены качественно подобными отображениями.

Переход к хаосу огибающей спиновых волн был исследован в диапазоне полей подмагничивания 400–500 Ое и в диапазоне волновых чисел от 30 до 150 см<sup>-1</sup>. При этом все полученные точечные отображения были подобны описанным выше. Таким образом, можно сказать, что переход огибающей спиновых волн обладает общими свойствами при различных значениях  $H_0$  и  $k$ , несмотря на богатство реализующихся сценариев этого перехода.

Результаты работы позволяют утверждать, что стохастическая динамика интенсивных спиновых волн, реализующаяся в условиях трехмагнитного взаимодействия в магнитных пленках, описывается сравнительно простыми одномерными точечными отображениями. Они являются универсальными в широком диапазоне напряженностей внешнего магнитного поля и волнового числа спиновой волны.

Авторы выражают искреннюю признательность Борису Антоновичу Калиникошу за обсуждение результатов работы.

Данная работа профинансирована Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96–02–19515) и Министерством общего и профессионального образования Российской Федерации (грант 97–8.3–13).

## Список литературы

- [1] *Benner H., Henn R., Roedelsperger F.* и др. // Изв. вузов. "ПНД". 1995. Т. 3. N 1. С. 32–50.
- [2] *Смирнов А.И.* // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. В. 1. С. 385–397.
- [3] *Медников А.М.* // ФТТ. 1981. Т. 23. N 1. С. 242–245.
- [4] *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. В. 4. С. 243–246.
- [5] *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1992. 454 с.
- [6] *Feigenbaum M.J.* // J. Stat. Phys. 1978. V. 19. P. 25.