

Дисперсионные характеристики спиновых волн в ферритовой пластине, касательно намагниченной высокооднородным магнитным полем

С.В. Герус, Э.Г. Локк, А.Ю. Анненков

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)

Аннотация: установлено, что намагничивание ферритовой пленки высокооднородным магнитным полем значительно увеличивает точность измерения волнового числа при проведении Фурье-анализа распределения комплексной амплитуды спиновых волн. В результате, обнаружено расщепление первой моды обратной объемной спиновой волны на моды-сателлиты, возбуждающиеся в ферритовой плёнке из-за наличия в ней нескольких слоев с близкими магнитными параметрами.

Ключевые слова: высокооднородное магнитное поле, Фурье-анализ, распределение комплексной амплитуды волны, обратная объемная спиновая волна, моды-сателлиты

1. Введение

Для динамичного развития спинволновой электроники (или магноники) необходимо как совершенствование уже известных методов исследования спиновых волн (СВ), так и дальнейшие исследования их характеристик в новых ферритовых структурах и метаматериалах. В настоящее время эксперименты по измерению характеристик СВ проводятся, как правило, методом бриллюновского рассеяния света на СВ (см., например, [1]) или методом СВЧ зондирования [2, 3], которые позволяют получить визуализированные картины, описывающие распределение амплитуды и фазы СВ в плоскости исследуемой ферритовой структуры. Поскольку при использовании этих методов вблизи исследуемой структуры должны размещаться измерительные датчики, подвижные зонды и т.п., то структуру помещают между полюсами стационарного двухполюсного магнита либо электромагнита, где магнитное поле можно считать однородным в небольшой пространственной области. В ряде экспериментов необходимо обеспечить постоянство вектора \mathbf{H}_0 (от которого зависят параметры сред, структур и распространяющихся в них СВ) во всём объёме исследуемого образца. Поэтому существенное увеличение области пространства, в которой поле \mathbf{H}_0 можно считать однородным, а образец, помещённый внутри этой области, – однородно намагниченным, позволит существенно улучшить точность измерения как характеристик СВ, так и параметров самой среды или структуры. В частности, для точного измерения волнового числа СВ область пространства, в которой магнитное поле можно считать однородным должна превышать длину СВ хотя бы на 1–2 порядка. То есть, если длины волн дипольных СВ лежит в пределах 100 мкм – 5 мм, то для их точного измерения (или измерения волновых чисел СВ) необходимо иметь однородно намагниченную область пространства не менее 50×50 мм². Магнитная система, создающая однородно намагниченную область пространства такого порядка [4, 5], была недавно разработана. Некоторые результаты, полученные при использовании этой магнитной системы в установке по исследованию СВ методом СВЧ зондирования, представлены ниже.

2. Характеристики спиновых волн в ферритовой пластине, находящейся в высокооднородном магнитном поле

Напомним, что метод СВЧ зондирования позволяет получать распределение амплитуды и фазы СВ в плоскости ферритовой пластины для различных геометрий возбуждения либо дифракции СВ [3]. Последующий Фурье-анализ полученного распределения даёт информацию о величине волнового вектора \mathbf{k} , являющегося важнейшей характеристикой СВ. Очевидно, что чем длиннее отрезок, на котором производится Фурье-анализ, тем с большей точностью можно измерить величину k при условии, что исследуемая среда или структура однородна и однородно намагничена.

В качестве примера рассмотрим результаты двух экспериментов по измерению дисперсионных зависимостей первой моды обратной объёмной СВ (ООСВ). В первом эксперименте использовалась магнитная система с невысокой однородностью магнитного поля \mathbf{H}_0 , а во втором – магнитная система с высокой однородностью \mathbf{H}_0 (описанная подробнее в [4, 5]), причем в первом случае протяжённость однородной области поля ΔS вдоль вектора \mathbf{H}_0 была примерно в 3 раза больше, чем во втором. В обоих экспериментах ООСВ определённой частоты возбуждалась в касательно намагничённой ферритовой плёнке ЖИГ, имеющей толщину 40 мкм и намагничённость насыщения $4\pi M_0 = 1750$ Гс. ООСВ распространялась вдоль оси z , параллельной полю \mathbf{H}_0 , и регистрировалась приёмным преобразователем, перемещающимся вдоль этой же оси, так что получалась зависимость комплексной амплитуды ООСВ от координаты z . В результате Фурье анализа этого распределения амплитуды для обоих экспериментов были получены зависимости Фурье амплитуды A от волнового числа k (рис. 1). Положение максимумов на этих зависимостях позволяет определить волновые числа мод ООСВ, распространяющихся вдоль оси z на данной частоте.

Типичная зависимость $A(k)$, полученная в результате Фурье анализа вдоль оси z для первого эксперимента, показана на рис. 1а. Поскольку в этом эксперименте однородность поля H_0 была невысока (величина H_0 изменялась вдоль оси z в пределах 1% лишь на расстоянии ~ 25 мм², а за его пределами изменялась с градиентом $\sim 0.7 - 1.5$ Э/мм), то точность измерения основного пика, соответствующего волновому числу $k = 150$ см⁻¹, составила $\Delta k = 5.5$ см⁻¹ по уровню 0.5. Кроме того, на рис. 1а видно, что кроме основного пика намечаются ещё дополнительные пики, однако из-за невысокой однородности H_0 выполненный Фурье-анализ не позволяет в полной мере проявиться этим пикам.

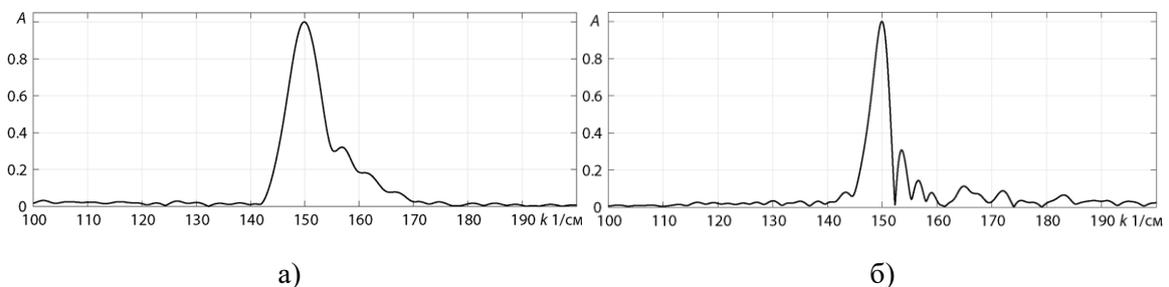


Рисунок 1. Зависимости Фурье амплитуды A от волнового числа k , полученные в результате Фурье анализа измеренных зависимостей комплексной амплитуды ООСВ₁ вдоль оси z при использовании магнитной системы с невысокой (а) и с высокой (б) однородностью магнитного поля \mathbf{H}_0 .

Для второго эксперимента, выполненного при высокой однородности поля \mathbf{H}_0 (в этом случае величина H_0 изменялась вдоль оси z в пределах 1% на расстоянии 82 мм),

типичная зависимость $A(k)$, полученная в результате Фурье анализа вдоль оси z , показана на рис. 1б. В этом эксперименте, точность измерения основного пика, соответствующего $k = 150 \text{ см}^{-1}$, составила $\Delta k = 3.1 \text{ см}^{-1}$ по уровню 0.5, т.е., почти в два раза выше, чем в первом эксперименте. Благодаря высокой однородности поля \mathbf{H}_0 на рис. 1б проявились и дополнительные пики, свидетельствующие о существовании дополнительных мод ООСВ с волновыми числами, близкими к основному пику. Можно предположить, что эти моды появились из-за стратификации ферритового образца в процессе его роста и образовании нескольких слоёв с близкими параметрами, например, намагниченности насыщения или ростовой анизотропии.

Измеряя положение пиков для всех волновых чисел при разных значениях частоты F , можно построить дисперсионную зависимость СВ, часть которой, измеренная для указанной плёнки ЖИГ при $H_0 = 500 \text{ Э}$, представлена на рис. 2. Дополнительные моды, проявившиеся на рис. 1б в виде Фурье пиков, на рис. 2 образуют несколько близко расположенных кривых. Более того, в интервале малых волновых чисел $0 < k < \sim 25 \text{ см}^{-1}$ на рис. 2 можно видеть ещё и дисперсионные кривые, которых нет в области более высоких значений k . Это явление, по-видимому, обусловлено взаимодействием волновых мод ООСВ в пленках ЖИГ, выращенных на противоположных поверхностях подложки толщиной 0.5 мм (аналогичный эффект для поверхностных СВ описан ранее в [2]). Поскольку дисперсионная зависимость СВ, распространяющейся во второй плёнке, также состоит из нескольких кривых (рис. 2), то и эта плёнка, по-видимому, состоит из нескольких слоёв.

С физической точки зрения все описанные выше явления связаны с расщеплением первой моды ООСВ (ООСВ₁) на моды-сателлиты, причем распределение всех мод-сателлитов по толщине ферритовой плёнки описывает нечётная центрально-симметричная относительно середины пленки функция (см., например, кривую I на рис. 2а в [6]). Расщепление ООСВ₁ на сателлиты, возникшее из-за наличия в плёнке нескольких слоев с близкими магнитными параметрами, экспериментально удалось наблюдать благодаря использованию высокооднородного магнитного поля \mathbf{H}_0 . Отметим, что при использовании магнитной системы с невысокой однородностью поля \mathbf{H}_0 , дисперсионные кривые сателлитов, изображенные на рис. 2, различить практически не удаётся, и дисперсионная зависимость ООСВ₁ $f(k)$ выглядит как одна сплошная линия.

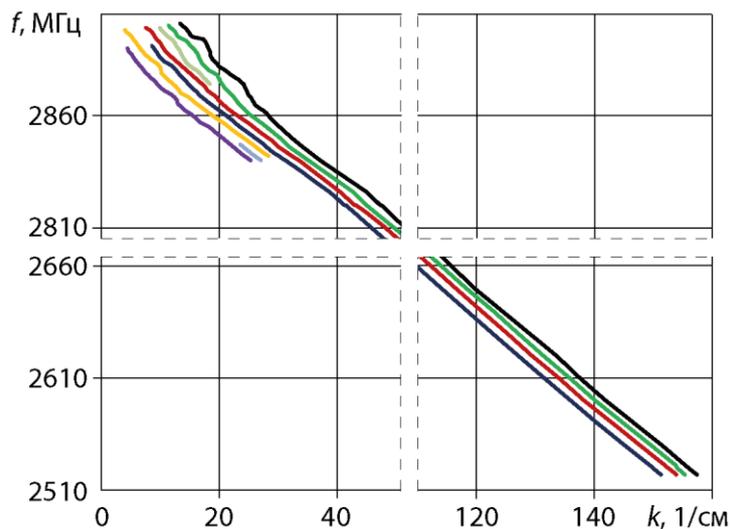


Рисунок 2. Дисперсионные зависимости $f(k)$ мод-сателлитов, на которые расщепляется первая мода обратной объемной СВ в высокооднородном магнитном поле из-за существования в ферритовой плёнке нескольких слоев с близкими магнитными параметрами.

3. Заключение

Проведено сравнение характеристик ООСВ в ферритовой пластине, касательно намагниченной постоянным магнитным полем с высокой и с невысокой степенью однородности. В частности, на основе Фурье-анализа распределения амплитуды ООСВ, распространяющейся в ферритовой плёнке вдоль вектора \mathbf{H}_0 , проведено сравнение измеренных волновых чисел и дисперсионных зависимостей ООСВ для этих двух случаев. Поскольку в первом случае точность измерения волнового числа ООСВ оказалась почти в два раза выше, чем во втором, то в первом случае удалось наблюдать расщепление *первой* моды ООСВ на моды-сателлиты, обусловленное существованием в плёнке нескольких слоев с близкими магнитными параметрами. Установлено, что дисперсионные зависимости мод-сателлитов смещены друг относительно друга на $\sim 3 \text{ см}^{-1}$, причем в эксперименте с невысокой однородностью \mathbf{H}_0 эти зависимости практически неразличимы, и общая дисперсионная зависимость выглядит как одна сплошная линия. Кроме того, в эксперименте с высокой однородностью \mathbf{H}_0 в интервале малых волновых чисел $0 < k < \sim 25 \text{ см}^{-1}$ обнаружено взаимодействие волновых мод ООСВ в пленках ЖИГ, выращенных на противоположных поверхностях подложки. Таким образом, анализ результатов двух экспериментов, описанных выше, позволяет сделать вывод, что для точного измерения дисперсионных характеристик СВ в ферритовых пленках, многослойных ферритовых структурах и метаматериалах необходимо использовать в экспериментальной установке высокооднородное магнитное поле. Кроме того, обнаруженный эффект расщепления мод СВ может использоваться на практике для контроля за качеством выращиваемых ферритовых пленок.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках **государственного задания по теме № 0030-2019-0014**.

Список литературы

1. Sadovnikov A.V. et al. Spin wave propagation in a uniformly biased curved magnonic waveguide // Phys. Rev. B – 2017 – V. 96 – P. 060401-1 – 060401-6.
2. Анненков А.Ю., Герус С.В. Исследование распределения поверхностных магнитостатических волн путем сканирования поверхности ферритовой пластины // Радиотехника и электроника – 2012 – Т. 57 – № 5 – с. 572-577.
3. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirectional beam of surface spin wave // EPL (EuroPhysics Letters) – 2018 – V. 123 – №4 - P.44003-p1 – 44003-p7.
4. Герус С.В., Локк Э.Г., Анненков А.Ю. Расчёт параметров и формы наконечников для создания высокооднородного магнитного поля между полюсами двухполюсного магнита // X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» – Санкт-Петербург, 31 мая - 4 июня 2021г.
5. Герус С.В., Локк Э.Г., Анненков А.Ю. Влияние однородности магнитного поля, намагничивающего ферритовую плёнку, на точность измерения характеристик спиновых волн // Радиотехника и электроника – 2021 – Т. 66 – в печати.
6. Локк Э.Г. Невзаимные свойства обратных спиновых волн // Радиотехника и электроника – 2020 – Т. 65 – № 3 – с. 267-276.