

УДК 621.318

© 1991

**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ
ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
ПО ОТНОШЕНИЮ
К ЧЕТЫРЕХВОЛНЫМ ПРОЦЕССАМ РАССЕЯНИЯ
ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УПРУГИХ
И ВТОРИЧНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН**

А. С. Бугаев, В. Б. Горский, А. В. Помялов

Ранее указывалось, что в условиях фазового синхронизма по отношению к упругим волнам моды спин-волнового резонанса (СВР) связаны с упругой системой значительно сильнее, чем дипольные магнитоэластические колебания (МСК). В данной работе показано, что в нормально намагниченных ферритовых пленках (ФП) моды СВР являются основным продуктом четырехволнового рассеяния дипольных МСК при большой мощности накачки. В толстых ФП со сплошным спектром СВР комбинация двух указанных эффектов приводит к увеличению порога неустойчивости дипольных МСК по отношению к четырехволновым процессам рассеяния в определенной зоне полосы существования МСВ. В тонких ФП с дискретным спектром СВР указанные эффекты приводят к ярко выраженным частотным осцилляциям порога неустойчивости дипольных МСК вблизи уровня, характерного для частот вне зоны существования фазового синхронизма между упругими и вторичными спиновыми волнами.

В работе экспериментально исследовано влияние магнитоупругого взаимодействия на порог распадной неустойчивости дипольных магнитоэластических колебаний (МСК) в нормально намагниченных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ), выращенных на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Известно, что при мощности возбуждающего СВЧ поля выше некоторого порогового значения P_0 МСК становятся неустойчивыми по отношению к процессам четырехмагнотонного рассеяния [1]. А именно начиная с мощности P_0 МСК параметрически возбуждают вторичные спиновые волны (СВ) примерно на частоте возбуждающего СВЧ поля. В настоящей работе рассмотрен случай резонансного взаимодействия вторичных СВ с упругими модами структуры пленка ЖИГ — подложка ГГГ. Под резонансным магнитоупругим взаимодействием понималось взаимодействие СВ с упругой системой в условиях фазового синхронизма, т. е. при частотах и магнитных полях, соответствующих окрестности точки пересечения дисперсионных кривых обменных СВ и упругих волн (УВ) (так называемая точка кроссовера). Исследовано влияние такого резонансного взаимодействия на пороговую мощность P_0 неустойчивости МСК.

1. Ранее в нелинейных процессах указанное резонансное магнитоупругое взаимодействие наблюдалось только при продольной накачке в первой зоне параметрического возбуждения [2, 3] или при трехволновом параметрическом распаде поверхностной магнитоэластической волны (МСВ) [4]. Резонансное взаимодействие проявлялось в увеличении порога параметрического возбуждения для СВ с частотами и волновыми числами, соответствующими точке кроссовера [2-4]. Увеличение порога возбуждения было связано с увеличением параметра релаксации ΔH_x СВ, вызванным эффективной передачей энергии от СВ в упругую систему. Попытки об-

наружить влияния резонансного магнитоупругого взаимодействия в второй зоне параметрического возбуждения СВ или на порог четырехмагнетонной неустойчивости МСК проводились и ранее [5]. Однако никакого влияния обнаружено не было. Между тем эффективное возбуждение УВ вторичными СВ должно было приводить, как и в случае параллельной накачки, к увеличению порога неустойчивости МСК. Рассмотрим, почему указанный эффект не наблюдался ранее и что позволило наблюдать его в настоящей работе. Отсутствие изменения порога возбуждения СВ в предшествующих работах исследователи объясняли сильной некогерентностью по волновому числу пакета параметрически возбужденных СВ [5]. Действительно, с упругой системой взаимодействует лишь та малая часть СВ, для которой волновые векторы СВ совпадают с волновым вектором упругой волны. При сильной некогерентности большая часть параметрически возбужденных СВ с упругой системой не взаимодействует, и в результате на фоне этого большого числа СВ увеличения порога возбуждения СВ, резонансно связанных с упругой системой, экспериментально не наблюдается [5].

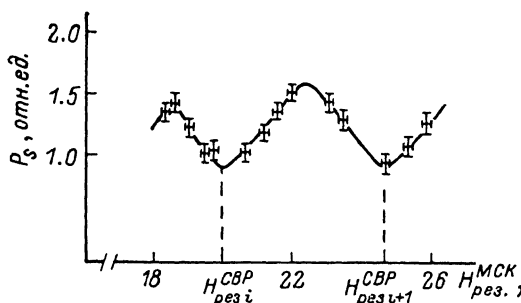


Рис. 1. Зависимость пороговой мощности P_s для параметрической неустойчивости дипольного МСК от величины его резонансного магнитного поля $H_{рез}^{MCK}$.

$H_{рез i}^{СВР}$ — резонансные магнитные поля мод СВР Толщина пленки ЖИГ $d=2,75$ мкм.

Однако во всех предшествующих работах исследования проводились в объемных кристаллах. В нашей работе исследовались планарные структуры ферритовая пленка—подложка, где в отличие от объемного монокристалла, во-первых, один из характерных размеров — толщина пленки — сравним по величине с длинами возбуждаемых волн, а во-вторых, структура пленка—подложка представляет собой высокочастотный резонатор УВ. Уменьшение линейных размеров области взаимодействия спиновых и упругих волн в пленках по сравнению с объемными кристаллами значительно снижает требования к монохроматичности СВ для их эффективной связи с упругой системой. Действительно, для эффективного возбуждения в ферритовой пленке толщиной d упругого колебания спиновой волной достаточно, чтобы их волновые числа отличались не более чем на π/d , а наличие резонатора УВ значительно увеличивает эффективность возбуждения спиновыми волнами упругих колебаний. В результате в ферритовых пленках в отличие от объемных кристаллов наблюдается ярко выраженное влияние резонансного взаимодействия упругих и вторичных спиновых волн на порог неустойчивости дипольных МСК.

2. Рассмотрим особенности протекания процессов четырехмагнетонного взаимодействия в пленочных образцах. В работе [1] было показано, что в объемных кристаллах при параметрическом возбуждении СВ однородной прецессией наименьшую пороговую мощность возбуждения имеют СВ с волновым вектором k_x , параллельным магнитному полю H . Вполне вероятно, что и в пленочных образцах порог возбуждения будет также минимален для СВ с $k_x \parallel H$. Для нормально намагниченных пленок спиновые возбуждения с $k_x \parallel H$ являются одновременно модами спиновых резонансов (СВР). В тонких ферритовых пленках спектр СВР

дискретен, поэтому порог неустойчивости дипольных МСК зависит от положения МСК в спектре МСВ и оказывается минимальным при совпадении его резонансного магнитного поля $H_{рез}^{МСК}$ с резонансным магнитным полем $H_{рез}^{СВР}$ одной из мод СВР. Это подтверждается экспериментом (рис. 1). Здесь и далее за величину пороговой мощности P_s неустойчивости дипольных МСК принималась мощность возбуждающего СВЧ поля, при которой начиналось уменьшение магнитной восприимчивости [5].

Таким образом, в нормально намагниченных ферритовых пленках спин-волновыми модами, имеющими минимальный порог параметрического возбуждения, являются моды СВР.

При проведении эксперимента для точного определения резонансных полей мод СВР $H_{рез}^{СВР}$ в спектре дипольных МСК использовались пленки со слабо закрепленными поверхностными спинами. Действительно, в этом случае моды СВР возбуждались не только параметрически, но и непосредственно СВЧ полем, что позволяло определять относительную раздвижку резонансных полей моды СВР и дипольного МСК.

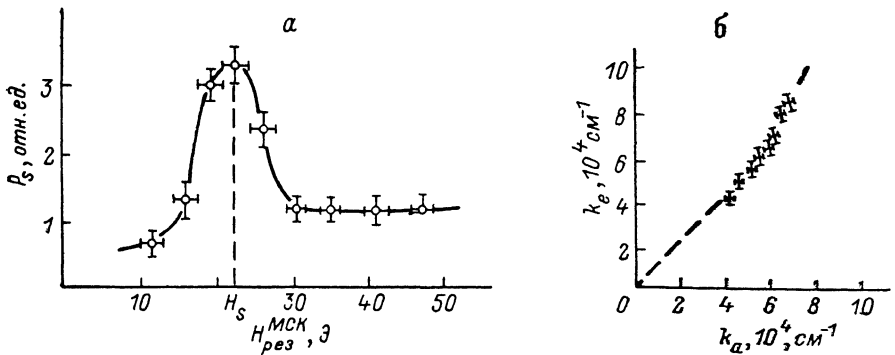


Рис. 2. Зависимость пороговой мощности P_s дипольных МСК от величины их резонансного поля $H_{рез}^{МСК}$ (величина $H_{рез}^{МСК}$ отсчитывается от начала спектра МСВ) (а) и расчетное значение $k_\alpha = \sqrt{H_s/4\pi M\alpha}$ волнового числа моды СВР, с резонансным магнитным полем, равным H_s (б).

б: H_s — поле, при котором наблюдается увеличение P_s МСК (величина H_s отсчитывается от начала спектра МСВ); α — константа неоднородного обмена; M — намагниченность насыщения пленки; k_α — волновое число упругой волны, задаваемое частотой возбуждения f : $k_\alpha = 2\pi f/V_s$. V_s — скорость упругой волны. Частота возбуждения изменялась от 2 до 4.5 ГГц.

Следует отметить, что измерение порога неустойчивости проводилось для основного дипольного МСК, ближайшего к началу спектра МСВ, поэтому могла наблюдаться только неустойчивость с возбуждением высших толщинных обменных мод. Возбуждение мод, принадлежащих нижней дипольной ветви спектра МСВ было запрещено законами сохранения энергии и импульса.

При проведении эксперимента для возбуждения МСК использовался метод «магнитной ямы» [6]. При этом для изменения положения дипольного МСК в спектре локализованных МСК менялся диаметр магнитной ямы D [7]. Действительно, диаметр D определяет волновые числа q локализованных МСК в плоскости пленки, а следовательно, и их положение в спектре МСВ. Следует отметить, что резонансные магнитные поля мод СВР $H_{рез}^{СВР}$ от q зависят слабо, поэтому при изменении D $H_{рез}^{СВР}$ практически не менялись.

3. Рассмотрим, как влияет магнитоупругое взаимодействие на порог неустойчивости дипольных МСК в толстых ФП со сплошным спектром СВР. Экспериментально исследовалась зависимость порога неустойчивости P_s дипольных МСК от величины их резонансного магнитного поля $H_{рез}^{МСК}$. Известно [8], что наибольшую эффективность возбуждения упругих колебаний в планарной структуре ферритовая пленка—подложка следует ожидать на частотах отсечки мод Лэмба f_n . Следовательно, и наи-

более сильное влияние магнитоупругого взаимодействия на порог неустойчивости МСК должно наблюдаться на частотах f_i . Поэтому при измерениях частота возбуждения f выбиралась равной одной из частот f_i . На рис. 2, а представлена зависимость $P_s(H_{\text{рез}}^{\text{МСК}})$ при $f=4276.2$ МГц. Видно, что вблизи некоторого поля H_s дипольные МСК имеют повышенный порог неустойчивости P_s . Измерения зависимостей $P_s(H_{\text{рез}}^{\text{МСК}})$, проведенные на других частотах возбуждения, показали, что поле H_s , в окрестности которого наблюдается увеличение P_s , зависит от частоты. Причем, как показывает расчет, поле H_s совпадает с магнитным полем, при котором обменные СВ с $k_e \parallel \mathbf{H}$ имеют величину k_e , равную k_a , где k_a — волновое число УВ, задаваемое частотой возбуждения f (рис. 2, б). Таким образом, наблюдается увеличение порога неустойчивости дипольных МСК, вырожденных по магнитному полю с обменными СВ, волновые числа которых примерно совпадают с волновым числом УВ на заданной частоте возбуждения.

Увеличение порога неустойчивости дипольных МСК мы объясняем увеличением параметра релаксации ΔH_k вторичных СВ. Действительно, порог неустойчивости МСК пропорционален параметру релаксации ΔH_k вторичных СВ [1], а при фазовом синхронизме СВ по отношению к УВ происходит эффективное возбуждение упругих колебаний в структуре пленка—подложка, приводящее к увеличению ΔH_k .

Для каждого МСК существует свой диапазон частот $\delta\omega$, в пределах которого наблюдается увеличение его порога неустойчивости, аналогичное рис. 2, а. При этом, согласно рис. 2, б, центральная частота ω_s указанного диапазона $\delta\omega$ для каждого конкретного МСК определяется его резонансным магнитным полем $H_{\text{рез}}^{\text{МСК}}$, отсчитанным от начала спектра МСВ

$$\omega_s = V_s \sqrt{H_{\text{рез}}^{\text{МСК}}/4\pi M\alpha},$$

где M — намагниченность насыщения ферритовой пленки, α — константа неоднородного обменного взаимодействия, V_s — скорость УВ. В этом диапазоне частот $\delta\omega$ волновые числа обменных СВ, вырожденных по магнитному полю с МСК, примерно совпадают с волновым числом УВ. Ширина диапазона $\delta\omega$ связана с толщиной пленки d , так как эффективность связи моды СВР с упругой системой, согласно [7], определяется множителем $\sin [(k_e - k_a)/2] d / [(k_e - k_a)/2] d$. Поэтому для пленки толщиной d величина $\delta\omega$ порядка $\pi V_s/d$.

В экспериментах использовались пленки ЖИГ толщиной $d=10$ мкм с шириной резонансной кривой $2\Delta H=0.5$ Э, выращенные на подложке из ГГГ. Общая толщина структуры пленка—подложка $L=450$ мкм. Спины на поверхностях исследуемых пленок были не закреплены, так что в спектре ФМР наблюдались только дипольные МСК.

Наблюдаемое увеличение порога неустойчивости МСК P_s не могло быть вызвано непосредственным взаимодействием МСК с упругой системой, т. е. увеличением параметра релаксации $2\Delta H$ самих МСК на частотах f_i [9]. В противном случае увеличение P_s на частотах f_i наблюдалось бы для всех МСК. Однако с точностью до 5 % увеличения порога неустойчивости МСК, расположенных вне зоны резонансного магнитоупругого взаимодействия, не наблюдалось. Это объясняется тем, что дипольные МСК связаны с упругой системой значительно слабее, чем обменные СВ [10].

4. Описанное выше увеличение порога неустойчивости дипольных МСК наблюдается как в толстых, так и в тонких пленках ЖИГ. Однако в тонких пленках, где спектр СВР дискретен, помимо эффекта увеличения порога неустойчивости P_s на частотах отсечки f_i , на некоторых частотах f_i^* резонансное магнитоупругое взаимодействие приводит к уменьшению порога P_s . На рис. 3, а представлена частотная зависимость порога неустойчивости МСК, для которого вторичные СВ резонансно связаны с упругой системой. Видно, что на частотах f_i^* порог неустойчивости МСК

меньше порога неустойчивости этого же МСК, но в отсутствие фазового синхронизма между вторичными СВ и УВ (т. е. в другом частотном диапазоне, где $k_e \neq k_a$). Уменьшение P_s мы объясняем совпадением на частотах f_i^* резонансных магнитных полей дипольного МСК и одной из мод СВР. Действительно, в тонких пленках спектр СВР дискретен и в общем случае резонансные поля дипольных МСК и мод СВР не совпадают. В этом случае при неустойчивости МСК возбуждаются вторичные СВ с отличной от нуля компонентой q волнового вектора в плоскости пленки. Порог параметрического возбуждения таких СВ больше, чем мод СВР, для которых $q=0$ (рис. 1) [1]. Так как резонансное взаимодействие УВ и мод СВР, кроме увеличения ΔH_k , приводит к аномальной зависимости $H_{\text{рез}}^{\text{СВР}}$ от частоты возбуждения, то в зоне резонансного взаимодействия УВ и мод СВР на некоторых частотах f_i^* возможно точное совпадение $H_{\text{рез}}^{\text{МСК}}$ и $H_{\text{рез}}^{\text{СВР}}$ (рис. 3, б). В результате на частотах f_i^* при неустойчивости МСК возбуждаются моды СВР, для которых пороговая мощность P_s минимальна (рис. 1).

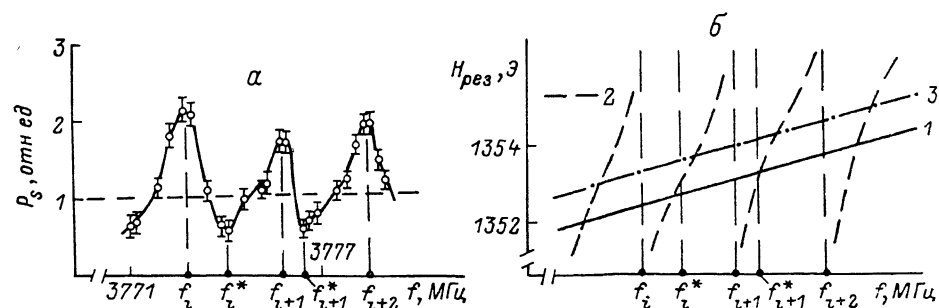


Рис. 3. Частотные зависимости порога неустойчивости дипольного МСК для пленки ЖИГ толщиной $d=2.7$ мкм (а) и резонансных магнитных полей для различных типов МСК (б).

а — спины на поверхности пленки не закреплены. Штриховая линия — уровень порога неустойчивости МСК на частотах возбуждения 2.3 и 5.6 ГГц. Волновые числа k_e мод СВР, вырожденных по магнитному полю с исследуемым МСК, примерно равны $6.9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. Волновые числа упругой волны k_a (см^{-1}) $\approx 6.9 \cdot 10^4$, $f=4.2$ ГГц, $\approx 7.7 \cdot 10^4$, $f=2.3$ ГГц, $\approx 9.1 \cdot 10^4$, $f=5.6$ ГГц, б 1 — дипольный МСК, 2 — мода СВР, $k_e=k_a$, 3 — мода СВР в отсутствие магнитоупругого взаимодействия.

5. Таким образом, в работе получены следующие результаты.

1) В нормально намагниченных ферритовых пленках при неустойчивости МСК по отношению к четырехмагнотным процессам рассеяния наименьший порог параметрического возбуждения имеют моды СВР. 2) Резонансное взаимодействие упругих и вторичных спиновых волн приводит к увеличению более чем в три раза порога неустойчивости дипольных МСК. Такое увеличение порога наблюдается в ферритовых пленках, где в отличие от объемного кристалла значительно снижается требование к монохроматичности вторичных СВ для их эффективного взаимодействия с упругой системой и, кроме того, увеличивается эффективность возбуждения спиновыми волнами упругих колебаний. 3) Дискретность спектра упругих возбуждений в структуре пленка—подложка приводит к периодической частотной зависимости порога неустойчивости дипольных МСК в зоне резонансного взаимодействия вторичных спиновых волн и упругих волн. Влияние упругой системы может носить реактивный характер, в результате которого магнитоупругое взаимодействие, практически не внося дополнительных потерь в магнитную систему, приводит к созданию выгодных условий для распада дипольных МСК в моды СВР, вызывая тем самым уменьшение порога неустойчивости МСК.

Список литературы

- [1] Suhl H. // Phys. Chem. Solids. 1957. V. 1. № 4. P. 209—239.
 [2] Olson F. // J. Appl. Phys. 1964. V. 34. № 4. Pt 2. P. 1281—1284.

- [3] Turner E. H. // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 5. № 3. P. 100—102.
- [4] Темиряев А. Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 313—319.
- [5] Моносов Я. А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. М., 1971. 376 с.
- [6] Калинин Б. А., Ковшиков Н. Г., Надеев М. М. // Тез. докл. Всес. конф. по физике магнитных явлений. Тула, 1983. С. 206.
- [7] Горский В. Б., Помялов А. В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 7. С. 61—64.
- [8] Гуляев Ю. В., Зильберман П. Е., Казаков Г. Т., Сысоев В. Г., Тихонов В. В., Филимонов Ю. А., Нам Б. П., Хе А. С. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 39. № 9. С. 500—504.
- [9] Ковшиков Н. Г., Сурин К. Г. // Тез. докл. XI Всес. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Ташкент, 1988. С. 393.
- [10] Bugaev A. S., Gorsky V. B., Pomyalov A. V. // Proc. of ISSWAS. Varna, 1989. P. 205—206.

Московский физико-технический институт

Поступило в Редакцию
20 апреля 1990 г.
В окончательной редакции
13 сентября 1990 г.