

- [5] Гудков А. Л., Лихарев К. К., Махов В. И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 23. С. 1423—1426.
 [6] Завалев В. П., Лихарев К. К. // РИЭ. 1978. Т. 23. № 6. С. 1268—1278.
 [7] Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 320 с.

Московский государственный педагогический институт им. В. И. Ленина
 Физический факультет

Поступило в Редакцию 20 июня 1988 г.
 В окончательной редакции 2 декабря 1988 г.

ДИСПЕРСИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДВУХСЛОЙНЫХ ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНКАХ

В. И. Зубков, Э. Г. Локк, Б. П. Нам, А. С. Хе, В. И. Щеглов

В связи с возможностью создания систем аналоговой обработки информации на СВЧ, в которых носителем информации являются магнитостатические волны (МСВ), распространяющиеся в ферритовых пленках, актуально изучение дисперсии различных типов МСВ, которая в решающей степени определяет характеристики таких устройств, как фильтры и линии задержки (см., например, [1]). Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию дисперсии поверхностных МСВ (ПМСВ) в двухслойных ферритовых пленках. Такое исследование важно, так как на многослойных ферритовых пленках можно реализовать устройства обработки информации со значительно большими функциональными возможностями, чем аналогичные на однослойных пленках.

Спектр ПМСВ в двухслойных ферромагнитных пленках достаточно хорошо изучен теоретически (см., например, [2-4]), однако экспериментальному исследованию посвящена всего одна работа [5], в которой обнаружена лишь часть ветвей спектра ПМСВ, да и та интерпретирована некорректно.

Эксперимент проводился на двух двухслойных ферритовых пленках размером 20×20 мм, выращенных на подложках из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), плоскость которых совпадала с кристаллографической плоскостью {111}, а ребра — с кристаллографическими осями (211) и (110). При создании первой пленки на подложке из ГГГ сначала выращивался слой железиттриевого граната (ЖИГ), легированный галлием, толщиной 14 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_{-1} = 735$ Гс, а на нем слой чистого ЖИГ толщиной 15 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 1790$ Гс. При создании второй пленки на подложке из ГГГ сначала выращивался слой чистого ЖИГ толщиной 6 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_{-1} = 1830$ Гс, а на нем слой ЖИГ, легированного галлием, толщиной 16 мкм с намагниченностью насыщения $4\pi M_1 = 1555$ Гс. Согласно [4], на пленках с указанными выше параметрами можно изучить все возможные типы спектров ПМСВ. Над поверхностью верхнего слоя пленки в плоскости, параллельной ей, устанавливались параллельные друг другу и ребру пленки неподвижная входная и подвижная выходная антенны. Они представляли собой короткозамкнутые отрезки позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм и длиной 4 мм. Выходная антенна передвигалась вдоль линии, соединяющей центры антенн и перпендикулярной к самим антеннам. Постоянное магнитное поле H_0 (далее поле H_0) ориентировалось параллельно антеннам. В эксперименте измерялись дисперсионные зависимости ПМСВ методом подвижной антенны (см., например, [6]) и зависимости потерь на распространение ПМСВ от частоты. На рис. 1, 2 приведены результаты этих измерений при поле $H_0 = 573$ Э.

На рис. 1 приведены экспериментальные точки (черные точки для первой пленки, для второй — светлые) и теоретические кривые, рассчитанные по формулам из работы [4] (для первой пленки — сплошные, для второй — штриховые), описывающие зависимости частоты ПМСВ f от ее волнового числа k .

Из рис. 1 видно, что впервые в обеих пленках обнаружены все четыре ветви ПМСВ, предсказанные в [4]. Хорошее наложение экспериментальных точек на теоретические кривые свидетельствует, на наш взгляд, о правильности теоретических положений, развитых

в [4]. Дополнительные доказательства этому можно получить из анализа потерь на распространение ПМСВ, принадлежащих к той или иной ветви спектра. На рис. 2 приведены экспериментально снятые зависимости потерь на распространение ПМСВ A (в дБ/см) от частоты ПМСВ f . Точки, соответствующие каждой ветви спектра, соединены кривыми (для первой пленки — сплошными, для второй — штриховыми), которым дана та же нумерация, что и ветвям спектра ПМСВ на рис. 1.

Рис. 1, 2 и работа [4] дают следующую информацию о спектре ПМСВ в первой пленке. При $k > 0$ кривая 1 описывает дисперсию внешней ПМСВ, распространяющейся по границе пленка—воздух, а кривая 3 — дисперсию внутренней ПМСВ, распространяющейся по границе между ферритовыми слоями (см. [4] и рис. 1) и являющейся при малых k прямой, а при больших k обратной волной. Внешняя ПМСВ имеет минимальные потери на распространение (рис. 2, кривая 1), которые с увеличением частоты растут обратно пропорционально группо-

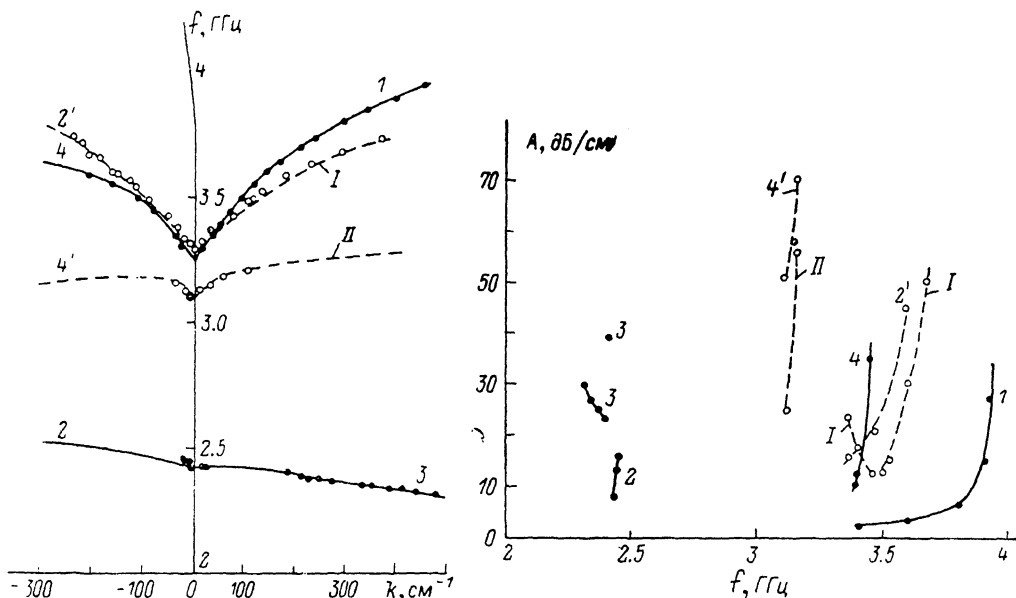


Рис. 1. Зависимость частоты ПМСВ f от ее волнового числа k .

1—4 — первая пленка; 1, 2', II, 4' — вторая.

Рис. 2. Зависимость потерь на распространение ПМСВ A от частоты ПМСВ f .

Обозначения кривых имеют тот же смысл, что и на рис. 1.

вой скорости ПМСВ $v_{\text{гp}}$ (далее просто $v_{\text{гp}}$); внутренняя ПМСВ имеет значительно большие потери (на рис. 2 кривая 3 описывает потери обратной волны, а точка 3 — прямой), которые обращаются в бесконечность на частотах, где $v_{\text{гp}}$ равна нулю. При $k < 0$ кривая 2 описывает дисперсию внешней ПМСВ, распространяющейся по границе пленка—подложка, а кривая 4 — дисперсию внутренней ПМСВ, распространяющейся по границе между ферритовыми слоями и являющаяся при малых $|k|$ прямой, а при больших $|k|$ обратной волной [4]. Из рис. 1 видно, что при $k < 0$ обнаружены те части ветвей ПМСВ, которые соответствуют внешней (кривая 2) и прямой внутренней (кривая 4) ПМСВ (обратная внутренняя ПМСВ по [4] должна существовать при больших $|k|$). На кривой 2 удалось снять малое число точек при $0 < |k| < 25 \text{ см}^{-1}$. Это обусловлено не столько большими потерями на распространение (как видно из рис. 2, начальная точка кривой 2 соответствует достаточно малым потерям), сколько неэффективным возбуждением этих волн входной антенной из-за экранировки слоя с меньшей намагниченностью насыщения слоем с большей намагниченностью и тем, что эффективность возбуждения этих ПМСВ падает с увеличением частоты. В результате потери на распространение ПМСВ с $k < 0$ (см. кривые 2, 4 на рис. 2) с увеличением частоты растут быстрее, чем $v_{\text{гp}}^{-1}$. В первой пленке наблюдается четкое разделение волн на внешние и внутренние (см. рис. 1 и 2 и [4]).

Из работы [4] следует, что во второй пленке при $k > 0$ существует резонанс внешней и внутренней волн (пересечение дисперсионных кривых парциальных ПМСВ происходит на частоте 3390 МГц при $k=145 \text{ см}^{-1}$). Поэтому ветвь I на рис. 1 описывает дисперсию ПМСВ, которая при $k < 145 \text{ см}^{-1}$ и при $f < 3530 \text{ МГц}$ представляет собой внутреннюю

волну, распространяющуюся на границе между ферритовыми слоями, а при $k > 145 \text{ см}^{-1}$ и $f > 3530 \text{ МГц}$ внешнюю волну, распространяющуюся по границе пленка—воздух. Кривая *II* на рис. 1 описывает дисперсию ПМСВ, которая при $k < 145 \text{ см}^{-1}$ и $f < 3230 \text{ МГц}$ является внешней волной, распространяющейся по границе пленка—воздух, а при $k > 145 \text{ см}^{-1}$ и $f > 3230 \text{ МГц}$ внутренней волной, распространяющейся по границе между ферритовыми слоями. Из рис. 2 видно, что потери на распространение у внутренних волн всегда больше, чем у внешних. Известно также [2], что потери на распространение всех ПМСВ растут с уменьшением $v_{\text{гр}}$.

При превращении внутренней волны во внешнюю (кривая *I* на рис. 1) эти процессы конкурируют между собой, что должно вести к появлению минимума на зависимости потерь на распространение от частоты для ПМСВ, описываемых дисперсионной кривой *I* на рис. 1, при $f \approx 3530 \text{ МГц}$, что и подтверждается наличием минимума на кривой *I* рис. 2. При превращении внешней волны во внутреннюю (кривая *II* на рис. 1) указанные процессы суммируются, в результате чего зависимость потерь на распространение от частоты должна иметь большую крутизну при $f \approx 3230 \text{ МГц}$, что и подтверждается кривой *II* на рис. 2. Из вышеизложенного следует, что впервые экспериментально доказано существование резонанса внешней и внутренней волн. При $k < 0$ ветви спектра ПМСВ во второй пленке имеют ту же природу, что ветви спектра ПМСВ в первой пленке.

Спектр ПМСВ в двухслойной пленке с параметрами, близкими к параметрам второй пленки, впервые исследовался в [5], где сообщалось о наблюдении трех ветвей спектра и описывались две из них (поскольку ветвь, аналогичная 2, является, по мнению авторов [5], зеркальным отражением ветви 1). При этом утверждалось, что ветвь, описываемая кривой типа *I*, соответствует внутренней ПМСВ, а ветвь, описываемая кривой типа *II* — внешней.

Из рис. 2 видно, что потери на распространение ПМСВ вдоль границы ферритовых слоев больше, чем аналогичные потери при распространении ПМСВ по границе пленка—подложка, хотя, казалось бы, должно быть наоборот, поскольку кристаллографические решетки ферритовых слоев совпадают между собой лучше, чем с кристаллографической решеткой ГГГ. Однако подложка из ГГГ перед нанесением первого ферритового слоя подвергалась специальной очистке и обработке, а поверхность первого ферритового слоя перед нанесением второго — нет. Наши эксперименты не подтвердили решающего влияния поля анизотропии на границе ферритовых слоев на спектр ПМСВ, о чем шла речь в [5]. В исследованных нами пленках поле анизотропии так же слабо влияло на спектр ПМСВ, как и в [7] на спектр ПМСВ в однослойной пленке.

Таким образом, в работе впервые обнаружены а) все возможные ветви спектра ПМСВ в двухслойных ферритовых пленках, б) резонанс внешней и внутренней волн в таких пленках.

Авторы признательны А. В. Вашковскому, А. В. Мясникову и Ю. Б. Рудому за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] *Валнэ Г. М.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1984. № 8. С. 13—25.
- [2] *Беспятых Ю. И., Зубков В. И.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 11. С. 2386—2394.
- [3] *Вашковский А. В., Стальмахов А. В.* // РЭ. 1984. Т. 29. № 5. С. 901—907.
- [4] *Зубков В. И., Епанечников В. А.* // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 23. С. 1419—1423.
- [5] *Березин И. Л., Вашковский А. В., Вороненко А. В.* и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1233—1234.
- [6] *Зильберман П. Е., Казаков Г. Т., Тихонов В. В.* // РЭ. 1985. Т. 30. № 6. С. 1164—1169.
- [7] *Чивилева О. А., Гуревич А. Г., Эмирян Л. М.* // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 1. С. 110—115.

Институт радиотехники и электроники АН СССР

Поступило в Редакцию
17 января 1989 г.