

05.4;09;12

СВЧ полосовой фильтр на основе пленочной структуры сверхпроводник/феррит (YBCO/YIG)

© С.Ф. Карманенко, А.А. Семенов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 15 июля 1999 г.

Приводится демонстрация эффективного практического использования пленочных структур ВТСП/ЖИГ. Разрабатываемые на основе пленочных структур ВТСП/ЖИГ управляемые СВЧ фильтры могут найти практическое применение в аппаратуре связи и радиолокации.

Практические применения уникальных физических явлений, таких как спиновые волны (СВ) [1] и высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), активно исследуются в последние годы в связи с интенсивным развитием радиотелефонии и беспроводных телекоммуникаций [2,3]. Одним из наиболее распространенных приборов в средствах связи является полосно-пропускающий фильтр (ППФ). Узкая ширина полосы, практически нулевой уровень вносимых потерь, высокая крутизна фронтов и возможность перестройки частоты — таковы основные требования к современному радиоэлектронному ППФ [3].

Спиновые волны распространяются в монокристаллах и эпитаксиальных пленках железоиттриевого граната — ЖИГ — $Y_2Fe_5O_{12}$ (YIG) с предельно малым удельным затуханием в широком диапазоне частот. Основными трудностями при создании СВ устройств на основе пленок ЖИГ являются их низкая термостабильность и сравнительно высокий уровень потерь на преобразование сигнала. Поэтому сочетание сверхпроводниковых пленочных преобразователей $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) с пленками ЖИГ, в которых возбуждаются спиновые волны при фиксированной криогенной температуре, представляется перспективным направлением в радиоэлектронике.

Цель данной работы состояла в исследовании возможности применения сверхпроводящих антенн в перестраиваемом радиоэлектронном ППФ на основе бегущей волны.

Для проведения экспериментов была выбрана ферритовая эпитаксиальная пленка ЖИГ, выращенная на подложке галлийгадолиниевого граната (ГГГ), со следующими параметрами: намагниченность насыщения $M_s = 1200$ G, толщина $h = 62 \mu\text{m}$ и ориентация кристаллографических осей (111). Подобный тип пленок является весьма пригодным для построения ППФ, функционирующего при температуре 77 K, на основе структуры сверхпроводник/феррит в одном из перспективных СВЧ диапазонов — 1–3 GHz, который используется разработчиками базовых станций для сотовой радиотелефонии. Кроме этого, невысокое магнитное поле, приложенное к структуре, оказывает меньшее воздействие на сверхпроводниковую пленку и ее поверхностное сопротивление [4]. Спиновый волновод, вырезанный из пленки ЖИГ в форме трапеции $2 \times 7 \times 0.55$ mm (рис. 1, *a*), непосредственно прикладывался к пленочной топологии антенны. Торцы ферритовой волноведущей структуры имели скосы под углом $\sim 30^\circ$ для устранения отражения СВ от края волновода. Топология излучающего и принимающего преобразователей изображена на рис. 1, *b*: два микрополосковых отрезка, загнутые под углом 90° , размещены на подложке $17 \times 6 \times 0.5$ mm. Изменялись два размера антенной топологии — ширина микрополоска в части, сопрягаемой с пленкой ЖИГ (W), и расстояние между антеннами (L). В экспериментах применялись антенны с шириной $W = 15, 50$ и $500 \mu\text{m}$. Ширина подводящей микрополосковой линии составляла $500 \mu\text{m}$. Наряду со сверхпроводящими микрополосковыми антеннами, в работе исследовались аналогичные структуры с медными преобразователями.

На рис. 1, *c* представлена модель микрополосковой антенны, где R_0 , X_0 , B_0 и G_0 — параметры длинной линии в отсутствии излучения, а $Z_u = R_u + iX_u$ — комплексное сопротивление излучения [1]. Снижение потерь в устройстве со сверхпроводящими преобразователями может быть связано только с изменением первичных параметров длинной линии, а сопротивление излучения не зависит от материала преобразователей. Вероятно, в случае использования щелевых или копланарных антенн для возбуждения спиновых волн различие в уровне сверхпроводниковых и металлических антенн будет более значительным, поскольку в подобных антенных структурах будут дополнительно присутствовать потери на распространение спиновой волны вдоль границы раздела ферромагнетик–антенный преобразователь.

Сверхпроводящие пленки YBCO выращивались на обеих сторонах подложек LaAlO_3 (LAO) в процессе магнетронного распыления на

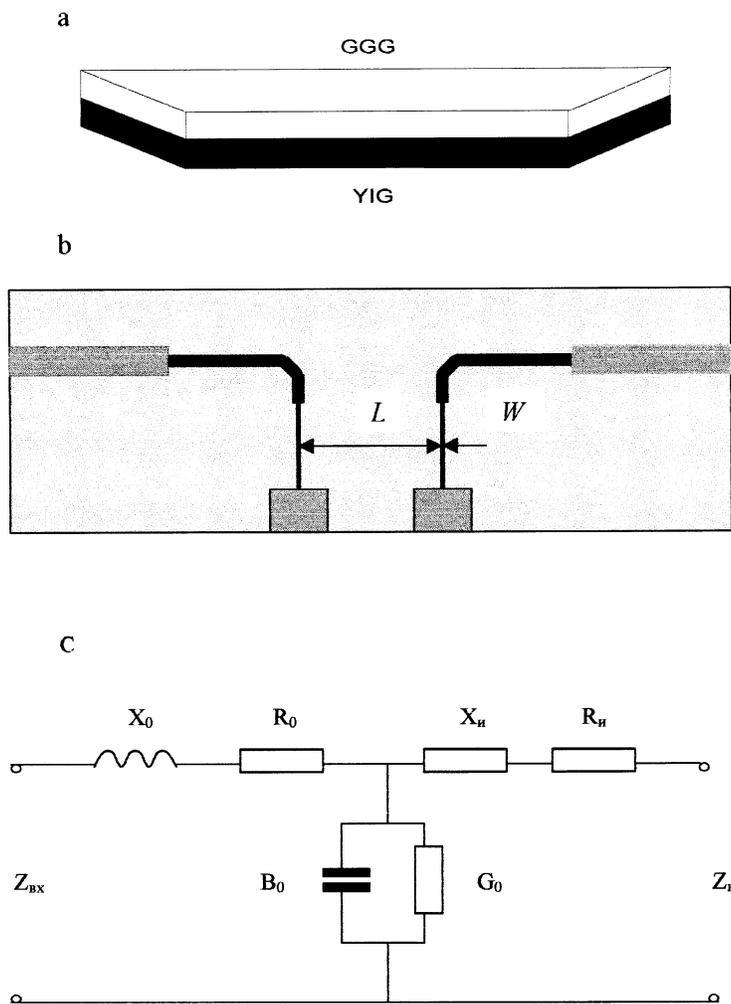


Рис. 1. Эскиз волноведущей структуры *a*, антенной топологии *b*. Эквивалентная схема микрополосковой антенны *c*.

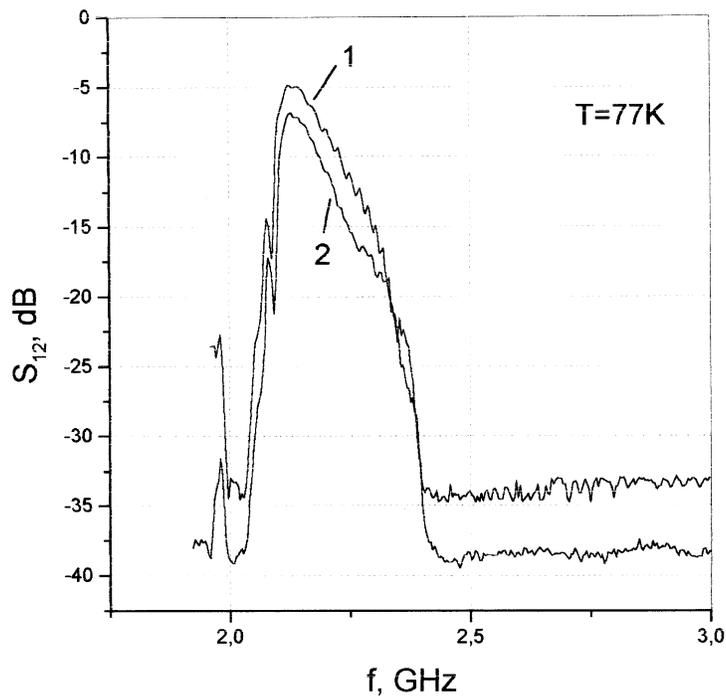


Рис. 2. Передаточные характеристики устройства: 1 — со сверхпроводящими антеннами, 2 — с медными антеннами.

постоянном токе [5] и подвергались процессу фотолитографии и химического травления. Толщина пленок YBCO составляла $0.7\text{--}1.0\ \mu\text{m}$. Для обеспечения надежного перехода с YBCO микрополоска на коаксиальные линии макета применялись слоистые композиции контактных площадок (Au/Ag), термокомпрессия и пайка. Конструкция корпуса включала миниатюрные электромагниты с сердечниками, с помощью которых создавалось однородное магнитное поле с вектором напряженности, параллельным поверхности пленки ЖИГ и перпендикулярным направлению распространения СВ. Для проведения измерений при криогенной температуре конструкция корпуса предусматривала возможность его погружения в резервуар с жидким азотом.

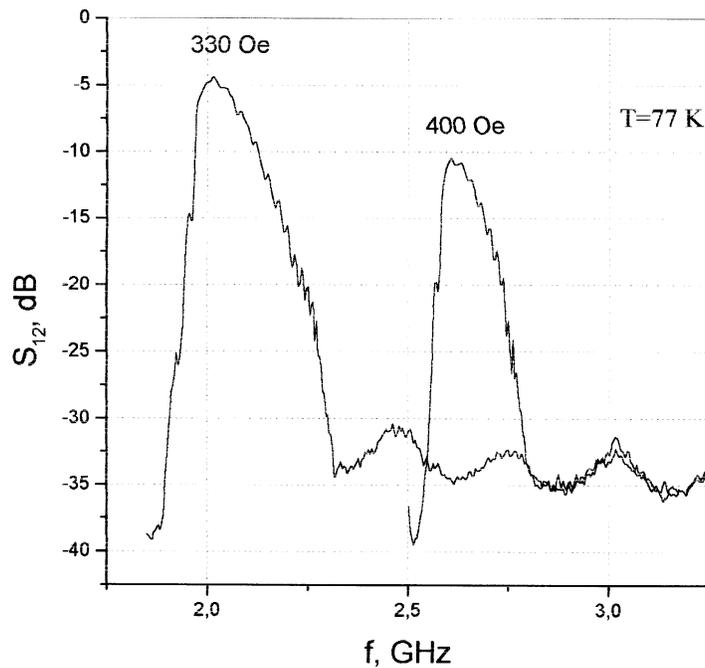


Рис. 3. Перестроение характеристики фильтра со сверхпроводящими антеннами в результате изменения подмагничивающего поля.

Экспериментальная установка для снятия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра была построена на базе панорамного измерителя КСВН Р2-54. Для запоминания полученных характеристик и их дальнейшей обработки к измерителю через специальную плату подключался компьютер.

В результате проведенных измерений были получены АЧХ спин-волновых ППФ для различных сочетаний ферритовых элементов, антенных преобразователей и температуры проведения эксперимента. Наибольший интерес представляет сравнение характеристик одинаковых конструкций с различным материалом антенны, измеренных при $T = 77$ К. На рис. 2 приведены две АЧХ для антенной структуры, в которой $W = 500 \mu\text{m}$ и $L = 5 \text{mm}$. Кривая 1 соответствует устройству

со сверхпроводящими, а кривая 2 — с медными антеннами. Различие уровня потерь в полосе пропускания составляет 2 dB и обусловлено снижением поверхностного сопротивления в сверхпроводниковых антеннах.

На рис. 3 приведены передаточные характеристики устройства, снятые при разном подмагничивающем поле, из которых видно, что незначительное изменение подмагничивающего поля (70 Oe) смещает центральную частоту на 600 МГц. Такая высокая чувствительность к перестройке параметров ППФ является весьма перспективной для построения управляемых СВЧ фильтров. Недостатком исследованной конструкции ППФ является изменение уровня потерь в полосе пропускания в результате перестройки центральной частоты.

Основным результатом проведенных экспериментов является демонстрация возможности построения и эффективной эксплуатации криогенных радиоэлектронных устройств на основе пленочной структуры ВТСП/ЖИГ и их преимущества по сравнению с аналогичными структурами металл/ЖИГ. В экспериментальных исследованиях применялась самая простая микрополосковая топология антенн. Применение микрополосковых преобразователей в виде синфазных и противофазных решеток [6]; конструкции ППФ с ограничительными и переключающими элементами в ВТСП антеннах, совмещенные конструкции пропускающих и запирающих фильтров способны улучшить характеристики управляемых криогенных СВ ППФ и способствовать их практическому применению.

Список литературы

- [1] *Дмитриев В.Ф., Калиникос Б.А.* // Изв. вузов. Физика. 1988. № 11. С. 24–53.
- [2] *Shen Z.-Y.* High temperature superconducting microwave circuits. Nortwood: Artech house, 1994. 420 p.
- [3] *Hammond R.B., Scalarino D.J., Schrieffer J.R., Willemsen B.A.* Microwave Journal. Euro-global edition. 1998. V. 41. N 10. P. 94–107.
- [4] *Gaidukov M.M., Karmanenko S.F., Kozyrev A.B., Soldatenko O.* // Supercond. Sci. Technol. 1994. V. 7. N 7. P. 721–726.
- [5] *Karmanenko S.F.* // Supercond. Sci. Technol. 1999. V. 12. N 1. P. 36–44.
- [6] *Журавлев А.В., Карманенко С.Ф., Нам Е.В., Семенов А.А.* // Труды конф. (IEEE-Russia MIA-ME'97) "Микроволновая электроника". Новосибирск, сентябрь 1997. С. 69–73.