

01;05;12

Гибридные электромагнитно-спиновые колебания в слоистых структурах с одноосными гексаферритами

© В.И. Костенко, А.М. Сорочак, Т.Г. Чамор, Л.В. Чевнюк

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
01601 Киев, Украина
e-mail: sorandrew@gmail.com, ctamila@univ.kiev.ua.

(Поступило в Редакцию 7 сентября 2010 г.)

Теоретически и экспериментально исследовались спектры магнитостатических колебаний в слоистых структурах диэлектрик–феррит–металл. Экспериментально исследована гибридизация магнитостатических колебаний и диэлектрических резонансных мод как при насыщении, так и в доменной области при наличии решетки цилиндрических магнитных доменов.

Эксперименты проводились на пластинках магнетоплюмбита, бариевого и стронциевого гексаферритов. Для составных структур в качестве диэлектрика использовались кварцевые пластинки различной толщины.

Введение

Теория гибридизации электромагнитного и магнитостатического колебания (МСК) в объемных резонаторах ранее была разработана Олдом [1]. Она описывает колебания, которые возникают в полном резонаторе с ферритовым образцом на диэлектрической подложке.

Спектры связанных феррит-диэлектрических колебаний (ФДК) в эпитаксиальных пленках железитриегового граната были изучены в работах [2–4]. Здесь исследовались дисперсионные характеристики в слоистых структурах произвольной конфигурации. Задача решалась как в магнитостатическом приближении, так и с учетом эффектов запазывания. В работе [3] развита теория для электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в составных пленочных структурах металл–диэлектрик–ферромагнетик–диэлектрик–металл. Авторами получено дисперсионное уравнение в неявном виде для гибридных волн в режиме произвольного намагничивания. Показано, что гибридизация сильно зависит от геометрии составной структуры, направления намагниченности насыщения и углов между направлением намагниченности и направлением распространения волны. В работе [4] теоретически исследован спектр дипольно-обменных электромагнитно-спиновых волн в касательно намагниченных несимметричных составных структурах. Авторы показали, что нарушение симметрии структуры, обусловленное различием диэлектрических проницаемостей диэлектрических слоев может приводить к усилению взаимодействия спиновых и электромагнитных волн.

В работе [5] экспериментально исследовалась монокристаллическая пластина гексаферрита стронция на кварцевой подложке. Здесь приводятся экспериментальные результаты взаимодействия трех типов связанных колебаний в слоистых структурах — электромагнитного и двух магнитостатических.

В работе [6] также исследовалось явление гибридизации магнитостатической и диэлектрической мод в составной структуре в насыщенной области. Выполненные исследования показывают, что в эпитаксиальных пленках бариевых ферритов связанные ФДК сопровождаются уширением линии ферромагнитного резонанса (ФМР) и затягиванием частот.

В [7] были экспериментально исследованы частотно-полевые зависимости ФМР в эпитаксиальной пленке гексаферрита бария при нормальном намагничивании как в доменной области (ДО), так и при насыщении. В этой работе впервые получены спектры ФМР в области гибридизации спиновых и электромагнитных колебаний для структуры эпитаксиальная пленка феррита бария–диэлектрическая подложка из гексагаллата стронция (ГГС). Расчет, проведенный по теории Олда [1], хорошо согласуется с экспериментальными данными. В доменной области не было обнаружено гибридизации высокочастотной магнитостатической моды ω_2 с диэлектрической модой. В [8] нами более детально были исследованы связанные ФДК в эпитаксиальной пленке феррита бария как в многодоменном, так и в насыщенном состоянии. Впервые обнаружена гибридизация высокочастотной магнитостатической ветви ФМР с диэлектрической резонансной модой при наличии структуры цилиндрических магнитных доменов (ЦМД).

Предлагаемая работа посвящена дальнейшему исследованию обнаруженных эффектов связанных колебаний в составных структурах.

Результаты и их обсуждение

Методом магнитных спектров измерены резонансные колебания в феррит-диэлектрических слоистых структурах. Экспериментальные исследования гибридизации электромагнитно-спиновых колебаний в таких структурах в ДО и в насыщении проведены для всего класса монокристаллических гексаферритов М-типа — свинцового, бариевого и стронциевого гексаферритов ($\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$,

BaFe₁₂O₁₉, SrFe₁₂O₁₉). Все эксперименты были проведены для предварительно созданной регулированной доменной структуры ЦМД в гексаферритовых монокристаллических образцах при подмагничивании внешним магнитным полем H_0 вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Диэлектрические резонаторы (ДР) были изготовлены в форме цилиндров из толстой кварцевой пластины, поскольку их спектр гораздо беднее, чем модовая структура ДР прямоугольной формы и в силу этого взаимодействие магнитостатических мод гексаферритового резонатора и только одной диэлектрической моды цилиндрического резонатора происходит более эффективно.

На рис. 1 представлены экспериментальная и расчетная частотно-полевая зависимости спектра колебаний для составной структуры, состоящей из прямоугольной монокристаллической пластинки PbFe₁₂O₁₉ (для придания механической прочности ферритовая пластинка предварительно приклеивалась к кварцевой подложке) и ДР. В интервале полей $0 < H_0 < H_{col}$ экспериментально зафиксировано возбуждение трех мод МСК в гексаферритовом образце, а в насыщении — только основная мода ФМР. H_{col} — значение H_0 , при котором исчезают обе высокочастотные моды ω_2, ω_3 и решетка ЦМД коллапсирует.

Расчет спектра МСК для структуры ЦМД выполнен исходя из системы характеристических уравнений [9]. При вычислении резонансных частот магнитостатических ветвей принимались во внимание только кривые $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ (рис. 1), которые были определены экспериментально.

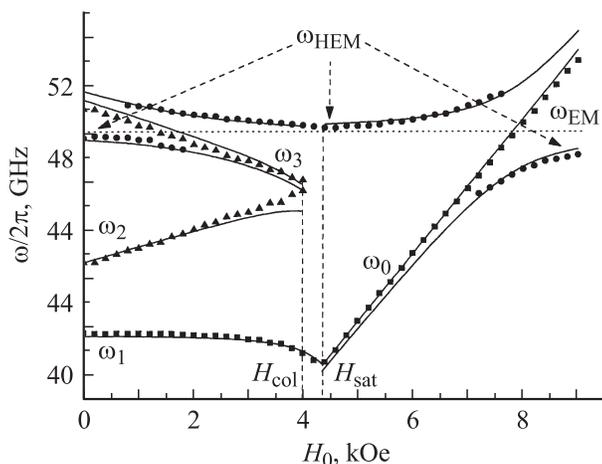


Рис. 1. Частотно-полевые зависимости спектра гибридных феррит-диэлектрических колебаний в структуре, состоящей из пластинки магнетоплюмбита $t = 30 \mu\text{m}$, $a \times b = 5.2 \times 2.55 \text{ mm}$ ($M = 0.385 \text{ kGs}$, $H_a = 14.93 \text{ kOe}$), на кварцевой подложке $d = 240 \mu\text{m}$ и кварцевого диэлектрического резонатора ($D = 1.2 \text{ mm}$, $h = 0.98 \text{ mm}$). Значения коэффициентов связи для расчетов: в насыщении — $\sigma_{1S} = 0.06 \text{ GHz}$, в доменной области — $\sigma_{1D} = 0.01 \text{ GHz}$. Точки — эксперимент, сплошные линии — расчет.

Для основной моды ФМР, совпадающей в насыщенном состоянии с ω_0 , расчет выполнен по формуле

$$\omega_0 = \gamma(H_0 + H_a - 4\pi M), \quad (2)$$

где H_a — поле кристаллографической анизотропии, M — намагниченность.

Предварительный расчет частоты ДР был проведен, как и в [2]. Окончательно размеры ДР подбирались таким образом, чтобы частота электромагнитной моды ДР ω_{EM} пересекалась с одной из высокочастотных мод ω_2 или ω_3 спектра МСК пластинки PbFe₁₂O₁₉ в ДО.

Результат взаимодействия высокочастотной магнитостатической моды ω_3 и электромагнитной моды ω_{EM} , полученный в этом эксперименте, представлен на рис. 1. Как видим, происходит существенное смещение экспериментальной частоты гибридной электромагнитной моды ω_{HEM} при приближении к области максимальной гибридизации. Анализ спектральных характеристик в ДО показывает, что в области существования сильной гибридизации электромагнитно-спиновых мод одна из трех мод повторяет поведение ветви высокочастотной моды ω_3 . Необходимо отметить, что в эксперименте область гибридизации по полю H_0 в ДО значительно больше, чем в насыщенной области. Такое отличие, возможно, связано с различной крутизной зависимости $\omega = f(H_0)$ в доменной и насыщенной областях.

Для описания полученных экспериментальных результатов спектра гибридных мод, представленных на рис. 1, были использованы результаты теоретической модели [1], согласно которой в такой составной структуре возбуждается спектр собственных связанных ФДК, определяемый обобщенной системой уравнений:

$$\begin{cases} (\omega - \omega_i)a_i + \omega \sum_j B_{ij}b_j = 0, \\ \sum_j K_{ji}a_i + (\omega - \omega_i)b_i = 0, \end{cases}$$

где a_i — амплитуда i -й электромагнитной моды, b_i — амплитуда j -й магнитостатической моды, B_{ij} и K_{ij} — коэффициенты связи i -й электромагнитной и j -й магнитостатической мод.

Таким образом, исходя из (2) решение для задачи взаимодействий одной электромагнитной и одной магнитостатической моды спектр собственных ФДК в ДО и при насыщении (рис. 1) будет описываться характеристическим уравнением:

$$(\omega - \omega_{EM})(\omega - \omega_M) + \omega\sigma_1 = 0. \quad (3)$$

Здесь ω_{EM} — собственная частота электромагнитной моды цилиндрического резонатора; ω_M — собственная частота магнитостатической моды прямоугольного ферритового резонатора, в данном случае пластинки PbFe₁₂O₁₉; $\sigma_1 = B_{11}K_{11}$ — результирующий коэффициент связи, который равняется произведению коэффициентов связи электромагнитной и магнитостатической моды и не зависит от величины H_0 .

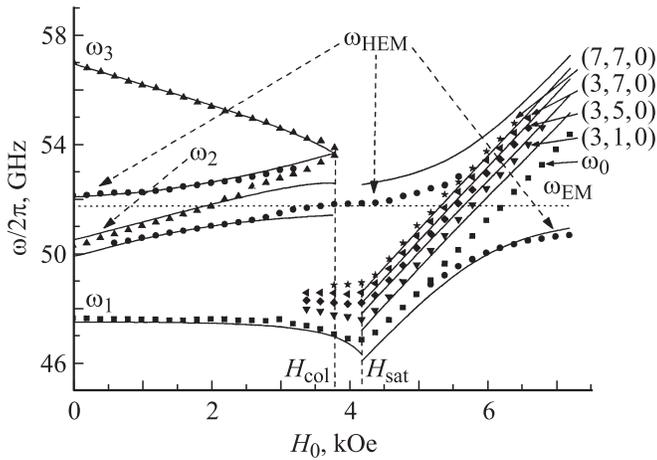


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для пластинки $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($t = 30 \mu\text{m}$, $a \times b = 2 \times 1.97 \text{ mm}$, $d = 240 \mu\text{m}$, $M = 0.370 \text{ kGs}$, $H_a = 17.03 \text{ kOe}$), кварцевый диэлектрический резонатор ($D = 1.2 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$). Значения коэффициентов связи для расчетов: в насыщении — $\sigma_{1S} = 0.035$, $\sigma_{2S} = \sigma_{3S} = \sigma_{4S} = \sigma_{5S} = 0.01$, в доменной области — $\sigma_{1D} = 0.012 \text{ GHz}$.

Решив (3) относительно ω , получим выражение, описывающее поведение связанных мод в такой структуре:

$$\omega_{1,2} = \frac{\omega_{EM} + \omega_M + \sigma_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_{EM} + \omega_M + \sigma_1}{2}\right)^2 - \omega_{EM}\omega_M}. \quad (4)$$

Здесь $\omega_M = \omega_3$ для ДО и $\omega_M = \omega_0$ — для насыщенной области.

Выполненные расчеты частотно-полевых зависимостей электромагнитно-спиновых колебаний в области гибридизации хорошо согласуются с экспериментом только для образца $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$, где в насыщении присутствует только одна спиновая мода, и имеют незначительное расхождение для образцов бариевого и стронциевого гексаферритов.

На рис. 2 представлена экспериментальная и расчетная частотно-полевые зависимости спектра колебаний для составной структуры с пластинкой $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. В отличие от случая с $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$, ДР был изготовлен таким образом, чтобы частота ω_{EM} находилась в непосредственной близости от доменной ветви ω_2 . Здесь также получено очень хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими расчетами при гибридизации ω_{EM} с ω_2 . Картина существенно отличается от предыдущего случая (рис. 1) при насыщении. В образце $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ возбуждался богатый спектр МСК — если в магнетоплюмбите в насыщении наблюдается одна спиновая мода, то в бариевом гексаферрите экспериментально зафиксированы 5 мод.

Идентификация экспериментальной модовой структуры МСК в насыщенном состоянии проводилась согласно

дисперсионному уравнению $\omega_k = \omega(n_x, n_y, p)$ [10]:

$$\omega^2 = \omega_0(\omega_0 + 4\pi M \sin^2 2k_z L), \quad (5)$$

где ω_0 — формула (1),

$$k_{\perp} = \sqrt{\frac{\pi n_x}{a} + \frac{\pi n_y}{b}}$$

— волновой вектор для пластинки с продольными размерами $a \times b$ и номера конкретной моды, которые могут принимать значения $n_x = 1, 3, 5 \dots$, $n_y = 1, 3, 5 \dots$; $t = 2L$ — толщина образца. Соответствующие n_x и n_y дискретные значения k_z определялись из соотношений:

$$k_{\perp} L = k_z L \text{tg}(2k_z L),$$

$$\frac{\pi}{2} p \leq k_z L \leq \frac{\pi}{2} \left(p + \frac{1}{2}\right), \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Расчет спектра связанных ФДК в насыщенной области проводился исходя из решения системы уравнений (2), при этом в (5) и (6) учитывалось зафиксированное в эксперименте количество спектральных мод. Аналогичным образом расчет проводился и для ДО с использованием выражения (4) при взаимодействии электромагнитной моды ω_{EM} и магнитостатической ω_2 .

Следует отметить, что в ДО получена хорошая корреляция расчетных и экспериментальных кривых для всех исследуемых образцов. В области насыщения хорошее совпадение расчетных кривых с экспериментом наблюдается только для образца магнетоплюмбита, т.е. когда экспериментально присутствуют две моды — ω_{EM} и ω_0 . В случае многомодового характера взаимодействия электромагнитного и спинового колебания хорошее совпадение получено только для нижней гибридной ветви,

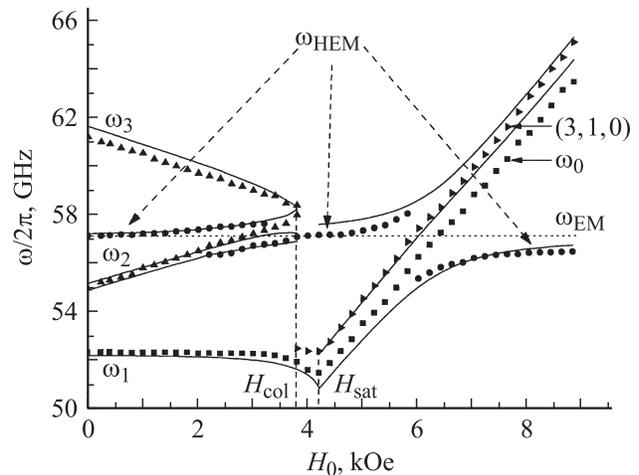


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для пластинки $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($t = 30 \mu\text{m}$, $d = 240 \mu\text{m}$, $a \times b = 1.4 \times 1.2 \text{ mm}$, $M = 0.368 \text{ kGs}$, $H_a = 18.7 \text{ kOe}$) и кварцевого диэлектрического резонатора ($a = 1.7 \text{ mm}$, $h = 1.57 \text{ mm}$). Значения коэффициентов связи для расчетов: в насыщении — $\sigma_{1S} = 0.04$, $\sigma_{2S} = 0.01$, в доменной области — $\sigma_{1D} = 0.004 \text{ GHz}$.

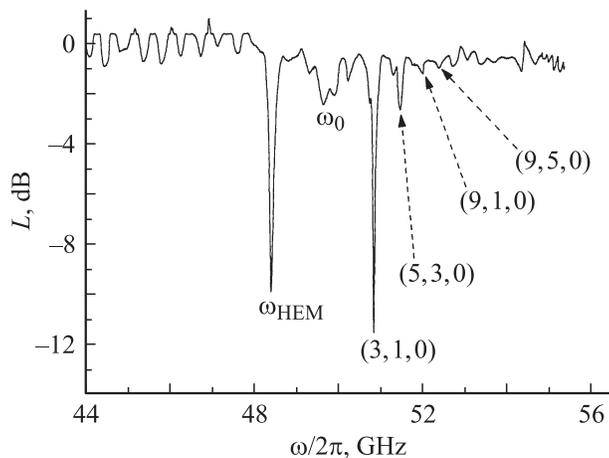


Рис. 4. Экспериментальный спектр поглощения в составной феррит-диэлектрической структуре (рис. 2) в насыщенной области, $H_0 = 5.8$ кОе.

т. е. при взаимодействии ω_{EM} и основной моды ФМР ω_0 . Возможно, это связано с наличием большого количества высших типов мод в спектре МСК, а применяемая теоретическая модель не учитывает различные коэффициенты связи для каждой из конкретных мод.

На рис. 3 приведена частотно-полевая зависимость для образца $SrFe_{12}O_{19}$, в котором в насыщенном состоянии присутствуют только две моды МСК и получено лучшее, чем в случае с $BaFe_{12}O_{19}$, совпадение расчетных кривых с экспериментом.

Это подтверждает высказанное выше предположение о слабом взаимодействии высших типов мод МСК с электромагнитной модой в области гибридизации. Приведенная на рис. 4 амплитудно-частотная зависимость спектра колебаний, возбуждающихся в составной феррит-диэлектрической структуре, содержащей $BaFe_{12}O_{19}$ в $H_0 = 5.6$ кОе, показывает, что амплитуда моды ω_0 значительно изменяется в процессе гибридизации по сравнению с высшими типами мод МСК, что также указывает на это.

Заключение

Экспериментально исследованы частотно-полевые спектры в слоистых структурах и проведен сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими расчетами частотно-полевых зависимостей как в области гибридизации, так и вне ее. Расчетные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными данными во всем диапазоне изменения внешних полей только в случае одномодового характера спиновых колебаний и ухудшаются при многомодовом спектре МСК.

Возможно, применение теоретической модели, развитой для дипольно-обменных гибридных электромагнитно-спиновых волн, с учетом эффектов запаздывания,

при решении полной электромагнитной задачи сможет разрешить эту проблему.

Список литературы

- [1] Auld B.A. // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. N 6. P. 1629–1633.
- [2] Ильченко М.Е., Мелков Г.А., Мирских Г.А. Твердотельные СВЧ фильтры. Киев: Техника, 1977. 120 с.
- [3] Demidov V.E., Kalinikos B.A. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 12. P. 10007–10016.
- [4] Демидов В.Е., Калиникос Б.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 89–93.
- [5] Попов М.А., Загородний В.В. // 3-я Междунар. молодежная науч.-технич. конф. Севастополь, Украина, 2007. С. 242.
- [6] Zavislyak I.V., Kostenko V.I., Chamor T.G., Chevnyuk L.V. // Proc. Moscow Int. Symp. on Magnetism M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 2005. P. 604–605.
- [7] Chamor T.G., Gorpynyuk A.Yu., Kostenko V.I., Chevnyuk L.V. // Proc. Conf. „Electronics and applied physics“. Kyiv, Ukraine, 2005. P. 40–41.
- [8] Чамор Т.Г., Горпынюк А.Ю., Костенко В.И., Чевнюк Л.В. 17-я Междунар. Крымская конференция „СВЧ техника и телекоммуникационные технологии“. 2007. Т. II. С. 565–563.
- [9] Sigal M.A., Kostenko V.I. // Phys. Stat. Sol. 1991. Vol. 128. P. 219–234.
- [10] Костенко В.И., Сигал М.А. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 4. С. 1217–1220.