

УДК 539.216.2 : 621.318.1

АВТОМОДУЛЯЦИЯ СПИН-ВОЛНОВЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ПЛЕНКАХ С ЛИНЕЙНЫМ ПРОФИЛЕМ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Л. В. Луцев, И. Л. Березин

Исследовано явление автомодуляции спин-волновых возбуждений в пленках ИЖГ с линейным профилем намагниченности по толщине. Характерной особенностью автомодуляции на этих пленках являются очень низкий пороговый уровень (десятые доли милливольт) для перпендикулярно намагниченной пленки и сильная зависимость порога автомодуляции от направления внешнего магнитного поля. Получены зависимости диапазона частот автомодуляции от входной мощности СВЧ сигнала, температуры, угла наклона пленки относительно направления постоянного магнитного поля и градиента намагниченности пленки.

Автомодуляция — достаточно известное явление, которое наблюдается в магнетиках при превышении мощности СВЧ сигнала некоторого порогового значения. Она изучалась на монокристаллических и поликристаллических образцах $Y_3Fe_5O_{12}$ (ИЖГ), $NiFe_2O_4$, $MgMn$ -феррита сферической и дискообразной формы [1-8] при продольной и поперечной накачке. Автомодуляция и переход к хаотическому режиму в антиферромагнитном $CsMnF_3$ исследовались в [9]. В [10-15] изучалась автомодуляция и переход к хаосу магнитостатических спиновых возбуждений в однородных по толщине пленках ИЖГ. Целью настоящей работы является выяснение особенностей автомодуляции, возникающей в пленках с линейным профилем эффективной намагниченности по толщине

$$(4\pi - \beta) M(z) = (4\pi - \beta) M_0 - 4\pi\mu z, \quad z \in [0, d],$$

где β — коэффициент одноосной анизотропии с осью, перпендикулярной поверхности пленки [16]; $4\pi M_0$ — намагниченность (максимальная) крайнего слоя пленки; $4\pi\mu$ — градиент намагниченности; d — толщина пленки.

Изучались пленки [111] $Y_3Fe_5O_{12} : Ga$ и $Y_3Fe_5O_{12} : Ga, La$. Значения толщин d , градиентов $4\pi\mu$ и максимальных эффективных намагниченностей $(4\pi - \beta) M_0$ приведены в таблице.

Явление автомодуляции спин-волновых возбуждений наблюдалось при изучении спин-волнового резонанса (СВР). Измерения проводились на образцах квадратной формы с размерами 4×4 мм на частоте 9.140 ГГц. Развертка осуществлялась изменением величины постоянного магнитного поля H . Частота автомодуляции измерялась по модуляции продетектированного СВЧ сигнала на экране осциллографа.

Одной из особенностей автомодуляции является то, что она наблюдается в определенных участках спектра СВР. При превышении пороговой мощности входного СВЧ сигнала при поперечной накачке вблизи частот (полей) СВР возникают области $A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ с промодулированным выходным СВЧ сигналом. На рис. 1 приведена часть спектра пленки № 5 при мощности входного сигнала $W=1.2$ мВт. Видны области автомодуляции A_1, A_2, B_1, B_2 вблизи первых мод СВР, соответствующие возбуждению слоев с максимальной намагниченностью. При увеличении W появляются области автомодуляции $A_3, A_4, \dots, B_3, B_4, \dots$ вблизи пиков

СВР с бóльшими n . Нами будут исследоваться только области A_1, A_2, B_1, B_2 вблизи порога возбуждения $W_{\text{пор}}$ ($W \sim 0 \div 1.2$ мВт). В этом случае автомодуляция носит синусоидальный характер.

Форма и существование областей A_1, A_2, B_1, B_2 зависят от направления развертки магнитного поля. При осуществлении развертки в направлении увеличения магнитного поля (рис. 1, а) области B_1, B_2 имеют протяженность $\delta H_B \sim 0.06$ Э, и частота автомодуляции f в них падает с ростом H . На границе областей B и A происходит удвоение частоты f (обратная бифуркация удвоения периода). При дальнейшем увеличении H частота f уменьшается, и вблизи краев A_1, A_2 , соответствующих наибольшим величинам постоянного магнитного поля, происходит срыв автоколебаний.

Области A_1, A_2 имеют гораздо бóльшую протяженность по сравнению с областями B_1, B_2 : $\delta H_{A_1} = 0.58$ Э, $\delta H_{A_2} = 0.50$ Э. Эти величины сохраняются при уменьшении W до порогового значения.

Если развертка осуществляется в направлении уменьшения H (рис. 1, б), области B_1, B_2 исчезают, а протяженность областей A_1, A_2 и амплитуда автоколебаний в них уменьшаются: $\delta H_{A_1} = 0.43$ Э, $\delta H_{A_2} = 0.36$ Э. Изменяется также и форма областей A_1, A_2 .

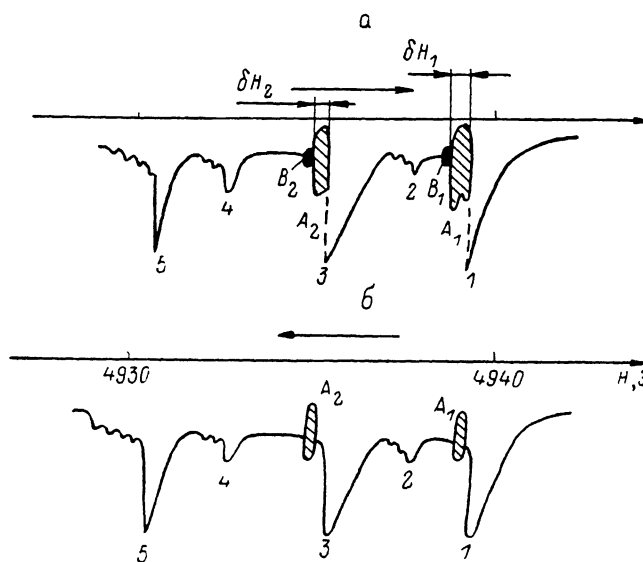


Рис. 1. Спектр СВР с областями автомодуляции A_1, A_2, B_1, B_2 пленки № 5 при увеличении (а) и уменьшении (б) магнитного поля.

$n=1, 2, 3, \dots$ — номер пика СВР.

К небольшому изменению протяженности, формы областей A_1, A_2, B_1, B_2 и амплитуды автоколебаний в них, а также частоты f приводил переход от квадратной формы образца к диску и к прямоугольной форме.

На рис. 2 показано изменение диапазона частот f в зависимости от мощности W входного СВЧ сигнала для перпендикулярно намагниченной пленки № 5. Нижние кривые для A_1, A_2 соответствуют краю этих областей при больших H (рис. 1, а), верхние — краю при меньших H . Средние точки областей A_1, A_2 имеют частоту f , лежащую между этими кривыми. При $W \sim 11$ мВт синусоидальный характер автомодуляции пропадает,

появляются высшие модуляционные моды. При $W > 20$ мВт в A_1 , A_2 автомодуляция носит хаотический характер.

На рис. 3 приведена угловая зависимость диапазона частот f для пленки № 5. Нижние и верхние кривые соответствуют двум краям областей A_1 , A_2 . Приведенные кривые показывают очень сильную зависи-

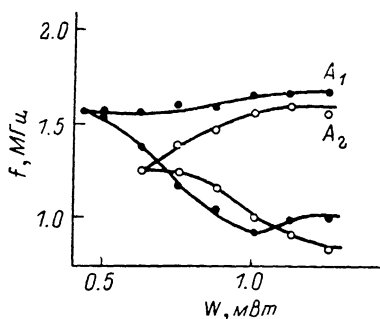


Рис. 2. Изменение диапазона частот синусоидальной автомодуляции в областях A_1 , A_2 в зависимости от мощности входного сигнала (пленка № 5).

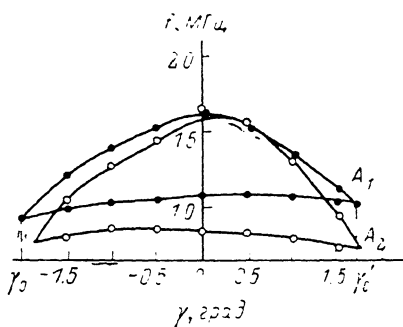


Рис. 3. Угловая зависимость диапазона частот синусоидальной автомодуляции в областях A_1 , A_2 (пленка № 5, $W=1.2$ мВт).

мость частоты автомодуляции от угла γ отклонения направления внешнего постоянного магнитного поля от нормали пленки. Углы γ_0 (γ'_0), при которых автомодуляция пропадает, уменьшаются с уменьшением W , но не стремятся к нулю. При $W=W_{\text{пор}}$ $\gamma_0=1.5^\circ$.

В температурной зависимости частотного диапазона автомодуляции областей A_1 , A_2 для пленки № 5 (рис. 4) обращает на себя внимание минимум нижней границы частоты f для A_1 при $T=55^\circ\text{C}$.

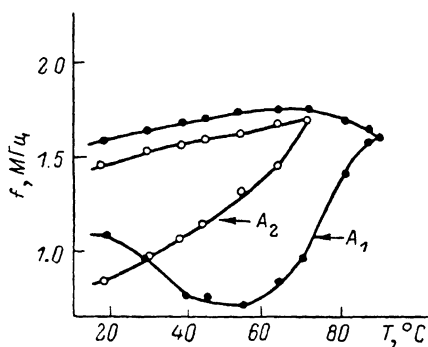


Рис. 4. Температурная зависимость диапазона частот синусоидальной автомодуляции в областях A_1 , A_2 (пленка № 5, $W=1.2$ мВт).

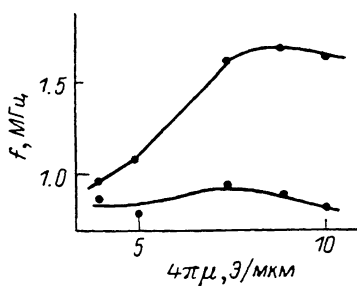


Рис. 5. Влияние градиента намагниченности на диапазон частот синусоидальной автомодуляции в области A_1 ($W=1.2$ мВт).

Зависимости диапазона частот автомодуляции f области A_1 от градиента намагниченности (рис. 5) построены по измерениям, проведенным на пленках № 1—5. Из рис. 5 видно, что с увеличением $4\pi M$ диапазон f увеличивается. Особенно заметен рост верхней границы частоты автомодуляции (край A_1 при меньших H).

В заключение следует отметить, что, как следует из эксперимента, перпендикулярно намагниченные пленки с неоднородностью намагниченности по толщине являются удобным объектом для изучения нелинейных спин-волновых явлений. Одной из особенностей автомодуляции является то, что она наблюдается в определенных участках спектра СВР. Исследования, проведенные на однородных по толщине пленках ИЖГ, показали, что автомодуляция в этих пленках наступает при значительно больших

подводимых мощностях ($W_{\text{пор}} \sim 300$ мВт для перпендикулярно и касательно намагниченных пленок). Следует также заметить, что такие же по порядку величины пороги автомодуляции имеют касательно намагниченные пленки № 1—5 ($W_{\text{пор}} \sim 290$ мВт для пленки № 5).

Л и т е р а т у р а

- [1] Моносов Я. А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М.: Наука, 1971. 376 с.
- [2] Дикштейн И. Е., Моносов Я. А., Сурин В. В. ФТТ, 1968, т. 10, № 6, с. 1907—1909.
- [3] Weiss M. T. Phys. Rev. Lett., 1958, vol. 1, N 7, p. 239—243.
- [4] Моносов Я. А., Сурин В. В. ФТТ, 1967, т. 9, № 4, с. 1246—1247.
- [5] Довченко Н. К., Бронкевич Ю. С. ФТТ, 1965, т. 7, № 11, с. 3417—3420.
- [6] De Aguiar F. M., Rezende S. M. Phys. Rev. Lett., 1986, vol. 56, N 10, p. 1070—1073.
- [7] Rezende S. M., de Aguiar F. M., de Alcantara Bonfim O. F. J. Magnetism and Magnetic Materials, 1986, vol. 54—57, pt III, p. 1127—1131.
- [8] Gibson G., Jeffries C. Phys. Rev. A, 1984, vol. 29, N 2, p. 811—818.
- [9] Смирнов А. И. ЖЭТФ, 1986, т. 90, № 1, с. 385—397.
- [10] Каликиос Б. А., Ковшиков Н. Г., Славин А. Н. Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 15, с. 936—940.
- [11] Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Никитов С. А., Темиряев А. Г. ФТТ, 1986, т. 28, № 9, с. 2774—2779.
- [12] Зильберман П. Е., Никитов С. А., Темиряев А. Г. Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 42, № 3, с. 92—94.
- [13] Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Никитов С. А., Темиряев А. Г. ФТТ, 1987, т. 29, № 6, с. 1794—1798.
- [14] Дудко Г. М., Казаков Г. Т., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 12, с. 736—740.
- [15] Медников А. М. ФТТ, 1981, т. 23, № 1, с. 242—245.
- [16] Ахизер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.

Поступило в Редакцию
5 ноября 1987 г.
В окончательной редакции
15 марта 1988 г.