

05.2;05.4; 11;12

МОНОЛИТНЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИК – ФЕРРИТ

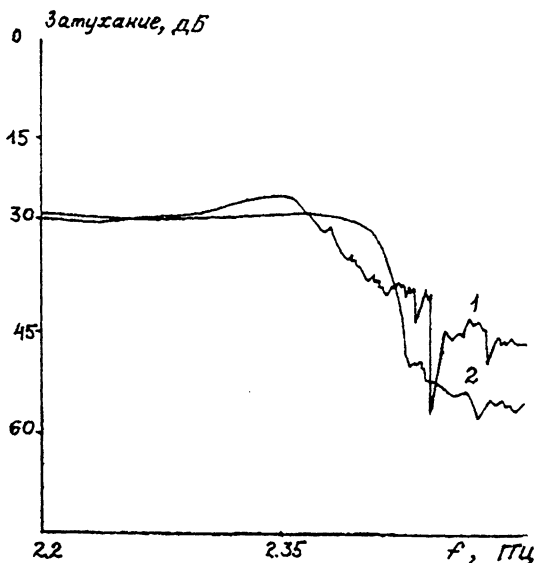
© В.М.Лебедь, С.В.Яковлев, Г.А.Николайчук,
Л.А.Калюжная, Т.А.Крылова, М.П.Ватник

Проблема сосуществования сверхпроводимости и магнетизма в пленочных гетероструктурах высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП) – феррит является предметом интенсивного интереса в спин-волновой электронике. Создание монокристаллических гетероструктур ВТСП – феррит исключает наличие воздушного зазора между поверхностями пленок [1] и является перспективным направлением в спин-волновой электронике [2]. Получение монокристаллических гетероструктур с высоким уровнем свойств ВТСП пленок сопряжено со значительными трудностями, обусловленными сильным взаимным влиянием материалов магнитной подложки и сверхпроводника.

Нами [3] методом пиролиза суспензии керамической шихты с органическим связующим получены пленки состава $YBa_2Cu_3O_x$ на магнитной гранатовой эпитаксиальной пленки состава $Y_3Fe_5O_{12}$, выращенной на гадолиний-галлиевой подложке $Gd_3Ga_5O_{12}$ ориентации (111).

Керамическая шихта синтезирована из раствора нитратов иттрия (Y), бария (Ba), меди (Cu) химическим методом, обеспечивающим высокую реакционную способность, однородность и мелкодисперсность.

Для повышения сверхпроводящих и механических характеристик пленок ВТСП проводилось легирование керамической шихты серебром. Пленки ВТСП, нанесенные на гранатовую эпитаксиальную пленку, подвергались термообработке в атмосфере кислорода (O_2) при температуре $940 \pm 5^\circ C$. В условиях синтеза монокристаллической гетероструктуры вследствие высокой реакционной способности материалов пленки ВТСП и гранатовой подложки на границе ВТСП – гранат возникает переходный слой. Химический состав и толщина переходного слоя, вероятно, влияет на характер распространения СВЧ волн. В работе [3] исследованием температурных зависимостей сопротивления $R(T)$ ВТСП пленок в интервале температур $T = 77-300 K$ при различных режимах ионной имплантации поверхности пленки граната нами установлено влияние структуры поверхности подложки на свойства ВТСП пленок.



Амплитудно-частотные характеристики двух типов гетероструктур ВТСП — магнитная гранатовая пленка: 1 — поликристаллическая структура поверхностного слоя гранатовой пленки; 2 — монокристаллическая структура поверхностной гранатовой пленки.

Таким образом, для получения пленок ВТСП высокого качества со стабильными электрофизическими и микроволновыми свойствами необходимо одновременное проведение работ как по оптимизации технологии нанесения сверхпроводящего слоя на поверхность гранатовой пленки, так и по целенаправленной модификации структуры поверхностного слоя гранатовой пленки. Изменение структуры поверхности магнитной гранатовой пленки проводилось ионной имплантацией.

Известно [4], что ионная имплантация благодаря образованию радиационных дефектов позволяет изменять свойства поверхностного слоя материала в зависимости от энергии E (кэВ), дозы ионов D (ион/см²), массы имплантируемых ионов, т. е. от различных режимов имплантации.

В данной работе проведены исследования влияния ионной имплантации и различных технологических операций на структуру поверхности подложки, а также влияние структуры поверхностного слоя магнитной пленки на свойства ВТСП пленок в СВЧ диапазоне. Ионная имплантация гранатовых пленок проводилась ионами гелия (He^+), кислорода (O^+), кадмия (Cd^+), аргона (Ar^+) в интервале энергий 50–200 кэВ и доз $D - 10^{13} - 10^{16}$ ион/см².

Эпитаксиальные гранатовые пленки, являющиеся подложкой в гетероструктурах ВТСП- $Y_3Fe_5O_{12}$, были подвергнуты различным технологическим операциям, а именно:

- отжиг в различных температурно-временных режимах в воздушной среде и в атмосфере кислорода;
- лазерный термический отжиг;
- ионная имплантация различными режимами;
- ионная имплантация в сочетании с последующим отжигом.

Оптимальная температура отжига имплантированных гранатовых пленок определялась по минимальной величине напряжений в ионно-имплантированном слое. Величина введенных напряжений при имплантации оценивалась рентгеноструктурным анализом на дифрактометре ДРОН-2 по отношению $\frac{\Delta a}{a}$, где a , Å — величина постоянной решетки гранатовой пленки. Структура поверхности эпитаксиальных гранатовых пленок, подвергнутых различным технологическим операциям, и исследовалась методом электронографии на отражение в электронном микроскопе с дифракционной приставкой. Исследование структуры поверхностного слоя гранатовых пленок проводилось по всей площади экспериментальных образцов. По данным электронографического анализа установлено, что эпитаксиально выращенные монокристаллические гранатовые пленки имеют нарушенный поверхностный слой поликристаллической структуры.

В таблице представлены результаты электронографических исследований поверхностного слоя таких пленок. Аналогичные результаты получены при исследовании структуры поверхностного слоя после имплантации. В результате проведенных исследований было установлено, что поликристаллическая структура поверхностного слоя сохраняется после проведения отжига на воздухе, в атмосфере кислорода, лазерного отжига. Проведение имплантации поверхности в различных режимах, использующих различные энергии, дозы имплантации и тип иона-имплантанта также не устраняет наличия поликристаллической структуры поверхности. Однако сочетание имплантации поверхности пленки с последующим отжигом при температуре 700°C на воздухе приводит к появлению на электронограмме рефлексов, соответствующих монокристаллической структуре пленок, используемых в качестве подложек в структуре ВТСП-гранат.

На гранатовые пленки с различной структурой поверхностного слоя были нанесены пленки ВТСП состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Фазовый анализ полученных ВТСП пленок осуществлялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0

№ п.п.	Режим имплантации	Режим отжига	Структура поверхности гранатовой пленки
1	—	—	Поликристаллическая
2	—	Воздух, $T = 700^\circ\text{C}$	Поликристаллическая
3	—	Кислород, $T = 700^\circ\text{C}$	Поликристаллическая
4	—	Лазерный отжиг	Поликристаллическая
5	He^+ , $D = 10^{14}$ ион/см ² , $E = 150$ кэВ	—	Поликристаллическая
6	He^+ , $D = 10^{14}$ ион/см ² , $E = 150$ кэВ	Воздух, $T = 700^\circ\text{C}$	На фоне полуколец, отвечающих за поликристаллическую структуру, появляются рефлексы, характерные для монокристаллической структуры
7	He^+ , $D = 10^{16}$ ион/см ² , $E = 150$ кэВ	Воздух, $T = 700^\circ\text{C}$	Монокристаллическая

($\text{FeK}\alpha$ -излучение). По результатам рентгенофазового анализа исследованные ВТСП пленки содержат фазу 1-2-3 ромбической сингонии. Исследование свойств гетероструктур ВТСП-гранат в диапазоне сверхвысоких частот позволяет получить информацию о физике переходных слоев и структуры в целом [2,5].

В настоящей работе методика эксперимента заключалась в возбуждении микрополосковыми преобразователями, расположенными на гранатовой пленке, магнитостатических волн ($\lambda = 1-100$ мкм) от панорамного генератора сканирующей частоты в диапазоне 2-5 ГГц и измерении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) гетероструктуры.

Свойства гетероструктуры и состояние границы раздела в ней определяются изменением амплитудно-частотной характеристики при переходе пленки ВТСП из сверхпроводника в несверхпроводник.

На рисунке приведены характеристики для двух типов гетероструктур. Зависимость № 1 соответствует гетероструктуре, в которой пленка ВТСП нанесена на эпитаксиальную пленку граната поликристаллической структурой поверхностного слоя. Зависимость № 2 соответствует гетероструктуре, в которой пленка ВТСП нанесена на эпитаксиальную пленку граната, имплантированную ионом арго-

на (Ag^+), энергией 50 кэВ, дозой $5 \cdot 10^{15}$ ион/см² и отожженную на воздухе при температуре 700°C, т. е. поверхностный слой гранатовой пленки является монокристаллическим. Характер изменения амплитудно-частотных характеристик связан со сверхпроводящими характеристиками материала. В момент времени, соответствующий частоте 2.35 ГГц (см. рисунок) скачкообразное увеличение температуры камеры в результате подачи импульса тока в нагреватель камеры с азотом, в которой помещена исследуемая структура. При этом наблюдается уменьшение коэффициента передачи СВЧ сигнала (правая часть кривых рисунка). Степень и время уменьшения сигнала связаны с параметрами ВТСП пленки. Более резкое уменьшение сигнала относительно момента изменения температуры соответствует меньшему значению T_c и большему $T_{сн}$ (температура начала перехода в сверхпроводящее состояние).

Из рисунка видно, что пленка ВТСП, нанесенная на монокристаллическую поверхность гранатовой пленки, имеет более резкое изменение сигнала, что дает основание предположить влияние структуры поверхностного слоя подложки на состояние границы раздела в гетероструктуре и, следовательно, свойства пленки ВТСП.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность получения монокристаллических гетероструктур ВТСП-феррит, а также преобразование поликристаллической структуры поверхностного слоя пленки граната в монокристаллическую. Показано, что исследование свойств гетероструктур на сверхвысоких частотах магнитостатическими волнами дает информацию о состоянии границы раздела и гетерогенной структуры в целом.

Работа поддержана Международным научным фондом (грант JAD 100).

Список литературы

- [1] Вроцкий В.Ф., Дунаевский С.М., Дутовская Е.Л., Калюжная Л.А., Николайчук Г.А., Лебедь Б.М. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 9. С. 1782-1784.
- [2] Альтман А.Б., Лебедь Б.М., Никифоров А.В., Яковлев С.В., Яковлев И.А. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 10. С. 2205-2216.
- [3] Павлова М.В., Николайчук Г.А., Крылова Т.А., Дутовская Е.Л., Щербакова В.О., Яковлев Ю.М. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 9. С. 1680-1684.
- [4] Ионная имплантация / Под ред. Дж. К. Хирвонена. М.: Металлургия, 1985. С. 390.
- [5] Лебедь Б.М., Яковлев С.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 19. С. 27-29.

Поступило в Редакцию
3 января 1996 г.