

Нелинейность магнитоакустических возбуждений в планарных структурах

© А.С. Бугаев, В.Б. Горский

Московский физико-технический институт,
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия

E-mail: dwhome@sbrf.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 13 ноября 2001 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований пороговых мощностей возникновения нелинейности магнитоакустических возбуждений в планарных структурах ферритовая пленка–диэлектрическая подложка в области фазового синхронизма высших толщинных магнитостатических и акустических мод. В условиях эксперимента высшие толщинные магнитостатические моды имели длину волны порядка или менее $1\ \mu\text{m}$, поэтому по отношению к началу спектра магнитостатических волн энергия этих возбуждений определялась энергией неоднородного обменного взаимодействия. Исследовались стоячие магнитоакустические волны в типичных пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) со свободными поверхностными спинами, где в обычных условиях в планарных резонаторах возбуждаются только дипольные магнитостатические колебания (МСК). Ранее было показано, что в области синхронизма обменных и акустических волн возникают дипольно-обменно-акустические возбуждения. Проведены исследования пороговой мощности возникновения неустойчивости прецессии этих возбуждений, а также сравнительный анализ пороговых мощностей дипольных МСК, обменно-акустических и дипольно-обменно-акустических возбуждений. Продемонстрировано существенное уменьшение пороговой мощности неустойчивости МСК при совпадении собственных частот дипольных и обменно-акустических колебаний.

В первых работах по влиянию магнитоакустических взаимодействий на нелинейные процессы, выполненных на объемных кристаллах [1,2], исследовались продольная и поперечная накачки спиновых волн (СВ). В [1] было обнаружено увеличение пороговой мощности продольной накачки при попадании вторичных СВ в область фазового синхронизма с упругими волнами, что объяснялось увеличением параметра релаксации вторичных СВ. В пленочных образцах вследствие многомодовости спектра магнитоакустических возбуждений магнитоупругое взаимодействие приводило к более широкому набору эффектов. Например, в работе [3], где экспериментально исследовалась продольная накачка СВ микрополосковым преобразователем, было обнаружено реактивное влияние упругой системы на порог возбуждения СВ. Взаимодействие СВ с акустическими приводило к изменению дисперсионных кривых, к уменьшению групповой скорости на некоторых частотах и к увеличению времени нахождения СВ в области накачки, что в результате уменьшало пороговую мощность накачки возбуждения таких СВ.

Следует отметить, что в ферритовых пленках в основном изучаются дипольные магнитостатические волны (МСВ), которые чаще всего и выступают в роли накачки при исследовании нелинейных процессов, а первая и вторая зоны параметрического возбуждения СВ являются областями трехмагнотного распада и четырехмагнотного рассеяния дипольной МСВ соответственно. Пороги параметрического возбуждения СВ совпадают с пороговыми мощностями неустойчивости МСВ к трехволновым процессам распада или к четырехволновым процессам рассеяния. В планарных структурах в силу возможности взаимодействия акустических волн (АВ)

с длинноволновыми дипольными МСВ влияние магнитоупругого взаимодействия обнаруживалось не только при участии обменных МСВ, но и тогда, когда сама первичная МСВ либо продукты ее распада, тоже дипольные МСВ, связаны с упругой системой. Например, в работе [4] наблюдалось понижение порога параметрической неустойчивости дипольной МСВ при условии ее фазового синхронизма в плоскости пленки с одной из мод Лэмба. Уменьшение порога объяснялось искажением дисперсионной кривой, что делало возможным распад дипольной МСВ на вторичные МСВ, коллинеарные первичной МСВ. Магнитоупругая связь обменных СВ при фазовом синхронизме с АВ намного сильнее магнитоупругого взаимодействия дипольных МСВ, и в настоящей работе мы остановимся именно на магнитоупругих эффектах с участием обменных МСВ.

Эксперимент проводился в планарных структурах — пленка ЖИГ на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Толщина пленок изменялась в пределах от 2 до $10\ \mu\text{m}$. Полная толщина структуры была около $450\ \mu\text{m}$. Измерения проводились в режиме стоячих волн, т.е. методом ферромагнитного резонанса. Использовались либо дисковые, либо квадратные образцы. Для локализации магнитостатических колебаний (МСК) в плоскости пленки применялся также метод неоднородного магнитного поля с профилем „магнитной ямы“. Использовались пленки со свободными поверхностными спинами, выращенные по стандартной технологии эпитаксиального роста; отсутствие поверхностного закрепления контролировалось по спектру возбуждаемых колебаний. При наличии поверхностного закрепления спинов в пленках наблюдались бы обменные возбуждения [15].

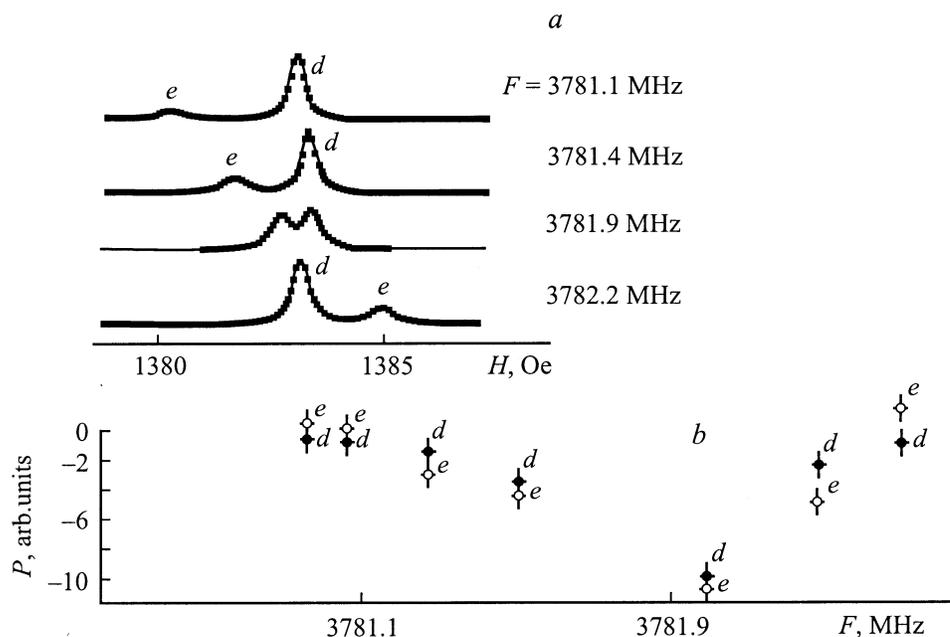


Рис. 1. а) Спектр магнитоакустических колебаний в дисковом резонаторе. Радиус локализации колебаний около $400\ \mu\text{m}$. Толщина пленки ЖИГ около $6\ \mu\text{m}$. Показан участок магнитных полей, соответствующий фазовому синхронизму высших толщинных и поперечных акустических волн при выбранных частотах возбуждений. б) Пороговая мощность внешнего возбуждающего электромагнитного поля возникновения неустойчивости колебаний, изображенных на части а, при различных частотах. *d* — колебание большей интенсивности с преобладанием дипольной энергии, *e* — обменно-акустическое колебание.

В отсутствие магнитоупругих эффектов в пленках наблюдались типичные чисто дипольные спектры МСК. Возбуждаемые колебания отличались друг от друга распределением переменной намагниченности в плоскости пленки. В случае дисковых резонаторов или для МСК, локализованных методом цилиндрической магнитной ямы, это был набор практически равноудаленных друг от друга колебаний, расстояние между которыми по магнитному полю в эксперименте составляло $8\text{--}15\ \text{Oe}$ и определялось выражением $\pi M d (\pi/D)$, где M и d — намагниченность насыщения и толщина ферритовой пленки соответственно, D — диаметр области локализации колебаний в плоскости пленки. Изменение частоты возбуждения при развертке спектра по магнитному полю приводило к плавному смещению спектра как единого целого. Для пленок со свободными поверхностными спинами распределение переменной намагниченности по толщине пленки для высших толщинных колебаний симметрично относительно середины пленки, интеграл перекрытия с внешним возбуждающим электромагнитным полем или с полем дипольных МСК равен нулю, так что эти колебания в отсутствие магнитоупругого взаимодействия не возбуждаются. Очищение спектра от акустических резонансов достигалось нарушением акустического резонатора, образованного противоположными поверхностями планарной структуры, например путем механической грубой шлифовки одной из сторон структуры.

Согласно [6], в области фазового синхронизма высших толщинных МСВ и АВ происходят сильные искажения спектра магнитоакустических возбуждений. Сильная магнитоупругая связь приводит к нарушению симметрии распределения переменной намагниченности собственных магнитоакустических возбуждений по толщине пленки. В результате в области частот и магнитных полей, соответствующих фазовому синхронизму СВ и АВ, возбуждаются дипольно обменно-акустические колебания со сравнимым соотношением дипольной, обменной и акустической энергий. Порог нелинейности этих колебаний и изучался в настоящей работе. Исследования проводились в начале спектра, так что трехмагнотные распады были запрещены законами сохранения энергии.

На рис. 1, а изображены экспериментальные спектры колебаний в области магнитоупругого синхронизма обменных СВ и поперечных АВ при развертке по магнитному полю для четырех различных частот. Колебание высокой интенсивности соответствует второму радиальному низшему толщинному дипольному колебанию. В отсутствие магнитоупругого взаимодействия в показанном диапазоне магнитных полей возбуждается только это колебание. Колебание меньшей интенсивности — обменно-акустическое. Положение обменно-акустического колебания в спектре периодически меняется с частотой. В энергиях обоих колебаний, названных нами дипольным и обменно-акустическим, присутствуют все три основные составляющие: дипольная, обменная и акустическая. При частоте $3781.9\ \text{MHz}$, когда условия

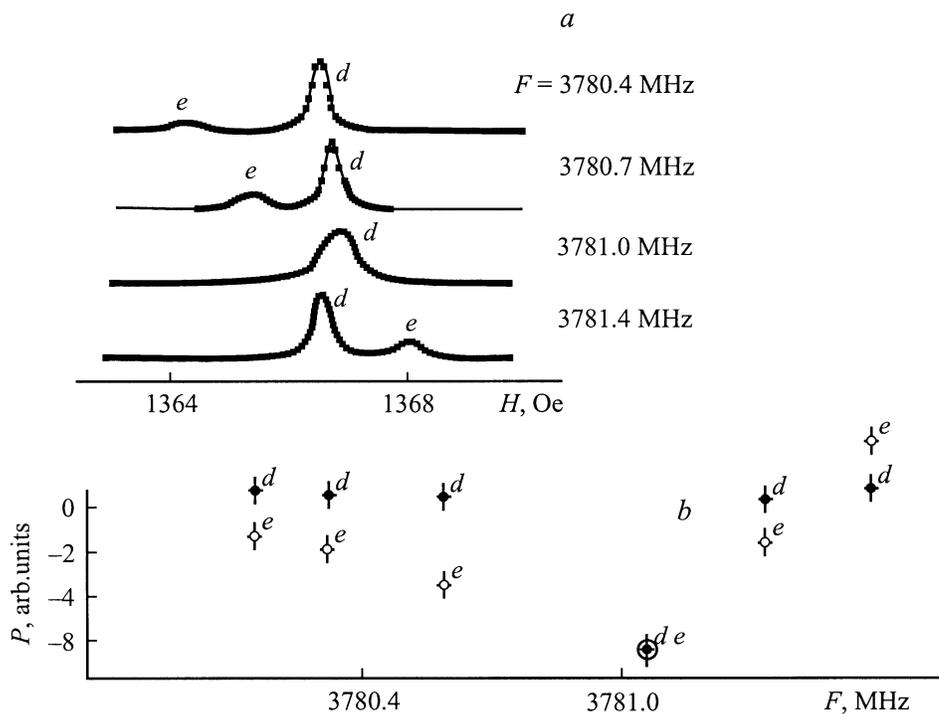


Рис. 2. а) Спектр магнитоакустических колебаний в дисковом резонаторе. Радиус локализации колебаний около $600\ \mu\text{m}$. Параметры структуры те же, что на рис.1. Показан участок магнитных полей, соответствующий фазовому синхронизму высших толщинных и поперечных акустических волн при выбранных частотах возбуждений. В отличие от рис. 1 дипольное взаимодействие колебаний слабее и расталкивание колебаний не превышает ширины резонансной кривой. б) Пороговая мощность внешнего возбуждающего электромагнитного поля возникновения неустойчивости колебаний, изображенных на части а, при различных частотах.

возбуждения дипольного и обменно-акустического колебаний совпадают, возбуждались два дипольно-обменно-акустических колебания.

На рис. 1, б для рассматриваемых колебаний представлены пороговые мощности, при которых начинались нелинейные процессы. Пороговая мощность возникновения нелинейности определялась тремя способами. В первом случае за пороговую мощность P_S (показанную на рисунках) принималась мощность СВЧ-генератора, при которой начиналось уменьшение магнитной восприимчивости, определяемой как отношение интенсивности поглощаемой мощности к энергии СВЧ-генератора. В качестве второй пороговой мощности бралась величина мощности СВЧ-генератора P_f , при которой в спектре отраженного сигнала появлялись частоты-сателлиты, отстоящие от частоты возбуждения примерно на 10 MHz. В качестве третьей величины (P_i) использовалась мощность, при которой на отраженном импульсном сигнале получался скол. В пределах 1 dB $P_f \approx P_i$, тогда как величина P_S была примерно на 3 dB меньше, чем P_f и P_i . Четко видно, что, несмотря на меньшую интенсивность, обменно-акустическое колебание вблизи дипольного колебания имеет меньший порог нелинейности, чем само дипольное колебание. Меньший порог нелинейности мы объясняем облегчением условий распада для обменно-акустических колебаний, вызванным иска-

жением закона дисперсии при магнитупругом взаимодействии: благодаря искажению дисперсионных кривых в области фазового синхронизма обменных СВ и АВ облегчался распад на собственные моды магнитного пленочного резонатора, что в конечном итоге приводило к уменьшению эффективного параметра релаксации вторичных волн, величина которого пропорциональна порогу нелинейности. Аналогичный эффект наблюдался в работе [4], где было показано, что из-за коллинеарности распространения вторичных волн и первичной волны уменьшается отток энергии вторичных волн из области накачки, что также приводит к уменьшению эффективного параметра релаксации вторичных волн и порога нелинейности первичных волн. Наименьший порог нелинейности наблюдался при максимальной гибридации дипольного МСК с обменно-акустическим, когда высока эффективность возбуждения первичного МСК и легко достигаются условия распада на вторичные волны благодаря искажению дисперсионных кривых.

В рассмотренном выше случае взаимодействие дипольных полей дипольного МСК и обменно-акустического возбуждения было столь велико, что приводило к характерному расталкиванию колебаний. Рис. 2 соответствует случаю, когда параметры релаксации колебаний и их эффективность взаимодействия таковы, что расталкивания колебаний не происходит, а наблюдается плавный

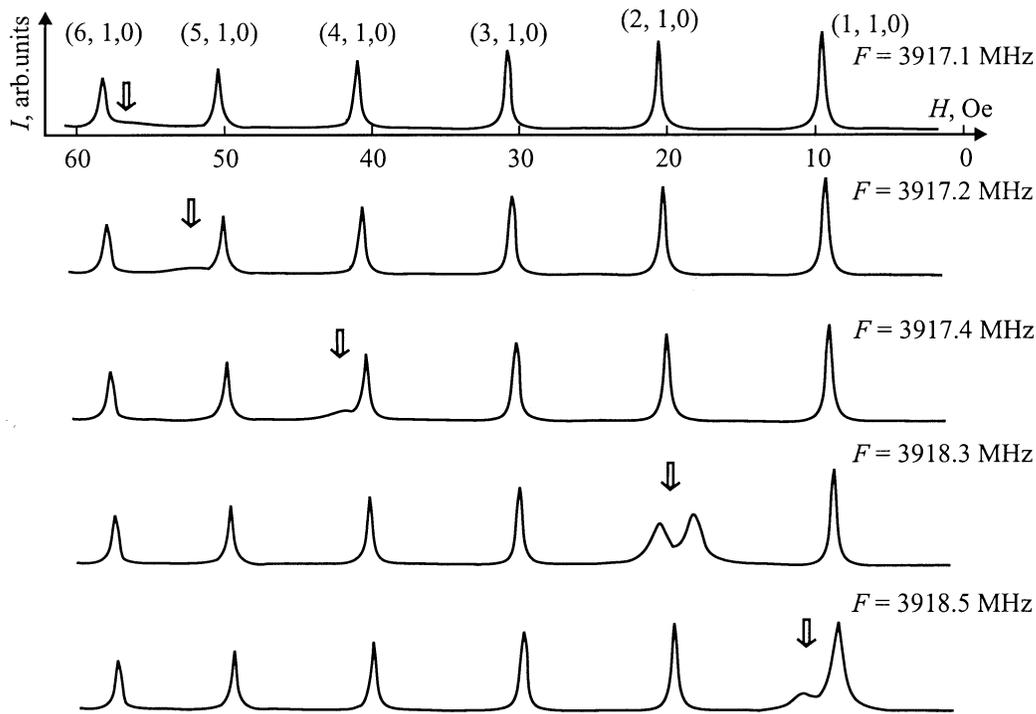


Рис. 3. Спектры магнитоакустических колебаний с радиусом локализации около $600 \mu\text{m}$ в дисковом резонаторе при различных частотах возбуждения. Параметры структуры те же, что на рис. 1. Стрелкой показано возбуждение обменно-акустического колебания.

проход одного колебания через другое. Тем не менее, как и в случае, представленном на рис. 1, уменьшается порог нелинейности дипольно-обменно-акустического колебания.

В [6] указывалось, что возбуждение как обменно-акустических, так и дипольно-обменно-акустических колебаний может происходить достаточно далеко от области синхронизма обменных СВ и АВ. В результате искажение дисперсионных кривых также имеет место достаточно далеко от точки точного совпадения волновых чисел обменных СВ и АВ, хотя наблюдаемые искажения спектра существенно слабее. Рассмотрим, как магнитоупругое взаимодействие влияет на нелинейные процессы в этом случае. На рис. 3 изображены экспериментальные спектры МСК в развертке по магнитному полю. Область фазового синхронизма обменных СВ и АВ находится, согласно расчету, на расстоянии примерно 20 Oe от начала спектра. Данное предположение подтверждается экспериментом: именно в этой области спектра наблюдалось наиболее эффективное возбуждение обменно-акустических колебаний. Однако возбуждение указанных колебаний происходило на расстоянии порядка 50 Oe от магнитного поля, соответствующего синхронизму спин-волновых резонансов и акустических колебаний. В ситуации, представленной на рис. 3, экспериментально исследовались частотные зависимости пороговых мощностей нелинейности радиальных дипольных колебаний $(6,1,0)$, $(5,1,0)$, $(4,1,0)$.

Возбуждение обменно-акустических колебаний в рассматриваемом диапазоне спектра было очень слабым, и при совпадении резонансных магнитных полей такого колебания с одним из вышеуказанных дипольных колебаний форма резонансной кривой дипольных МСК практически не менялась. Тем не менее при совпадении их резонансных полей наблюдалось четкое, хорошо заметное в эксперименте уменьшение порога нелинейности на $5-7 \text{ dB}$. Таким образом, даже при очень слабом возбуждении обменно-акустических колебаний происходит облегчение процессов распада, сопровождающееся уменьшением порога нелинейности дипольных возбуждений. В результате при совпадении резонансного поля такого колебания с дипольным МСК форма резонансной кривой последнего практически не искажается, однако порог нелинейности дипольного МСК уменьшается на величину порядка 6 dB .

Таким образом, порог нелинейности дипольно-обменно-акустических колебаний, возбуждаемых в области синхронизма обменных спиновых и акустических волн, при совпадении условий возбуждения дипольных МСК и обменно-акустических колебаний может уменьшаться на $10-14 \text{ dB}$ по сравнению с порогом нелинейности дипольных МСК, несмотря на меньшую эффективность их возбуждения. Уменьшение порога нелинейности объясняется искажением дисперсионных кривых вторичных волн благодаря их связи с акустическими модами, что облегчает сохранение энергии и импульса при четы-

рехмагنونных процессах рассеяния в собственные моды планарной структуры. Уменьшение порога нелинейности дипольного МСК при совпадении условий его возбуждения с одним из обменно-акустических колебаний имеет место даже далеко от области синхронизма обменных СВ и АВ, когда видимые искажения спектра практически не наблюдаются. В свою очередь порог нелинейности обменно-акустических колебаний может быть на 5–7 дВ меньше порога нелинейности дипольных МСК, несмотря на существенно меньшую амплитуду обменно-акустических МСК.

Список литературы

- [1] E.H. Turner. Phys. Rev. Lett. **5**, 3, 100 (1960).
- [2] F.A. Olsen. J. Appl. Phys. **34**, 4, Pt 2, 1281 (1963).
- [3] П.Е. Зильберман, Н.С. Голубев, А.Г. Темиряев, В.М. Дятлов. Письма в ЖТФ **14**, 7, 585 (1988).
- [4] П.Е. Зильберман, Г.Т. Казаков, В.В. Тихонов. Письма в ЖТФ **11**, 13, 769 (1985).
- [5] П.Е. Зильберман, В.И. Козлов, А.В. Помялов. ФТТ **28**, 2, 352 (1986).
- [6] А.С. Бугаев, В.Б. Горский. РЭ **44**, 3, 330 (1999).