

05.4;06

Исследование дисперсионных характеристик магнитостатических волн, распространяющихся на границе феррит–перовскитный слой

© С.Ф. Карманенко, А.А. Семенов, А.А. Мелков,
Н.Н. Исаков, Я. Васькевич

С.-Петербургский электротехнический университет
Белостокский политехнический институт, Белосток, Польша

Поступило в Редакцию 29 мая 2000 г.

Экспериментально исследован процесс распространения магнитостатических волн (МСВ) на границе пленки железиттриевого граната (YIG) и слоя материала, обладающего структурой перовскита. СВЧ измерения дисперсионных характеристик проводились при комнатной температуре и при 77 К. В качестве перовскитного материала применялись пластины LaAlO_3 , сегнетоэлектрика SrTiO_3 и сверхпроводниковые пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO). Предложен способ эффективного управления скоростью и фазой распространения МСВ в структуре YIG/YBCO. Снижение плотности критического тока YBCO пленки от 1 до $0.7 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ при 77 К изменяло фазовый набег в слоистой структуре более 1.5π , на частоте 3 GHz.

Магнитостатические, или спиновые волны (СВ) являются медленными электромагнитными волнами, возбуждаемыми в СВЧ диапазоне в ферромагнитных материалах с малыми потерями. Для распространения СВ наиболее часто используются эпитаксиальные пленки железиттриевого граната — ЖИГ ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ — YIG).

Возбуждение СВ осуществляется при наличии постоянного магнитного поля, которое намагничивает ферромагнитную пленку до насыщения, т. е. приводит элементарные магнитные моменты в узлах кристаллической решетки в жестко связанную цепочку. Приложенное локальное возмущение, вызванное, например, током в проводнике, возбуждает спиновую волну, которая распространяется в пленке ЖИГ. Обратное преобразование СВ происходит во втором проводнике, расположенном на определенном расстоянии от первого. Это и составляет принцип рабо-

ты многих СВ приборов. Простейшим возбуждающим преобразователем является отрезок микрополосковой линии. В данном случае величина волнового вектора \mathbf{k} может изменяться в широких пределах и определяется геометрическими параметрами преобразователя и конструкцией СВ структуры.

Для разработки принципиально новых радиоэлектронных устройств применяются слоистые структуры, в которых СВ распространяется вдоль границы ЖИГ и слоя, обладающего другими уникальными физическими свойствами [1]. В работе [2] представлены широкие возможности структуры ЖИГ/сверхпроводник для таких СВЧ устройств, как циркуляторы, переключатели, фазовращатели с широким динамическим диапазоном. Самым распространенным сверхпроводником в современной электронике является перовскитное соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO). В экспериментах по распространению СВ в структурах YIG/YBCO, проведенных в работе [3], было продемонстрировано снижение СВЧ потерь в результате применения сверхпроводниковых пленок в полосно-пропускающих СВЧ фильтрах вместо микрополосковых линий из меди. В последние годы проводятся активные исследования процессов выращивания сверхпроводниковых пленок на гетероэпитаксиальных слоях ЖИГ [4,5]. Вместе с этим достаточно реальные практические перспективы имеет структура, в которой пленка ЖИГ плотно прикладывается к сверхпроводниковой пленке. В работе [1] анализируется процесс распространения СВ в слоистой структуре, включающей сегнетоэлектрик (СЭ), и предсказываются очень высокие характеристики СВЧ приборов на основе структур металл/СЭ/ЖИГ/СЭ/металл. Таким образом, слоистая структура ЖИГ/перовскитный слой является перспективным объектом физико-технологических исследований для целей СВЧ электроники.

В данной работе рассматривается возможность управления процессом распространения СВ на интерфейсе структуры ЖИГ/перовскитный слой (сверхпроводник YBCO, сегнетоэлектрик $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BSTO) и линейный диэлектрик LaAlO_3 (LAO)).

В качестве СВ волноводов применялись эпитаксиальные пленки ЖИГ толщиной в несколько микрон, выращенные в процессе жидкофазной эпитаксии [6]. Сверхпроводниковые пленки YBCO выращивались в процессе магнетронного распыления стехиометрической мишени [7] на подложках LAO [8].

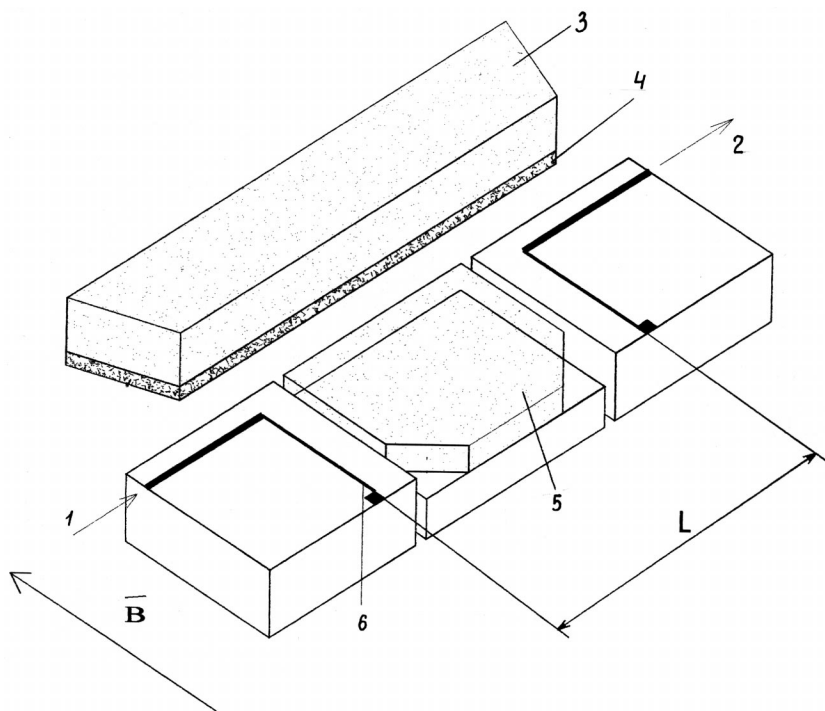


Рис. 1. Схематическое изображение волноведущей структуры ЖИГ/перовскитный слой: 1 — входной преобразователь; 2 — выходной преобразователь; 3, 4 — основание и пленка ЖИГ; 5 — перовскитный слой; 6 — микрополосковая линия.

Схематическое изображение волноведущей структуры измерительного макета показано на рис. 1. Структура включает входной и выходной преобразователи СВЧ сигнала, экран, расположенный между преобразователями, и волновод из пленки ЖИГ. Пленочный ЖИГ волновод плотно прикладывается сверху преобразователей и экрана, расположенных в одной плоскости. Расстояние между возбуждающим и приемным антенными преобразователями составляло 7.25 mm (L на рис. 1). Волноведущая структура закрепляется в измерительном макете, в состав которого входят миниатюрные электромагниты, СВЧ коаксиальные разъемы и металлическое основание, изготовленные из немагнитного

материала. Измерительный макет помещается в однородное постоянное магнитное поле, направленное по касательной к поверхности пленки ЖИГ, и перпендикулярно направлению распространения спиновых волн. Для измерений при криогенной температуре измерительный макет устанавливается в резервуар с жидким азотом.

Экспериментальная установка для измерения дисперсионных характеристик построена на базе панорамного измерителя КСВН Р2-54. Работа измерителя основана на раздельном выделении сигналов, пропорциональных мощности, падающей от генератора, и мощности, прошедшей через исследуемую структуру. После выделения падающей волны происходит разделение сигнала на прямой и задержанный (прошедший через измеряемый объект), которые суммируются на направленном ответвителе. Запоминание характеристик и дальнейшая обработка выполняются с помощью компьютера, подключенного к измерителю.

Пленка ЖИГ, применявшаяся для измерений, имела толщину $d \approx 8 \mu\text{m}$, намагниченность насыщения при температуре 77 К — $M = 1400 \text{ Oe}$, подмагничивающее поле $H \approx 566 \text{ Oe}$. Пленка YBCO имела толщину $h \approx 0.6 \mu\text{m}$.

Из анализа интерференционной картины можно восстановить ход дисперсионной зависимости. На рис. 2, *a* изображена интерференционная картина, полученная при 77 К, с применением одного из сверхпроводящих пленочных экранов (№ 1). Волновое число, соответствующее положению минимумов и максимумов, определяется следующим соотношением: $k = \frac{i\pi}{L}$, где i — номер пика, а L — расстояние между антеннами ($L = 7.25 \text{ mm}$, рис. 1). На рис. 2, *b* представлены дисперсионные характеристики, соответствующие интерференционной картине, приведенной на рис. 2, *a*, и другому сверхпроводящему экрану (линия 2).

Сверхпроводящие пленки были выращены в едином технологическом процессе и имели прямоугольную форму $6 \times 5 \text{ mm}$. Впоследствии один из образцов (№ 2) подвергался короткой температурной закалке на воздухе. В результате образец 1 обладал критической температурой 90 К и плотностью критического тока при 77 К — $J_c \approx 1 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. Образец № 2 имел $T_c \approx 90 \text{ K}$ и $J_c (77 \text{ K}) \approx 7 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$.

Применение графического дифференцирования дисперсионной характеристики $V_{gr} = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ позволяет получить зависимость групповой скорости СВ (V_{gr}) от волнового числа. Групповые скорости СВ, распространяющихся вдоль границы сверхпроводник/феррит, приведены на

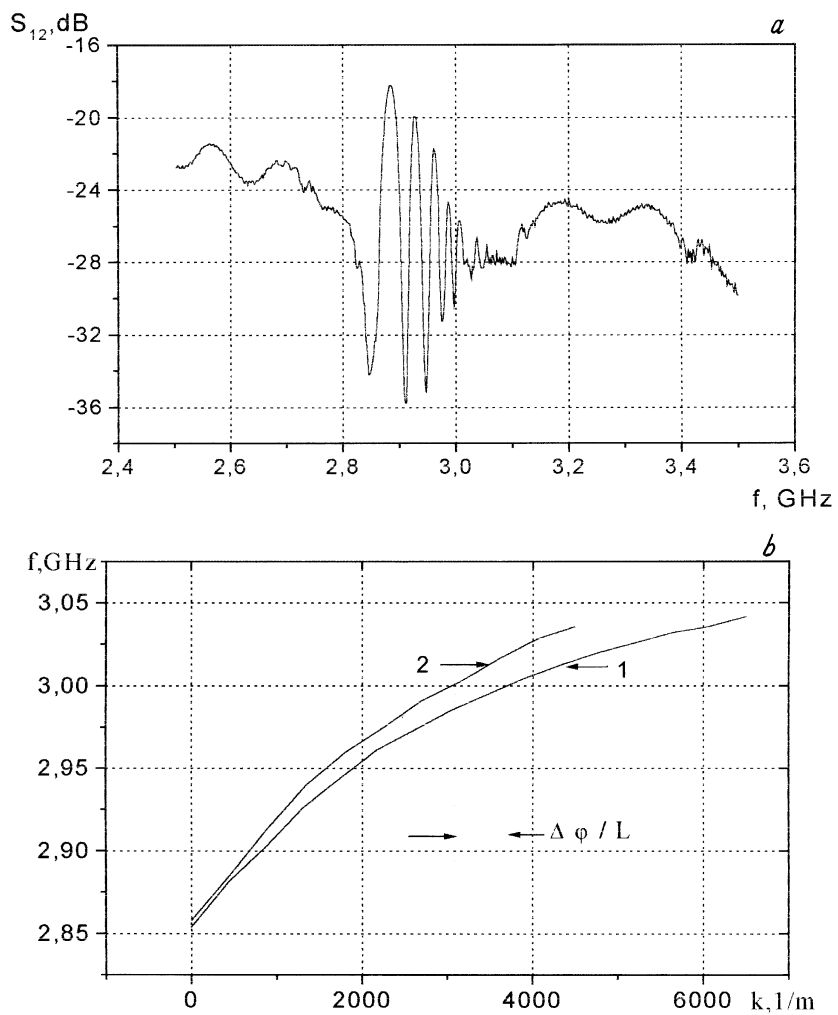


Рис. 2. Частотные характеристики СВ структуры YIG/YBCO: *a* — интерференционная картина, полученная при 77 К с применением сверхпроводящего экрана № 1; *b* — дисперсионные характеристики, соответствующие интерференционным картинам, измеренным с YBCO пленками № 1 и 2 соответственно.

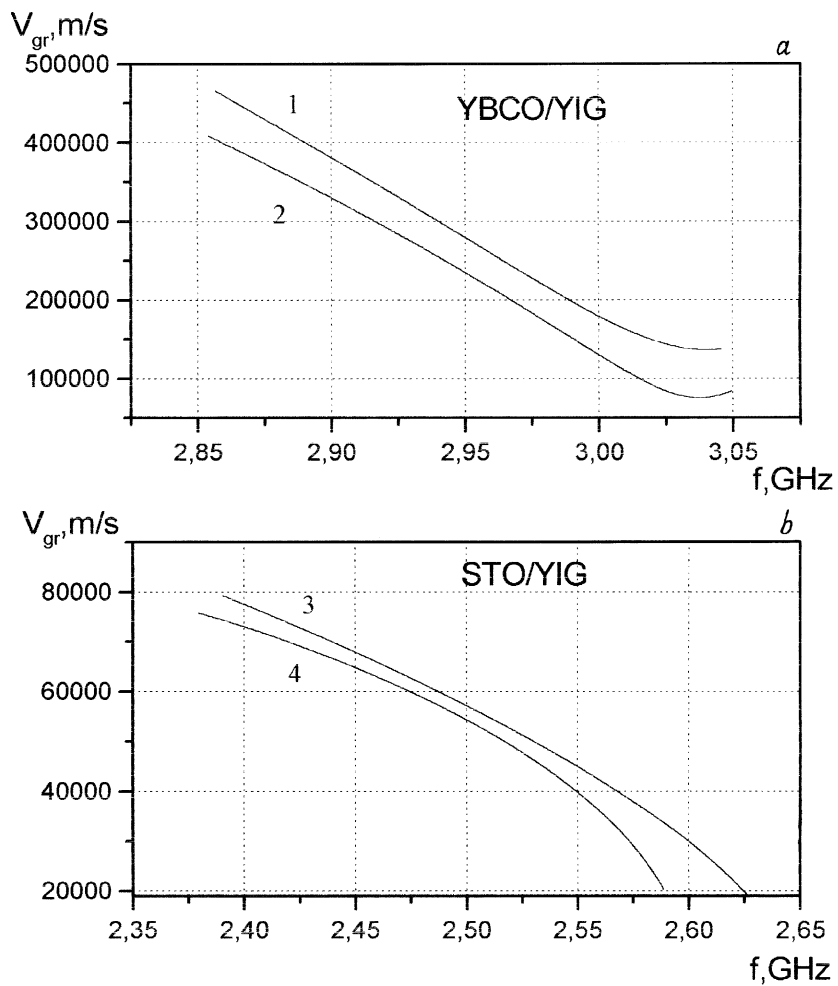


Рис. 3. Управление дисперсионной характеристикой посредством изменения свойств перовскитной пленки: *a* — структура YIG/YBCO ($T = 77$ K): 1 — пленка № 1 — $j_c = 1 \cdot 10^{10}$ A/m², $T_c = 90$ K, 2 — пленка № 2 — $j_c = 7 \cdot 10^9$ A/m², $T_c = 90$ K; *b* — структура YIG/диэлектрик ($T = 300$ K): 3 — YIG/LAO ($\epsilon = 22$), 4 — YIG/STO ($\epsilon = 450$).

рис. 3, *a*. На рис. 3, *b* показано сравнение аналитических характеристик слоистых структур ЖИГ–перовскитный диэлектрик.

Вид полученных дисперсионных характеристик (рис. 2, *b*) и частотных зависимостей групповой скорости СВ (рис. 3) в структурах ЖИГ/перовскитный слой наглядно свидетельствует о существовании эффективной возможности управления скоростью и фазой СВЧ сигнала, например фазовый сдвиг ($\Delta\varphi = (k_1 - k_2) \times L$) в структуре ЖИГ/ВТСП составляет 1.75π , что является достаточно большим значением для СВЧ управляемых устройств. Изменение характеристик сверхпроводниковой пленки может достигаться непосредственно в эксперименте при воздействии электрическим смещением или облучением пленки. Таким образом, появляется дополнительная возможность управления процессом распространения СВ в ферритовых структурах.

Подобной возможностью построения управляемого СВЧ устройства обладает структура ЖИГ/СЭ слой. Регулируя электрическое смещение и изменяя диэлектрическую проницаемость СЭ слоя [9], можно управлять групповой скоростью СВ и фазовым сдвигом. Из сравнения приведенных на рис. 3, *a* и *b* характеристик групповой скорости следует, что структура ЖИГ/СЭ имеет более крутую частотную зависимость и довольно высокие значения $\Delta\varphi$.

Поскольку магнитное управление в СВ устройствах является довольно медленным, то применение быстрого электрического и светового управления в спин-волновых приборах представляется весьма перспективным.

Авторы признательны проф. Б.А. Калиникосу за поддержку и участие в исследованиях по теме данной работы.

Работа выполнена в рамках проекта Интерфейс (№ 98055) государственной программы "Сверхпроводимость" и проекта ЛЭТИ по программе МОРФ "Научные исследования высшей школы в области производственных технологий" (Электроника).

Список литературы

- [1] Демидов В.Е., Калиникос Б.А. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 21. С. 86–94.
- [2] Dionne G.F., Oates D.E., Temme D.H., Weiss J.A. // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 1996. V. 44. N 7. P. 1361–1368.
- [3] Карманенко С.Ф., Семенов А.А. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 3. С. 12–17.

- [4] *Jia Q.X., Findikoglu A.T., Arendt P.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72. N 14. P. 1763–1765.
- [5] *Яковлев С.В., Каложная Л.А., Николайчук Г.А.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1997. Т. 23. В. 12. С. 69–73.
- [6] *Яковлев Ю.М., Генделев С.Ш.* // *Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике.* М.: Сов. радио, 1975. 190 с.
- [7] *Карманенко С.Ф., Семенов А.А., Свищев А.А.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. В. 15. С. 79–88.
- [8] *Морозов А.Н., Морозова О.К., Пономарев Н.М., Князев С.Н.* // *Сверхпроводимость. ФХТ.* 1992. Т. 5. В. 2. С. 388–399.
- [9] *Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Karmanenko S.F.* et al. // *Ferroelectrics* 1993. V. 144. N 1–4. P. 33–43.