

05:09:11

## **Параметрическая регенерация спиновых колебаний пленочного ферромагнитного резонатора сверхвысокочастотной накачкой**

© Б.А. Калиникос, Н.Г. Ковшиков, Е.А. Оспанов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 15 мая 1997 г.

Экспериментально исследована регенерация потерь спиновых колебаний пленочного ферромагнитного резонатора параметрической накачкой. Обнаружено, что эффективная регенерация происходит только в узких частотных интервалах, расположенных в зонах сильной дисперсии вблизи дипольных "щелей" в спектре спиновых волн пленок с ограниченной подвижностью поверхностных спинов. Показано, что с помощью сверхвысокочастотной параметрической накачки можно существенно увеличить добротность дипольно-обменных спиновых колебаний пленочного резонатора.

Недавно впервые сообщалось об использовании четырехволнового параметрического процесса для усиления бегущих спиновых волн в пленках железиттриевого граната (ЖИГ) [1]. В указываемой работе наблюдалось усиление слабой (сигнальной) спиновой волны бегущей спиновой волной накачки конечной амплитуды. Волны сигнала и накачки имели близкие частоты и распространялись в одном направлении. Несущие частоты волн выбирались в области сильной дисперсии вблизи одной из дипольных "щелей" в спектре спиновых волн. Теоретическая модель, предложенная в [1], показывает, что четырехволновой параметрический процесс, приводящий к усилению бегущих спиновых волн, может быть использован и для регенерации стоячих спиновых волн. Иными словами, четырехволновое параметрическое взаимодействие может быть использовано для регенерации потерь собственных колебаний пленочных ферромагнитных резонаторов.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование регенерации потерь собственных колебаний пленочного ферромагнитного резонатора сверхвысокочастотной (СВЧ) параметрической накачкой.

При этом, как и в [1], сигнал и накачка имели близкие частоты, лежащие в зонах сильной дисперсии спиновых волн.

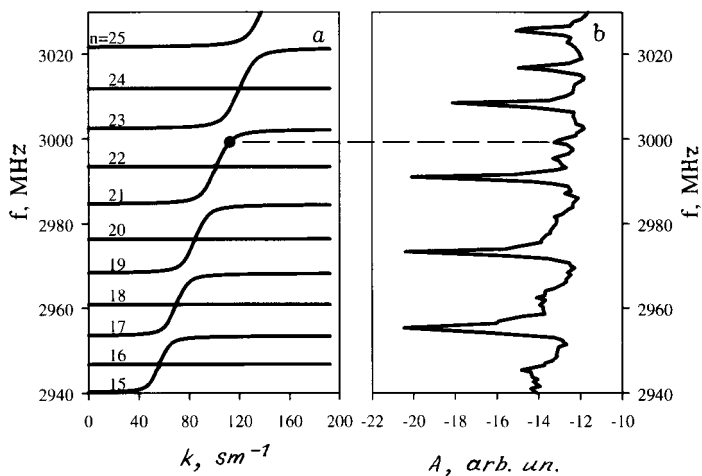
Исследуемый резонатор был изготовлен из высококачественной (полуширина кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 0.6 \text{ Э}$ ) монокристаллической пленки ЖИГ толщиной  $L = 9 \text{ мкм}$ , выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната ориентации [111]. Для опытов была взята пленка с закрепленными поверхностными спинами. Как было теоретически и экспериментально показано ранее [2,3], в спектре спиновых волн таких пленок имеются зоны сильной дисперсии. Экспериментально эти зоны проявлялись в виде "провалов" на амплитудно-частотной характеристике передачи СВЧ сигнала.

Для получения многорезонансного спектра спиновых колебаний размеры пленочного резонатора в его плоскости были выбраны равными  $4 \times 12 \text{ мм}$ . При этом меньший размер обеспечивал формирование стоячих спиновых волн — спиновых колебаний — с близко расположенными резонансными частотами. Часть резонансных частот этих колебаний находилась в зонах сильной дисперсии. Большой размер пленочного резонатора практически не оказывал влияния на формирование спектра собственных частот колебаний, так как его величина была больше длины пробега спиновой волны.

Макет, на котором проводились исследования, состоял из поликоревой пластины, на которой фотолитографически была сформирована микрополосковая антенна спиновой волны шириной  $50 \text{ мкм}$  и длиной  $4 \text{ мм}$ , а также подводящая полосковая линия. Исследуемый пленочный образец накладывался сверху антенны, причем продольные оси образца и антенны совпадали. Образец однородно намагничивался перпендикулярно его поверхности.

Возбуждение спин-волновых колебаний осуществлялось СВЧ сигналом, подаваемым на антенну макета с генератора через направленный ответвитель. Сигнал накачки подавался на ту же антенну с аналогичного генератора через усилитель СВЧ. Измерения проводились по схеме "на отражение". Для регистрации отраженного сигнала использовался анализатор спектра.

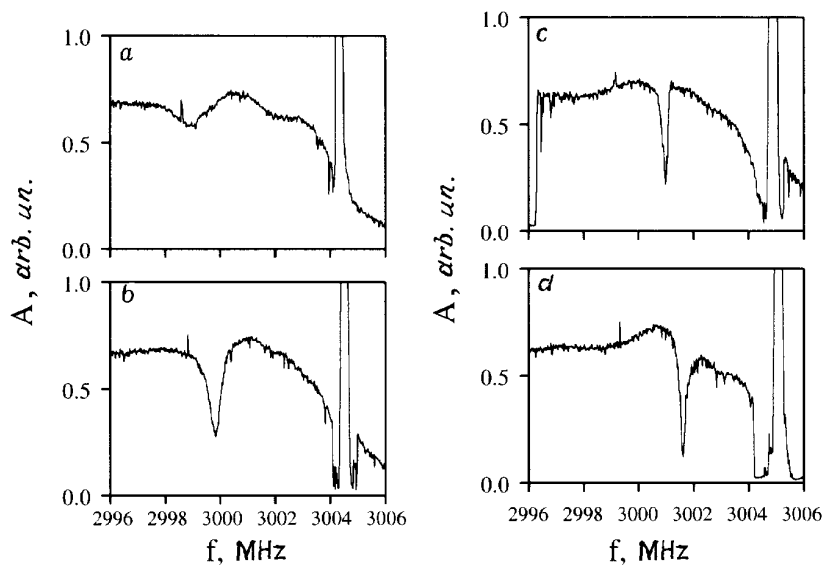
Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе исследовался спектр собственных колебаний резонатора. Результаты измерений спектра показаны на рис. 1, *b*. Для наглядности экспериментальные данные совмещены с теоретически рассчитанным спектром дипольно-обменных спиновых волн  $A(\text{рис. 1, } a)$ . При расчете использовались параметры



**Рис. 1.** Теоретический спектр спиновых волн (*a*) и экспериментальная частотная зависимость коэффициента отражения (*b*) для исследуемой пленки железо-иттриевого граната. Пунктиром отмечена резонансная частота дипольно-обменного спинового колебания, использованного для параметрической регенерации.

экспериментального образца: толщина  $L = 9$  мкм, намагниченность насыщения  $M_0 = 1750$  Э, константа неоднородного обменного взаимодействия  $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>, состояние поверхностных спинов — закрепленное. Для рассчитанного спектра характерным является наличие зон "расталкивания" дисперсионных кривых. Эти зоны расталкивания — дипольные "щели" — образуются в окрестностях точек вырождения основной моды с высшими модами, имеющими нечетные номера  $n$ . Ранее этот вопрос подробно обсуждался в работах [2–4].

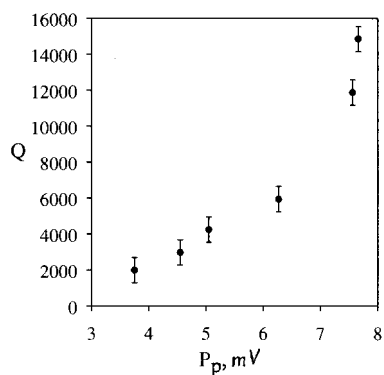
Экспериментальная кривая на рис. 1, *b* показывает зависимость относительной амплитуды резонансных колебаний от частоты. Как ясно из сопоставления частей (*a*) и (*b*) рис. 1, резонансы, отвечающие слабодисперсионным участкам спектра, имеют большую интенсивность по сравнению с резонансами, которым отвечают сильнодисперсионные участки спектра.



**Рис. 2.** Изменение формы резонансного пика, отвечающего параметрически регенерируемому спиновому колебанию, с увеличением мощности накачки  $P_p$ :  $a$  — 3.7 мВт,  $b$  — 5.05 мВт,  $c$  — 7.56 мВт,  $d$  — 7.66 мВт.

Целью второго этапа эксперимента было исследование регенерации потерь резонансных колебаний в резонаторе. Эта часть эксперимента выполнялась следующим образом. Сначала изучалось поведение спин-системы образца при подаче только одного гармонического сигнала — сигнала накачки — с изменением его мощности и перестройке несущей частоты. В ходе этих измерений была зарегистрирована модуляционная неустойчивость ряда собственных колебаний резонатора, находящихся в зонах сильной дисперсии.<sup>1</sup> В частности, порог модуляционной неустойчивости для резонансного колебания, расположенного на частоте  $f_s = 2999$  МГц, которое в дальнейшем было выбрано в качестве рабочего колебания, составил  $P_{th} = 7.71$  мВт. Затем при одновременной подаче двух частот — сигнала и накачки — изучалось измерение добротности

<sup>1</sup> Подробное обсуждение картины модуляционной неустойчивости выходит за рамки настоящей работы.



**Рис. 3.** Зависимость добротности дипольно-обменного спинового колебания от мощности накачки.

собственного типа колебаний при изменении мощности накачки ниже порога модуляционной неустойчивости. При этом выбранная частота сигнала  $f_s$  поддерживалась постоянной (резонансной для одного из типов колебаний), а частота накачки  $f_p$  перестраивалась в широких пределах. Подчеркнем, что в ходе эксперимента параметрически накачивались все резонансы, но эффективная регенерация потерь наблюдалась только в пиках колебаний малой интенсивности, частоты которых лежали в окрестностях дипольных "щелей" в спектре спиновых волн. Иными словами, было обнаружено, что эффективно регенерировались только те типы колебаний, которые были образованы сильнодисперсионными спиновыми волнами.

Данные измерений зависимости формы резонансного пика с начальной частотой  $f_s=2999$  МГц при подаче накачки на частоте  $f_p = 3005$  МГц показаны на рис. 2. При поддержании уровня сигнала на уровне  $P_s = 2.1$  мкВт и изменении уровня накачки от слабого до порового значения происходила компенсация потерь, что проявлялось в уменьшении ширины исследуемого пика. Кроме того, происходил нелинейный сдвиг частоты  $f_s$ . Максимальный эффект регенерации наблюдался при расстоянии между частотами накачки и сигнала  $f_p - f_s = 3.5$  МГц.

Зависимость нагруженной добротности от мощности волны накачки  $P_p$  приведена на рис. 3. Добротность определялась обычным выраже-

нием  $Q = f_s/\Delta f$ , где  $f_s$  — резонансная частота, а  $\Delta f$  — ширина резонансного пика на уровне половинной мощности. Как видно из рисунка, увеличение мощности накачки в 2 раза дает увеличение добротности примерно в 7 раз. Максимальное значение добротности равнялось  $Q_{\max} = 15\,000$ . Отметим, что при увеличении мощности накачки переход регенерации в режим генерации не наблюдался. Причинами отсутствия генерации, по-видимому, являются, во-первых, достаточно большая связь резонатора с внешней цепью и, во-вторых, неустойчивость, возникающая выше порога  $P_{\text{th}}$ .

В заключение отметим, что в работе экспериментально исследован пленочный резонатор дипольно-обменных спиновых волн в условиях параметрической накачки на частоте, мало отличающейся от частоты сигнала. Показано, что с помощью сигнала накачки можно регенерировать потери и существенно увеличить добротность спиновых колебаний.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 96-02-19515, а также Министерства образования, науки, исследований и технологии Германии, грант № 50ТТ9606.

## Список литературы

- [1] Kalinikos B.A., Kovshikov N.G., Kostylev M.P., Benner H. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. В. 3. С. 160–165.
- [2] Kalinikos B.A., Slavin A.N. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. V. 19. P. 7013–7033.
- [3] Калинин Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 159–176.
- [4] Луговской А.В., Зильберман П.Е. // ФТТ. 1982. Т. 24. В. 2. С. 458–462.