

А.Ю. Анненков, С.В. Герус

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

Взаимное влияние поверхностных магнитостатических волн, распространяющихся в плёнках ЖИГ, выращенных на противоположных сторонах подложки ГГГ

Методом сканирования исследованы распределения комплексных амплитуд поверхностных магнитостатических волн в двухсторонних образцах эпитаксиальных ферритовых плёнок. Исследования показали, что когда длина волны соизмерима с толщиной подложки, наличие ферритовой пленки на противоположной стороне подложки вносит существенный вклад в распределение волны, приводя к возникновению пространственных биений вдоль направления распространения.

Ключевые слова: **поверхностные магнитостатические волны, сканирование, распределение**

Распространение магнитостатических волн (МСВ) в многослойных ферритовых структурах изучалось практически с момента появления эпитаксиальных плёнок железо-иттриевого граната (ЖИГ) [1–4]. Однако в основном внимание уделялось распределению поля МСВ по толщине пленки, а также таким динамическим характеристикам, как дисперсионное соотношение, фазовая и групповая скорости, время задержки.

Распределение МСВ по поверхности одиночной пленки изучалось в работах [5, 6], в которых проводилось исследование профилей пучков МСВ на заданном расстоянии от входного преобразователя. В дальнейшем эта тема получила развитие в работах [7–12]. В них исследовалось распространение пучков прямых объёмных МСВ [10] и поверхностных МСВ (ПМСВ) как в свободной пленке ЖИГ [7, 11], так и в структуре ЖИГ–диэлектрик–металл [12]. Профиль пучка измерялся в нескольких сечениях, что давало возможность проследить за его эволюцией, в частности было обнаружено дифракционное расплывание пучка МСВ.

Отметим, что во всех цитируемых работах измерялись только амплитудные характеристики пучка, не позволяющие выявить модовый состав пучка и определить его дисперсионные характеристики. Профили пучка измерялись в нескольких отдельных сечениях, не дающих возможности представить полную картину распределения МСВ по поверхности ферритовой пленки.

В настоящей работе проведено исследование поверхностных МСВ (ПМСВ) в достаточно распространённой структуре состоящей из двух эпитаксиальных плёнок ЖИГ, выращенных с двух сторон на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Было проведено экспериментальное исследование распределения комплексной амплитуды ПМСВ в плоскости пленки ЖИГ, что позволило найти не только амплитудное распределение, но и определить дисперсионные характеристики распространяющихся ПМСВ мод. В работе была развита методика, примененная ранее

авторами для исследования МСВ в магнитных каналах [13]. На основе представленной методики были обнаружены новые особенности распространения пучков ПМСВ.

Схема экспериментальной установки и выбранная система координат представлены на рис. 1 [14]. В качестве образцов использовались плёнки ЖИГ, выращенные на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) диаметром 7,6 см и толщиной 0,5 мм. Образец помещался между полюсами постоянного магнита, которые создавали в центральной части однородное магнитное поле H_0 . Положение пленки соответствовало касательному намагничиванию.

Исследования производились с помощью устройства, позволяющего определять комплексный коэффициент передачи СВЧ сигнала от передающего преобразователя к приемному. СВЧ сигнал поступал на передающий полосковый преобразователь длиной 2...5 мм, который формировал исследуемый пучок МСВ. Приемный преобразователь с минимально возможной апертурой (около 0,1 мм) являлся сканирующим зондом.

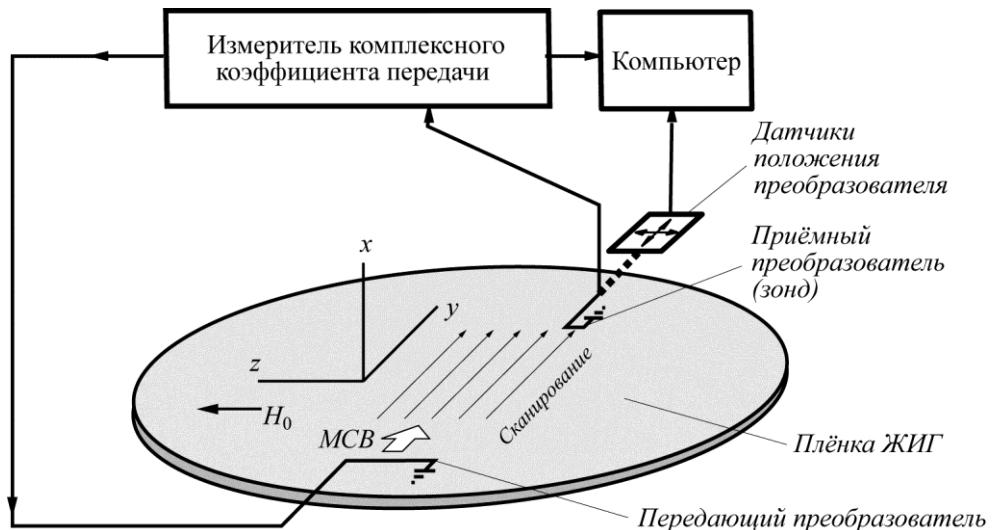


Рис. 1.

Посредством электро-механической системы зонд сканировал образец магнитной плёнки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Датчики положения позволяли определять положение зонда с точностью до 20 мкм. В результате измерений для заданной частоты получалось распределение комплексной амплитуды МСВ по всей плоскости исследуемого плёночного образца. На рис. 2, а, показано, как меняется модуль комплексной амплитуды ПМСВ при однократном сканировании зондом вдоль оси у. Картинки, полученные в результате проведения экспериментов, визуализировали распределение амплитуды ПМСВ и позволили увидеть формирование пучка как в ближней, так и в дальней зонах (см. рис. 3).

Данная методика позволила получить информацию не только о распределении амплитуды и фазы МСВ, но и о дисперсионных характеристиках МСВ, распространяющихся в исследуемых структурах. Так, Фурье анализ пространственного распределения комплексного коэффициента передачи позволил определить значения волновых векторов всех МСВ мод, распространяющихся на данной частоте (рис. 2, б).

На рис. 1 изображена конфигурация для случая параллельной ориентации полоскового преобразователя МСВ и поля подмагничивания, соответствующего одному направлению векторной и групповой скорости. Однако созданная экспериментальная установка и методика обработки экспериментальных данных позволяли проводить исследования характеристик неколлинеарных лучей МСВ с любыми параметрами (при любой относительной ориентации векторов групповой и фазовой скорости).

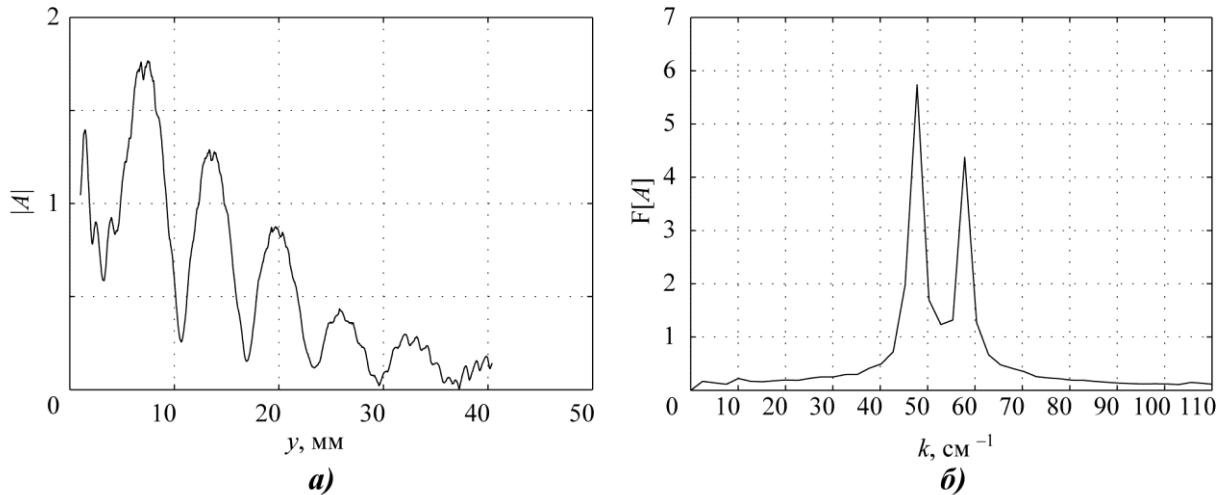


Рис. 2.

Полученное распределение представлено на рис. 3, а. Жирный отрезок в начале координат изображает передающий преобразователь МСВ. На рисунке видны волнообразные биения амплитуды в направлении распространения ПМСВ. Пучок МСВ изрезан провалами вдоль всего своего пути распространения, которые нельзя объяснить дифракционным расхождением луча даже с учетом присущей ПМСВ анизотропии, вызываемой полем подмагничивания. На краях пучка заметны дифракционные явления, связанные с его «анизотропным расплыванием», просматривается угол отсечки — граница, отделяющая область, где ПМСВ может распространяться, от области, где распространение ПМСВ запрещено. Обнаруженная волновая картина с биениями характерна для интерференции волн с близкими волновыми числами, распространяющимися в одном направлении. Чтобы убедиться в этом, проведем Фурье анализ волнового распределения $A(y, z)$ при $z = 0$ (рис. 2, в). Видно, что на данной частоте в исследуемой структуре распространяется 2 волновые моды с волновыми числами 48 и 58 см^{-1} . Поскольку ПМСВ в неограниченной ферромагнитной плёнке является одномодовым колебанием, то, по-видимому, вторая мода связана с наличием плёнки ЖИГ, выращенной на второй поверхности подложки ГГГ. Для подтверждения этого предположения были построены экспериментальные и теоретические дисперсионные кривые, соответствующие модам, распространяющимся в рассматриваемой трёхслойной структуре (рис. 4). Эмпирические значения волновых чисел получены с помощью Фурье преобразования экспериментальной зависимости $A(y, z = 0)$ для разных значений частот.

Теоретическая задача о распространении плоских ПМСВ в трёхслойных структурах рассматривалась в работах [2, 4]. Следуя этим работам, были построены теоретические дисперсионные зависимости ПМСВ мод для рассматриваемого экспериментального случая (рис. 4).

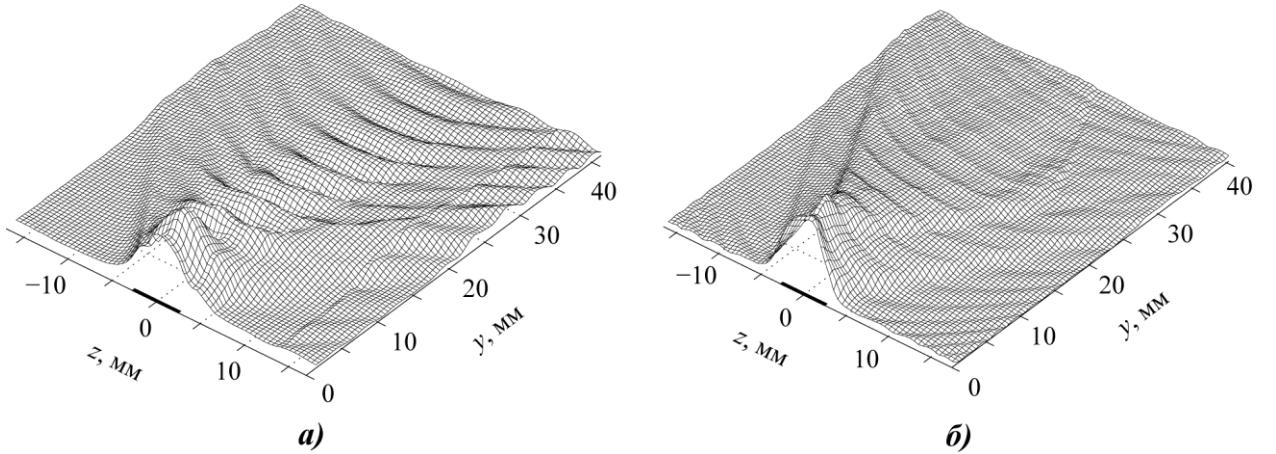


Рис. 3.

Кривые 1 и 2 демонстрируют хорошее согласие теории и эксперимента, подтверждая выдвинутую гипотезу и делая понятным механизм образования и частотной эволюции биений в распределении ПМСВ. Хорошо видно, что с ростом частоты волновые числа мод увеличиваются, и их дисперсионные кривые сближаются друг с другом. Связь между ПМСВ в пленках ЖИГ, лежащих на противоположных сторонах подложки, должна быть заметна, когда длина ПМСВ существенно меньше расстояния между пленками, равного толщине подложки 0.5 мм, что соответствует волновому числу 20 см⁻¹. Именно в этой области (0...60 см⁻¹) и наблюдается максимальное «расталкивание» дисперсионных кривых (рис. 4). Таким образом, при длинах волн, сравнимых с толщиной ГГГ подложки, ПМСВ в обеих пленках хорошо «чувствуют» друг друга за счёт спадающих хвостов волновых функций. Образуются две разные моды. С возрастанием частоты длина волны уменьшается и происходит постепенное вырождение мод.

Для более достоверного подтверждения гипотезы о том, что источником наблюдаемых биений в распределении ПМСВ является взаимное влияние двух соседних пленок ЖИГ, была удалена одна из пленок ЖИГ с подложки ГГГ. На рис. 3, б приведена картина распределения ПМСВ в одиночной пленке ЖИГ. На рисунке отсутствуют биения, характерные для рис. 3, а. Заметны небольшие волнобразные изменения, имеющие другой пространственный период. Это эффект проникновения электромагнитной наводки с входного преобразователя на выходной. Фурье анализ распределения комплексной амплитуды $A(y, z = 0)$, измеренной для одиночной пленки, показал наличие только одной моды ПМСВ. Экспериментальные точки дисперсионной кривой ПМСВ вместе с теоретической линией, описываемой известной формулой Дэймона-Эшбаха [15], приведены на рис. 4 (кружки и график 3). Видно, что дисперсионная зависимость для одиночной пленки, как и следовало ожидать, оказалась в промежуточной области между двумя кривыми, представляющими ПМСВ моды трёхслойной структуры ЖИГ–ГГГ–ЖИГ. Эксперимент с одиночной пленкой ЖИГ

показал отсутствие биений и тем самым подтвердил предположение о том, что возникновение биений связано с наличием трёхслойной структуры.

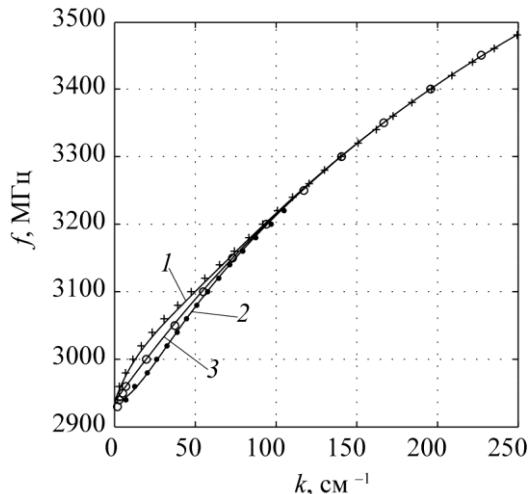


Рис. 4.

Таким образом, полученные результаты говорят, что при изучении волновых процессов, происходящих в пленках ЖИГ, выращенных на двух сторонах подложки ГГГ, а также при создании устройств на их основе, необходимо учитывать взаимодействие между пленками, особенно на малых волновых числах.

Библиографический список

1. Pfeiffer H. // Phys. Stat. Sol. (A). 1973. V. 19. № 1. P. K85.
2. Беспятых Ю.И., Зубков В.И. // ЖТФ. 1975. Т. 45. № 11. С. 2386.
3. Sasaki H., Mikoshiba N. // Electronics Lett. 1979. V. 15. № 6. Р. 172.
4. Вашковский А.В., Стальмахов А.В. // РЭ. 1984. Т. 29. № 12. С. 2409.
5. Collins J.H., Pizzarello F.A. // Int. J. Electronics. 1973. V. 34. № 3. P. 319.
6. Pizzarello F.A., Collins J.H., Coerver L.E. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. № 3. P. 1016.
7. Ващковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В. // РЭ. 1985. Т. 30. № 12. С. 2422.
8. Вайрай S.N. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. № 10. P. 6564.
9. Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А. // РЭ. 1986. Т. 31. № 8. С. 1487.
10. Ващковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А. // РЭ. 1987. Т. 32. № 11. С. 2295.
11. Ващковский А.В., Гречушкин К.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А. // РЭ. 1988. Т. 33. № 4. С. 876.
12. Валяевский А.Б., Ващковский А.В., Стальмахов А.В., Тюлюкин В.А. // РЭ. 1988. Т. 33. № 9. С. 1820.
13. Анненков А.Ю., Васильев И.В., Герус С.В., Ковалёв С.И. // ЖТФ. Т. 65. № 4. С. 71.
14. Анненков А.Ю., Герус С.В. // РЭ. 2012. Т. 57. № 5. С. 572.
15. Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. № 3/4. P. 308.