

05

## **Дисперсионные характеристики поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах феррит– сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл**

© В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос, С.Ф. Карманенко,  
А.А. Семенов, П. Эденхофер

С.-Петербургский государственный электротехнический университет,  
197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: eivt@eltech.ru

Институт высокочастотной техники, Университет Бохума,

D-44780 Бохум, Германия

E-mail: edh@hf.rubr-uni-bochum.de

*Поступило в Редакцию 19 ноября 2001 г.*

Экспериментально исследованы дисперсионные характеристики гибридных поверхностных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в слоистых структурах, состоящих из ферритовой пленки, контактирующей с ней сегнетоэлектрической пластины и металлического экрана, расположенного на заданном расстоянии от поверхности сегнетоэлектрика. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами расчета по построенной ранее теории. Получено хорошее количественное совпадение теоретических и экспериментальных дисперсионных зависимостей.

Исследование гибридных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик, начатое в работах [1–4], является весьма перспективным в связи с возможностью построения на основе таких структур сверхвысокочастотных устройств, непрерывно перестраиваемых с помощью управляющего электрического поля [5]. Замена обычного способа управления рабочими характеристиками спин-волновых устройств, основанного на изменении постоянного магнитного поля, на управление электрическим полем, изменяющим диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрического слоя, позволяет существенно улучшить их характеристики. В сравнении

со спин-волновыми устройствами на ферритовых пленках устройства на слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик характеризуются значительно более высокой скоростью перестройки, меньшими затратами энергии для осуществления управления и меньшими габаритами. В настоящее время исследование волновых процессов в слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик становится особенно актуальным в связи с удачными попытками выращивания высококачественных сегнетоэлектрических пленок на поверхности поликристаллических [6] и монокристаллических [7] ферритов.

В работах [8,9] была построена общая теория электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик, и произведен анализ геометрии слоистой структуры с точки зрения достижения оптимальных условий для управления дисперсионными характеристиками гибридных волн при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя. Было показано, что наиболее перспективным в этом смысле является использование поверхностных гибридных волн, распространяющихся в слоистых структурах, состоящих из сравнительно толстой ферритовой пленки, контактирующей с ней сегнетоэлектрической пластины и металлического экрана. Теоретически наибольшая эффективность управления достигается в том случае, когда частотный диапазон безобменных поверхностных магнитостатических спиновых волн лежит вблизи частоты отсечки первой толщиной моды поперечных электромагнитных волн  $TE_1$ . При этом частота отсечки моды  $TE_1$  определяется параметрами сегнетоэлектрического слоя и расстоянием между его поверхностью и металлическим экраном. В частном случае отсутствия металлического экрана эта частота зануляется.

Несмотря на обилие теоретических работ, посвященных исследованию гибридных электромагнитно-спиновых волн (см. список литературы в [9]), экспериментальные исследования в данной области практически не проводились. Исключением являются лишь работы [1,3,4], в которых экспериментально исследовалась гибридизация электромагнитных мод сегнетоэлектрического волновода с обратными объемными [4] и поверхностными [1,3] спиновыми волнами. В этих работах волновые процессы исследовались в условиях слабой гибридизации, когда сегнетоэлектрический волновод был удален от поверхности ферритовой пленки на значительное расстояние. В таких условиях гибридизация наблюдалась как узкий пик поглощения на амплитудно-

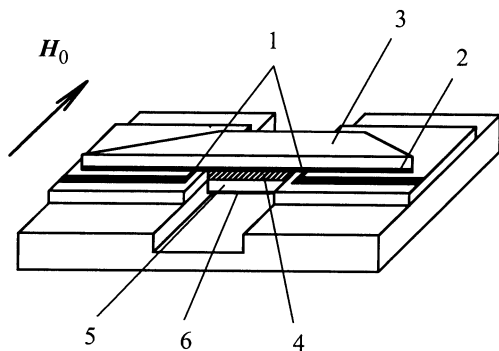


Рис. 1. Экспериментальный макет.

частотной характеристике вблизи точки, соответствующей пересечению дисперсионных кривых электромагнитных и спиновых волн. Кроме того, в [3] были измерены дисперсионные характеристики гибридных волн при приближении сегнетоэлектрического волновода к ферритовой пленке. Однако эти измерения были выполнены в узком диапазоне частот и волновых чисел, прилегающем к точке пересечения дисперсионных кривых. Ни в одной из перечисленных работ не исследовалось влияние на дисперсию гибридных волн металлических экранов. Кроме того, до настоящего времени не были получены экспериментальные результаты, с помощью которых было бы возможно оценить адекватность построенных ранее теоретических моделей, описывающих гибридные электромагнитно-спиновые волны.

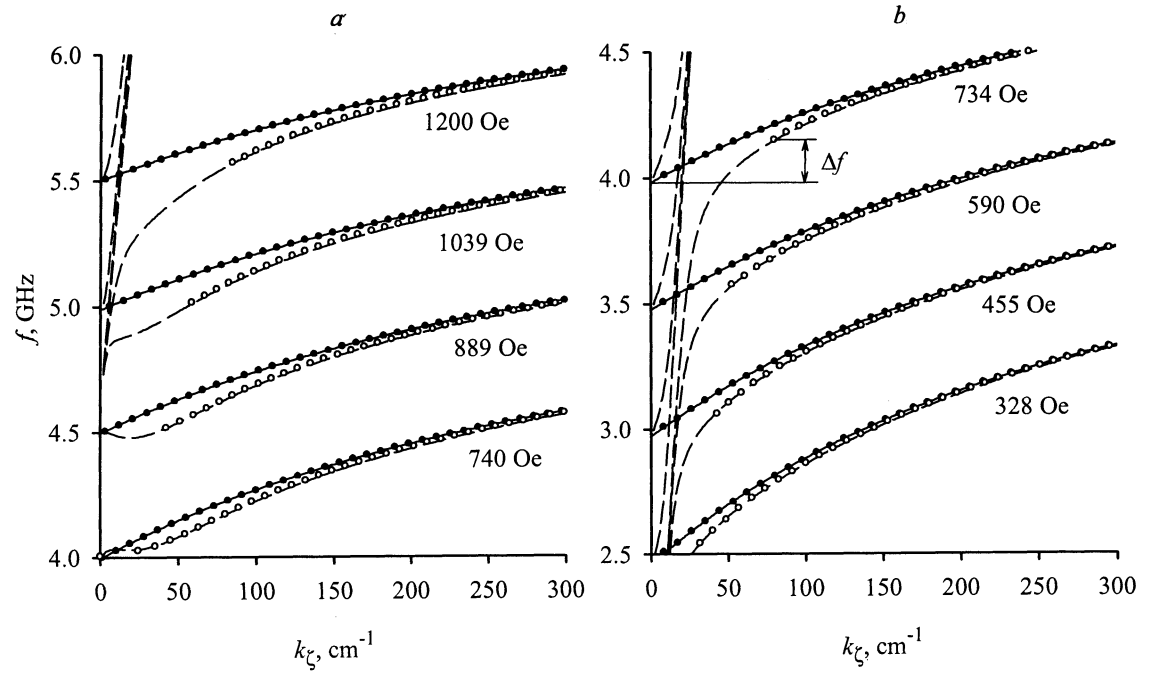
Целью данной работы является экспериментальное исследование дисперсионных характеристик гибридных поверхностных электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл, и сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими расчетами, дающее возможность установить точность развитой ранее теории гибридных электромагнитно-спиновых волн.

Для экспериментального исследования поверхностных электромагнитно-спиновых волн использовалось устройство, изображенное на рис. 1. Оно состояло из двух микрополосковых линий передачи, закан-

чивающихся двумя короткозамкнутыми преобразователями спиновых волн 1 шириной  $50 \mu\text{m}$  и длиной  $3 \text{mm}$ . Расстояние между преобразователями составляло  $7 \text{mm}$ . Пленка железоиттриевого граната (ЖИГ) 2 толщиной  $L = 16.5 \mu\text{m}$  и шириной  $3 \text{mm}$ , выращенная на подложке из гадолиний-галлиевого граната 3 толщиной  $b = 500 \mu\text{m}$ , размещалась поверх преобразователей. Снизу к ферритовой пленке с помощью специального устройства прижималась слоистая структура, состоящая из сегнетоэлектрической пластины 4, диэлектрической прокладки 5 толщиной  $d$  и металлического экрана 6. Сегнетоэлектрическая пластина была получена из объемного керамического образца титаната бария-стронция  $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ . Пластина имела ширину  $3 \text{mm}$ , длину  $4.5 \text{mm}$  и толщину  $a = 315 \mu\text{m}$ . Измерительное устройство помещалось в постоянное магнитное поле напряженностью  $H_0$ , приложенное параллельно преобразователям.

В описанной выше системе входной преобразователь возбуждал поверхностную магнитостатическую спиновую волну (ПМСВ), которая, распространяясь в ферритовой пленке, входила в область слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик-диэлектрик-металл (ФСДМ) и трансформировалась в гибридную электромагнитно-спиновую волну. Далее происходила обратная трансформация и прием волны выходным преобразователем.

Для определения дисперсионных характеристик гибридных электромагнитно-спиновых волн измерения проводились в два этапа. Сначала измерялась дисперсионная характеристика поверхностных магнитостатических волн при удаленной слоистой структуре сегнетоэлектрик-диэлектрик-металл. Для этого измерялась их фазочастотная характеристика и по ее наклону рассчитывалась зависимость групповой скорости волн от частоты. Абсолютное значение волновых чисел определялось из того условия, что частота начала полосы пропускания на амплитудно-частотной характеристике соответствует нулевому волновому числу. При обработке результатов значения волновых чисел ПМСВ уточнялись путем совмещения экспериментальной дисперсионной кривой с теоретической, рассчитанной по формуле Деймона-Эшбаха [10]. На втором этапе измерялась фазочастотная характеристика (ФЧХ) устройства при последовательном приближении структуры сегнетоэлектрик-диэлектрик-металл к поверхности ферритовой пленки вплоть до полного прижима. При этом отслеживалось частотное перемещение характерных точек ФЧХ, значения волновых чисел для которых были опре-

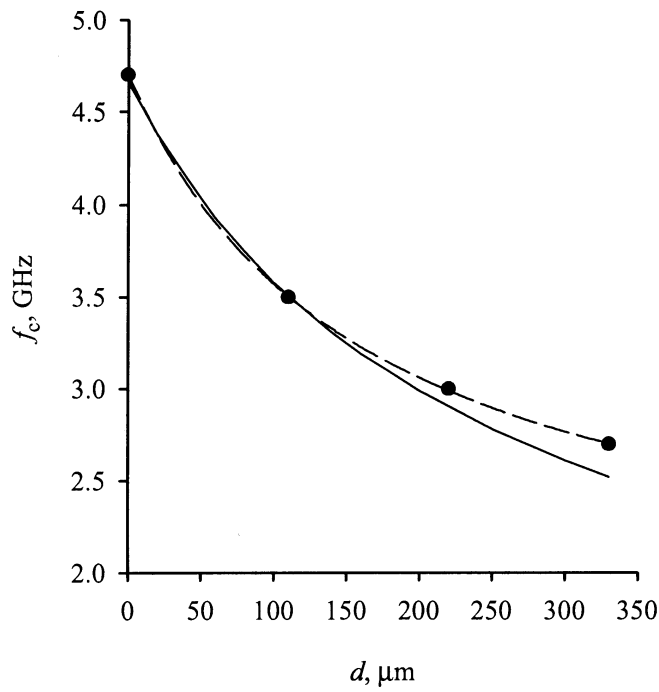


**Рис. 2.** Экспериментальные и теоретические дисперсионные кривые гибридных поверхностных волн для различных значений напряженности постоянного магнитного поля.

делены на первом этапе. Таким образом получалась результирующая дисперсионная кривая для волн, распространяющихся последовательно в ферритовой пленке, слоистой структуре ФСДМ и опять в ферритовой пленке. Искомая дисперсионная характеристика гибридных волн, распространяющихся в слоистой структуре ФСДМ, находилась из двух полученных дисперсионных кривых с учетом расстояний, проходимых волной в свободной ферритовой пленке и в слоистой структуре ФСДМ.

На рис. 2 точками показаны результаты измерений дисперсионных характеристик при различных значениях напряженности постоянного магнитного поля  $H_0$  (значения  $H_0$  указаны около кривых). Две части рисунка, *a* и *b* соответствуют случаям, когда металлический экран расположен непосредственно на поверхности сегнетоэлектрической пластины (рис. 2, *a*) и когда металлический экран полностью отсутствует (рис. 2, *b*). Закрашенные точки соответствуют поверхностным магнитостатическим спиновым волнам в свободной ферритовой пленке при отсутствии сегнетоэлектрической пластины, незакрашенные точки — гибридным электромагнитно-спиновым волнам. Линиями на рисунке обозначены теоретические дисперсионные кривые. Сплошные линии показывают дисперсионные кривые ПМСВ, рассчитанные по формуле Деймона–Эшбаха; штриховые линии показывают дисперсионные кривые гибридных волн, рассчитанные по формулам работы [9]. При расчетах теоретических дисперсионных кривых гибридных волн использовалось значение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической керамики  $\epsilon_a = 2600$ . Оно было получено из измерений емкости плоского конденсатора, сформированного на сегнетоэлектрической пластине, аналогичной использованной в экспериментах.

Как видно из рисунка, в случае металлизированной сегнетоэлектрической пластины значительное отклонение дисперсионной кривой гибридных волн от дисперсионной кривой ПМСВ при увеличении  $H_0$  начинает проявляться при смещении частотного диапазона спиновых волн к частоте отсечки электромагнитной моды  $TE_1$  (в данном случае — 4700 МГц). В случае свободной сегнетоэлектрической пластины названное отклонение с увеличением поля происходит постепенно, так как в этом случае частота отсечки  $TE_1$  равна нулю. По мере того как частотный диапазон спиновых волн смещается в область частот, лежащих выше частоты отсечки электромагнитной волны, спектр становится двухмодовым и энергия исходной ПМСВ тратится на возбуждение волн, соответствующих обеим ветвям гибридизированных дисперсионных



**Рис. 3.** Экспериментальная и теоретическая зависимости частоты отсечки электромагнитной волны  $TE_1$  от расстояния между поверхностью сегнетоэлектрической пластины и металлическим экраном.

кривых. Это выражается в возникновении интерференции на начальном участке полосы пропускания, которая не позволяет измерить дисперсию гибридных волн на частотах, соответствующих малым волновым числам (интервал  $\Delta f$  на рис. 2, *b*). При дальнейшем увеличении  $H_0$  такой частотный интервал расширяется.

Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими демонстрирует хорошее совпадение на участках, соответствующих сравнительно малым волновым числам. По мере увеличения значения волнового числа наблюдается отклонение экспериментальных дисперсионных кривых от теоретических. При этом теория предсказывает более

сильную гибридизацию, чем это наблюдается в эксперименте. Такое поведение можно объяснить неидеальностью контакта между ферритом и сегнетоэлектриком, которая приводит к существованию тонкого воздушного зазора между ними. Длинные спиновые волны, амплитуда электромагнитных полей которых медленно спадает с удалением от поверхности ферритовой пленки, менее чувствительны к существованию воздушного зазора. Для коротких спиновых волн, амплитуда полей которых резко спадает на расстояниях в несколько сотен микрон, наличие зазора приводит к существенному ослаблению проникновения полей в сегнетоэлектрик и, как следствие, к ослаблению гибридизации спиновых волн с электромагнитными модами сегнетоэлектрической пластины.

Исследования дисперсионных характеристик гибридных электромагнитно-спиновых волн проводилось также для нескольких промежуточных значений толщины диэлектрической прокладки:  $d = 110, 220$  и  $330 \mu\text{m}$ . В каждом из этих случаев также было получено хорошее совпадение экспериментальных и теоритических дисперсионных зависимостей.

В ходе экспериментов при каждом значении толщины диэлектрической прокладки определялась частота отсечки электромагнитных волн типа  $TE_1$  как частота, при которой соответствующее началу полосы пропускания волновое число гибридных волн начинало резко возрастать. Результаты этих измерений показаны на рис. 3 точками. Сплошной линией на рисунке показана теоретическая кривая. Как видно из рисунка, хорошее совпадение между экспериментом и теорией существует при малых  $d$ . С увеличением расстояния до металла наблюдается небольшое рассогласование. Такое поведение можно объяснить существованием электромагнитных полей рассеяния, обусловленных ограниченностью размеров слоистой структуры в плоскости, которые не были учтены в теории. При увеличении величины диэлектрического зазора толщина структуры становится сравнимой с ее шириной, что приводит к увеличению влияния полей рассеяния на свойства волн.

Результаты настоящей работы свидетельствуют, что построенная в [9] теория гибридных электромагнитно-спиновых волн с хорошей точностью описывает распространение поверхностных гибридных волн в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл.



Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 99-02-16370), международной организацией INTAS (грант № 99-1812) и Немецким научным обществом (грант DFG 2001).

## Список литературы

- [1] Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Гуляев Ю.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 15–16. С. 938–943.
- [2] Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Гуляев Ю.В. и др. // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. В. 3. С. 494–499.
- [3] Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Гуляев Ю.В. и др. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. В. 2. С. 320–324.
- [4] Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Зильберман П.Е. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 114–117.
- [5] Demidov V., Edenhofer P., Kalinikos B. // Electronics Letters. 2000. V. 37. N 19. P. 1154–1156.
- [6] Jia Q.X., Groves J.R., Arendt P. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 11. P. 1564–1566.
- [7] Kim W.J., Chang W., Qadri S.B. et al. // Appl. Phys. A (Mater. Sci. Proc.). 2000. V. A71. N 1. P. 7–10.
- [8] Демидов В.Е., Калиникос Б.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 2. С. 89–93.
- [9] Демидов В.Е., Калиникос Б.А., Эденхофер П. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 3. С. 61–68.
- [10] Damon R.W., Eshbach J.R. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. N 3/4. P. 308–320.