

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СПИНОВЫХ ВОЛН В ФЕРРИТОВОЙ ПЛЕНКЕ

А.Г. Темирязов

Обнаружена нестабильность спиновых колебаний в магнитной пленке, наблюдающаяся при крайне низких уровнях мощности накачки в узком частотном интервале вблизи нижней границы спектра магнитоэлектрических волн. Показано, что для интерпретации данного явления необходим учет запаздывания. Выполнены оценки ряда параметров нестабильности.

Эксперимент. Возбуждение спиновых колебаний осуществлялось с помощью отрезка несимметричной полосковой линии передачи СВЧ мощности шириной 0,5 мм, длиной 2,5 см, выполненной на подложке из поликора толщиной 0,5 мм. Один из концов линии был разомкнут, на второй подавался монохроматический СВЧ сигнал с частотой $f = \omega/2\pi = 5468$ МГц. Пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) накладывалась на антенну и помещалась в магнитное поле H_0 перпендикулярное плоскости пленки. Исследовался уровень СВЧ мощности, отраженной от антенны $P_{отр}$ и спектральный состав отраженного сигнала при изменении величины магнитного поля H_0 и мощности подаваемого на антенну СВЧ сигнала $P_{пад}$. Зависимость $P_{отр}(H_0)$ при $P_{пад} = 10$ мкВт приведена на рис. 1. Представленные экспериментальные

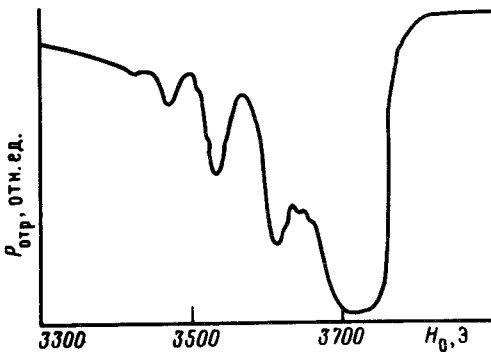


Рис. 1. Зависимость отраженной мощности от магнитного поля

результаты соответствуют эпитаксиальной пленке ЖИГ ориентации (111) толщиной $S = 11$ мкм, имеющей ширину линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H = 0,38$ Э. Из рис. 1 видно, что при полях $H_0 < H_{01}$ (где $H_{01} = \omega/\gamma + 4\pi M$, γ — гиромагнитное отношение, $4\pi M$ — намагниченность насыщения, $H_{01} \approx 3753$ Э при $4\pi M = 1800$ Э) величина отраженного сигнала резко падает, что свидетельствует о поглощении мощности при возбуждении магнитных колебаний. Образец имел неправильную форму с максимальным размером ~ 3 см, поэтому отдельные резонансы с шириной линии $\sim 2\Delta H$ не наблюдаются — различные типы колебаний сливаясь образуют сплошной спектр поглощения с плавной огибающей. Исследование спектрального состава отраженного сигнала показывает, что при полях, лежащих в узком интервале на правой границе зоны поглощения, в спектре сигнала появляются частоты-спутники, свидетельствующие о возникновении нестабильности. Порог нелинейных явлений соответствовал $P_{пад} \approx 3$ мкВт. С ростом $P_{пад}$ диапазон магнитных полей, в котором наблюдалась нестабильность, расширялся, а число спутников увеличивалось. Спектр сигнала при $P_{пад} = 10$ мкВт приведен на рис. 2а. Увеличение падающей мощности до 1 мВт приводило к образованию шумового спектра — рис. 2б, однако, и в этом случае нелинейные явления регистрировались лишь при полях $3730 \text{ Э} < H_0 < 3820 \text{ Э}$, то есть на правом крае зоны поглощения.

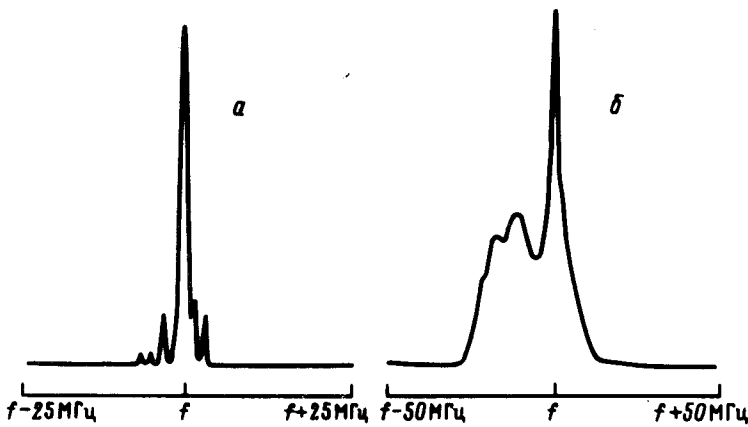


Рис. 2. Спектр отраженного сигнала при $f = 5468$ МГц: а - $P_{\text{пад}} = 10$ мкВт, $H_0 = 3759$ Э; б - $P_{\text{пад}} = 1$ мВт, $H_0 = 3773$ Э

Обсуждение эксперимента. Покажем, что наблюдающиеся нелинейные эффекты могут быть интерпретированы как модуляционная неустойчивость электромагнитно-спиновой волны (ЭСВ), то есть волны намагниченности с относительно большой длиной, такой, что при анализе подобного колебания необходим учет эффектов запаздывания.

При описании спиновых колебаний в магнитных пленках обычно пользуются магнитостатическим приближением. — уравнения Максвелла записывают в виде $\text{rot } \mathbf{H} = 0$, $\text{div } \mathbf{B} = 0$. Подобный подход оправдан, когда все характерные размеры исследуемого объекта (длина образца, длина спиновой волны и т.д.) много меньше величины $\lambda = c/(f\sqrt{\epsilon})$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость, c — скорость света. Для ЖИГ $\epsilon \sim 9$, следовательно $\lambda \sim 2$ см при $f \sim 5$ ГГц. Правый по магнитному полю край зоны поглощения соответствует спиновым волнам с большой длиной $\lambda_{\text{св}}$ (в магнитостатическом приближении $\lambda_{\text{св}} \rightarrow \infty$ при $H_0 = H_{01}$). Размеры образца также превышали величину λ . Отсюда видно, что для анализа процессов в области, где наблюдалась неустойчивость, необходим учет запаздывания.

Представим колебания, возникающие в образце, как суперпозицию бегущих волн. Пусть закон дисперсии нелинейных ЭСВ имеет вид $D(\omega, q, |\phi|^2) = 0$, где q — волновое число, $|\phi|^2$ — квадрат безразмерной амплитуды колебаний. Из общей теории нелинейных волн в диспергирующих средах (например, ¹) известно, что модуляционная неустойчивость волны может возникать, если выполняется критерий Лайтхилла $\omega''/\frac{\partial \omega}{\partial |\phi|^2} < 0$ (где $\omega'' = \frac{\partial^2 \omega}{\partial q^2}$ при $|\phi|^2 = 0$, то есть для линейной волны). Под модуляционной неустойчивостью понимается появление волны огибающей с частотой Ω и волновым числом k . При этом предполагается, что

$$\Omega \ll \omega, \quad k \ll q. \quad (1)$$

При отсутствии диссипации максимальный инкремент неустойчивости β , достигается при $k = k_0 = \sqrt{2|\beta|/|\omega''|}$. Величину k_0 можно оценить, считая, что при наличии диссипации неустойчивость начнет развиваться при $\beta \approx \omega_r$, где ω_r — частота релаксации. Тогда

$$k_0 = \sqrt{2|\omega_r|/|\omega''|}. \quad (2)$$

Таким образом при достижении некоторой пороговой амплитуды исходной волны можно ожидать появления волны огибающей с волновым числом $k = k_0$, если

$$k_0 \ll q, \quad (3)$$

то есть, если выполнено второе из условий (1), позволяющих использовать модель модуляционной неустойчивости при описании неустойчивости. Из (2) следует, что соотношение (3) может быть удовлетворено на участке закона дисперсии с большой кривизной, там, где $|\omega''|$ велика. Учет запаздывания позволяет найти подобный участок в спектре собственных колебаний ферромагнитной пленки.

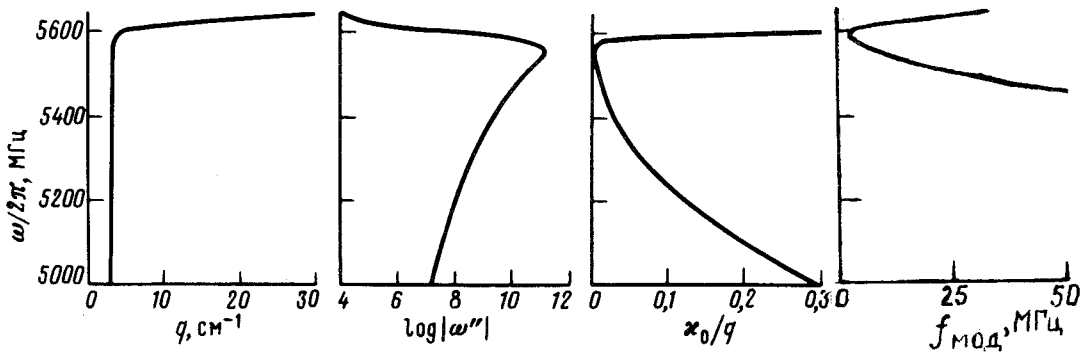


Рис. 3. Расчетные зависимости от частоты величин: q , $\log |\omega''|$, κ_0/q , $f_{\text{мод}}$ при $S = 10$ мкм, $\omega_p/2\pi = 1$ МГц, $4\pi M = 1800$ Э, $H_0 = 3800$ Э

Используя результаты работы ², можно построить закон дисперсии линейных ЭСВ и, кроме того, найти численными методами величины $|\omega''|$, κ_0 и отношение κ_0/q , а также оценить частоту модуляции, то есть величину отстройки частоты спутников от частоты исходной волны; $f_{\text{мод}} = \frac{\kappa_0}{2\pi} \frac{\partial \omega}{\partial q}$. Некоторые результаты подобного расчета приведены на рис. 3, из которого следует, что в спектре электромагнитно-спиновой (магнитодинамической) волны имеется область частот (вблизи нижней границы спектра магнитоэлектронных волн) в которой дисперсия очень велика. При $q \sim 3-5$ см⁻¹ значение $|\omega''|$ увеличивается на несколько порядков, уменьшается отношение κ_0/q , и хорошо выполняется строгое неравенство (3). Следовательно, на этом участке может развиваться модуляционная неустойчивость с максимальным инкрементом. С другой стороны именно в данной области, соответствующей краю зоны поглощения, экспериментально наблюдалась неустойчивость при пороговой мощности $P_{\text{пад}} \approx \approx 3$ мкВт, что на несколько порядков меньше чем в работах ³ и ⁴, где исследовались нелинейные эффекты внутри спектра магнитоэлектронных волн, и отношение κ/q было равно соответственно 0,3 и 0,75. Расчетное значение частоты модуляции ЭСВ, как видно из рис. 3, составляет единицы мегагерц, что согласуется с экспериментальными результатами (рис. 2а).

Следует отметить, что для наблюдения модуляционной неустойчивости ЭСВ требуется возбуждать волну с относительно большой длиной, соответствующей $q \sim 3$ см⁻¹. Поэтому необходимо, чтобы образец имел не слишком малые размеры, а возбуждающая антенна была достаточно широкой.

Автор благодарен П.Е.Зильберману и С.А.Никитову за полезное обсуждение работы.

Литература

1. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах, М.: Наука, 1973.
2. Панченко М.А. и др. ФТТ, 1978, 20, 1558.
3. Калинин Б.А. и др. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 936; ЖЭТФ, 1988, 94, 159.
4. Зильберман П.Е. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 92; Гуляев Ю.В. и др. ФТТ, 1986, 28, 2774; ФТТ, 1987, 29, 1794.

Поступила в редакцию
2 июня 1989 г.