

05.4;09;11;12

## **Взаимодействие ферромагнетика и высокотемпературного сверхпроводника на границе раздела в пленочных гетероструктурах**

© С.В. Яковлев, Л.А. Калюжная, Г.А. Николайчук,  
Т.А. Крылова, Б.М. Лебедь

Научно-исследовательский институт "ДОМЕН", С.-Петербург

Поступило в Редакцию 21 января 1997 г.

Создание пленочных гетероструктур высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП)–ферромагнетик является перспективным направлением применения их в спин-волновой электронике. Состояние границы раздела пленок ВТСП–ферромагнетик определяет характер распространения поверхностных магнитостатических волн в гетероструктуре. Процесс формирования пленок ВТСП в гетероструктуре включает термообработку при высоких температурах, что приводит к диффузионному взаимодействию пленок ВТСП и ферромагнетика. Гетероструктура состоит из ВТСП пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , нанесенной методом пиролиза на ферромагнитную пленку  $Y_3Fe_5O_{12}$ , эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний–галиевого граната  $Gd_3Ga_5O_{12}$  ориентации (111). Процессы интердиффузии изучались по кривым распределения интенсивностей рентгеновского излучения железа (Fe), бария (Ba), меди (Cu) и серебра (Ag), которое вводилось в порошок ВТСП в количестве 5–50 мас.%. Полученные пленочные гетероструктуры были исследованы в СВЧ диапазоне. Наблюдалась корреляция состояния границы раздела и СВЧ характеристиками.

Создание пленочных гетероструктур высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП)–ферромагнетик является перспективным направлением применения их в спин-волновой электронике [1]. При этом показано, что состояние поверхности раздела ВТСП–ферромагнетик в пленочных гетероструктурах определяет характер распространения поверхностных магнитостатических волн [2]. Процесс формирования пленок ВТСП в гетероструктурах включает в себя термообработку при достаточно высоких температурах ( $900^\circ\text{C}$ ), при которых становится су-

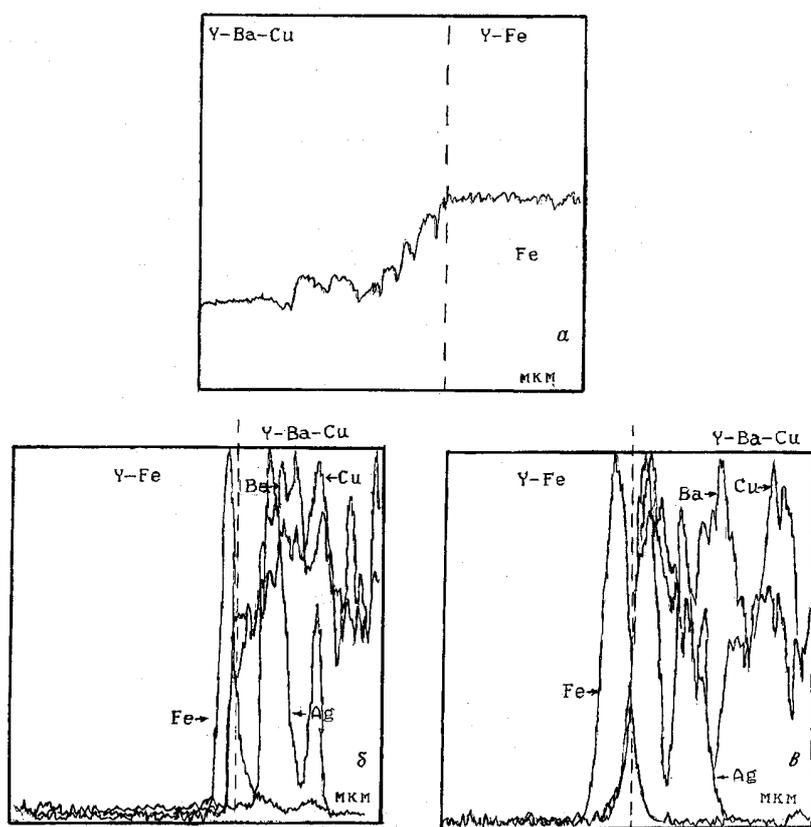
ществленным диффузионное взаимодействие на границе раздела пленка–подложка, особенно при наличии ферромагнитной подложки.

Данная работа посвящена исследованию процессов диффузии на границе раздела пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ – $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в зависимости от технологических условий получения пленки ВТСП в пленочных гетероструктурах и влияния состояния границы раздела на условия распространения магнитостатических волн в таких структурах. ВТСП пленки состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  были получены методом пиролиза на поверхности пленки иттрий-железного граната  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (ИЖГ), эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$  (ГГГ) ориентации (111). При получении пленки ВТСП в пленочных гетероструктурах ВТСП–ИЖГ использовался ВТСП порошок, полученный из растворов нитратов иттрия (Y), бария (Ba), меди (Cu), и легированный серебром (Ag).

Серебро вводилось в шихту в виде мелкодисперсного порошка с размером частиц 1.0–2.0 мкм сверх стехиометрического состава в количестве 5–50 мас.%. Суспензию ВТСП порошка с органическим связывающим (триэтаноламин) наносили на эпитаксиальную пленку ИЖГ методом центрифугирования (скорость вращения 2000 об/мин). Пленочные гетероструктуры проходили предварительную термообработку при температуре 550°C на воздухе, затем была проведена термообработка при различных температурно-временных режимах в атмосфере кислорода. Полученные пленочные гетероструктуры были исследованы методом рентгеноспектрального микроанализа, проводимого на растровом микроскопе S-570 "Hitachi" с рентгеновским спектрометром фирмы "Link".

Измерения проводились при напряжении 30 кВ, токе  $1 \cdot 10^{-9}$  А, диаметр зонда составлял 200 Å. Для пленочных гетероструктур с ВТСП пленкой, содержащей 0, 5, 30, 50 мас.% серебра, были получены кривые распределения интенсивности рентгеновского излучения железа (Fe), бария (Ba), меди (Cu), серебра (Ag). Исследование проводилось при линейном сканировании по торцевой поверхности шлифа гетероструктур ГГГ–ИЖГ–ВТСП.

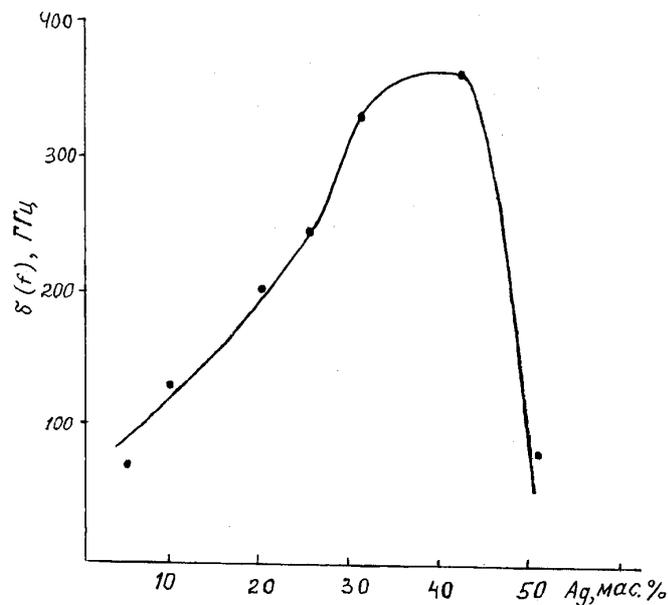
На рис. 1 приведены кривые распределения интенсивности рентгеновского излучения при различных концентрациях вводимого в пленку ВТСП серебра: *a* — 0 мас.% Ag; *б* — 5 мас.% Ag; *в* — 30 мас.% Ag. Как видно, для всех исследованных пленочных гетероструктур наблюдается диффузия Fe на подложки (пленка ИЖГ) в ВТСП пленку. Без серебра (0 мас.%) железо распространяется практически по всей



**Рис. 1.** Кривые распределения интенсивностей рентгеновского излучения Fe, Ba, Cu, Ag в пленочных гетероструктурах ИЖГ-ВТСП: *a* — 0 мас.% Ag; *b* — 5 мас.% Ag; *в* — 30 мас.% Ag.

толщине ВТСП пленки (рис. 1, *a*). При содержании серебра 5 мас.% глубина проникновения железа в пленку ВТСП составляет 15 мкм (рис. 1, *b*). С увеличением концентрации серебра до 30–50 мас.% глубина проникновения железа уменьшается до 3 мкм (рис. 1 *в*).

Таким образом, установлено, что глубина проникновения железа зависит от концентрации вводимого серебра.



**Рис. 2.** Влияние концентрации серебра (Ag) в ВТСП порошке состава  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на расширение амплитудно-частотной характеристики  $\delta(f)$  в СВЧ диапазоне.

Диффузия элементов ВТСП пленки бария и меди в подложку (пленка ИЖГ) не наблюдается. На основании рентгеноспектрального анализа по полученным картам распределения интенсивности рентгеновского излучения для серебра установлено неравномерное распределение его в пленке ВТСП. При этом следует отметить, что с увеличением концентрации серебра в пленке оно в основном сосредоточивается вблизи границы раздела пленка–подложка (рис. 1, б, в). Вероятно, такое распределение приводит к уменьшению глубины проникновения железа из пленки ИЖГ в ВТСП пленку.

Полученные пленочные гетероструктуры были исследованы в диапазоне частот (3–5 ГГц) и при температуре 77 К. Измерения проводились в устройствах на структуре магнетик–ВТСП по методике, описанной в работе [1]. Исследовалась зависимость измерения ширины полосы пропус-

кания  $\delta(f)$  амплитудно-частотной характеристики магнитоэлектрических волн от сверхпроводящих свойств пленки. Для указанного частотного диапазона на рис. 2 приведена зависимость  $\delta(f)$  амплитудно-частотных характеристик от содержания серебра в ВТСП пленке (0–50 мас.%). Максимальное значение  $\delta(f)$  получено для гетероструктур с содержанием серебра (30–40 мас.%), увеличение величины  $\delta(f)$  связано с состоянием границы раздела и с улучшением характеристик пленки ВТСП.

Таким образом, впервые для пленочных гетероструктур ВТСП–ферромагнетик исследовано диффузионное состояние границы раздела. Установлено, что состояние границы раздела определяется количеством введенного серебра в ВТСП пленку, а также наблюдается корреляция состояния границы раздела с СВЧ характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-16297-а).

## Список литературы

- [1] *Альтман А.Б., Лебедь Б.М., Никифоров А.В., Яковлев С.В., Яковлев И.А.* // СФХТ, 1990. № 3. С. 2205–2216.
- [2] *Лебедь Б.М., Яковлев С.В., Николайчук Г.А., Калужная Л.А., Крылова Т.А., Ватник М.П.* // Письма в ЖТФ. 1996, Т. 22. В. 10. С. 18–22.