

# ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СПИНОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Г.Николайчук, к.т.н.<sup>1</sup> niko@domen.ru

В.Иванов<sup>1</sup>,

Е.Иванов, к.х.н.<sup>2</sup>

Приборы нового поколения спиновой наноэлектроники на сверхвысоких частотах представляют собой гетерогенные структуры. Они характеризуются многофункциональностью (совмещают фильтрацию, задержку сигнала и другие функции); обладают высоким быстродействием при управлении параметрами прибора и легко интегрируются в радиотехнические устройства. Основным элементом спинволнового прибора – волноведущая линия, в качестве которой используется пленка железоиттриевого граната (ЖИГ) состава  $Y_3Fe_5O_{12}$ .

**П**ленки ЖИГ могут быть получены жидкофазной эпитаксией и методами вакуумного напыления – лазерным [1] и ионно-плазменным магнетронным [2].

В ОАО "НИИ "Феррит-Домен" в течение ряда лет проводятся работы по получению, исследованию свойств и применению в СВЧ-приборах пленок ЖИГ, изготовленных по технологии ионно-плазменного магнетронного напыления. Основные преимущества такой технологии [3]: процесс легко управляется, имеет высокую производительность, малые энергозатраты и экологически чист.

**Напыление пленок ЖИГ.** Основная трудность при использовании методов вакуумного напыления заключается в обеспечении стехиометрического состава осаждаемых пленок. Причина в том, что кислород, входящий в состав исходной мишени, может оказаться в свободном газообразном состоянии и не участвовать в формировании пленки.

Осаждение пленок ЖИГ на подложки гадолиний-галлиевого граната (ГГГ)  $Gd_3Ga_5O_{12}$  ориентации

(111) проводилось на установке ионно-плазменного магнетронного напыления, модернизированной на базе УРМ 3.279. Для тестовых экспериментов пленки осаждались на пластины монокристаллического кремния ориентации (111).

Установка оборудована двумя устройствами магнетронного напыления (магнетрон на постоянном токе и ВЧ-магнетрон) диаметром 92 мм для распыления ферромагнитных материалов. Для возбуждения разряда на магнетронах использовался блок питания постоянного тока, система возбуждения ВЧ-разряда (генератор ВЧ (13,56 МГц)) и согласующее устройство. Вакуумная камера установки откачивалась высоковакуумным паромасляным и форвакуумным насосами. Предельно достижимое давление остаточных газов в вакуумной камере  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Торр. Подача рабочего газа осуществлялась по двухканальной газовой системе (для аргона и кислорода).

Для напыления пленок ЖИГ использовалась мишень железоиттриевого граната, изготовленная по керамической технологии и отформованная в виде диска методом горячего изостатического прессования. ЖИГ-пленки осаждались на подложки, нагретые до температуры 500–800°C (система нагрева – резистивный танталовый на-

<sup>1</sup> ОАО "НИИ "Феррит-Домен" (Санкт-Петербург).

<sup>2</sup> РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина (Москва).

греватель), при постоянном давлении рабочего газа  $1 \times 10^{-3}$  Торр и мощности в разряде 300 Вт. В процессе экспериментов изменялось соотношение аргона и кислорода в рабочем газе, диапазон изменения содержания кислорода в рабочем газе – 10–80%.

**Свойства пленок.** Состав полученных пленок исследовали методами электронной оже-спектроскопии в сочетании с послойным анализом, в процессе которого с исследуемого образца послойно удаляли пленку железоиттриевого граната бомбардировкой потоком ионов аргона (развертка по площади составляла 500x500 мкм).

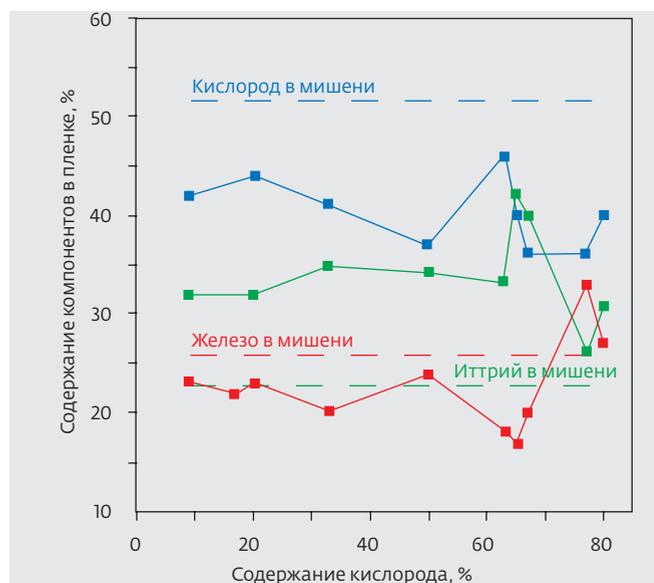
Оже-анализ проводился в сверхвысоковакуумной установке, созданной на основе камеры УСУ-4, поэтому загрязнение поверхности образца исключено. Диаметр исследуемой области образца около 10 мкм (характерный размер сфокусированного потока электронов оже-спектрометра 09-ИОС-3 с анализатором типа "цилиндрическое зеркало").

Исследовались профили распределения элементов по глубине переходной области в пленках, осажденных при различном содержании кислорода в рабочем газе. Изменение соотношения содержания аргона и кислорода, как и ожидалось, приводит к изменению состава осаждаемых пленок (рис.1). На графике также приведены зависимости содержания элементов в исходной мишени.

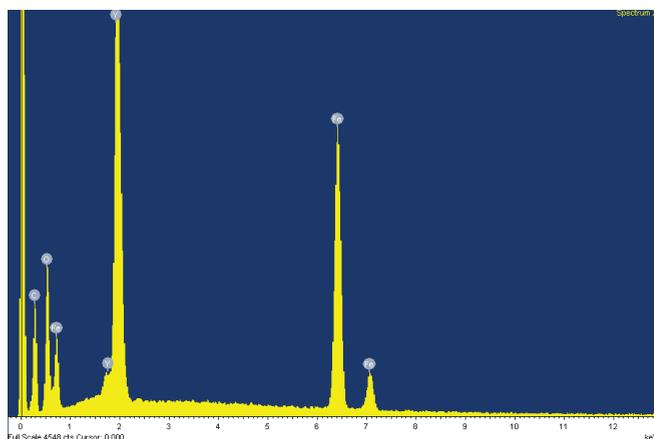
Сравнение состава пленок, полученных при различном соотношении аргона и кислорода в рабочем газе, свидетельствует о том, что в формировании пленок участвуют два основных механизма – физическое распыление мишени за счет ионной бомбардировки и механизм реактивного распыления, включающий взаимодействие химически активного газа (кислорода) с компонентами мишени. Пленки ЖИГ стехиометрического состава удалось получить при соотношении аргона и кислорода 1:9 соответственно и нагреве подложки до температуры 700°C.

Химический состав полученных пленок исследовали на электронном микроскопе VEGA//LMU с энергодисперсионным микроанализатором JNCA Energy 350DC. Анализ результатов показал, что пленки близки по стехиометрическому составу к исходной мишени (рис.2).

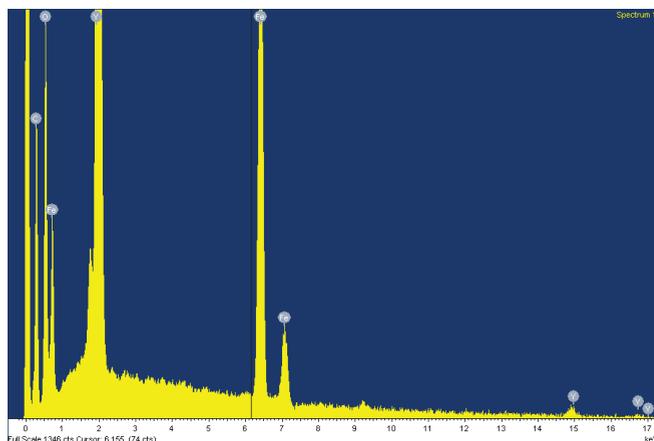
Толщину пленок ЖИГ измеряли на компьютерном комплексе на основе интерферометра МИИ-4М. Комплекс обеспечивает контроль качества нанесения микро- и нанометровых ферритовых пленок на различные типы подложек. Диапазон толщин полученных пленок ЖИГ – 250–500 нм.



**Рис.1.** Зависимость содержания элементов в осажденных пленках (железо, иттрий, кислород) от концентрации кислорода в рабочем газе (аргон-кислород)



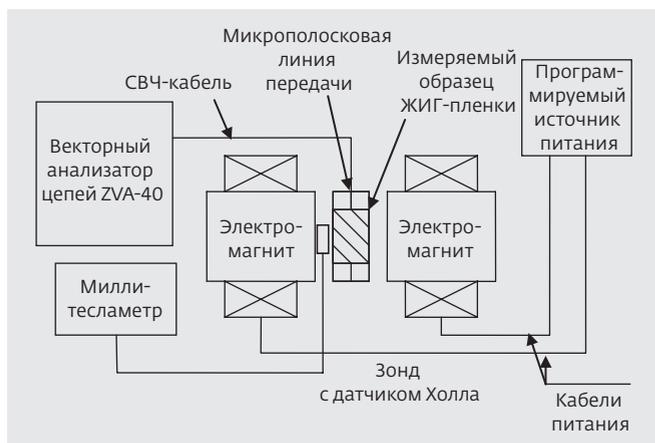
а)



б)

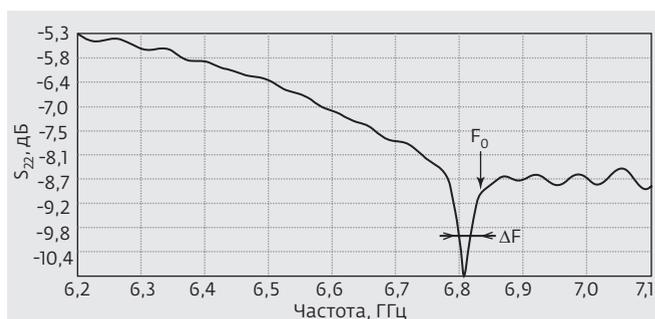
**Рис.2.** Спектры мишени ЖИГ (а) и пленки ЖИГ (б)

**Радиофизические свойства пленок.** Измерения ширины линии  $2\Delta H$  и намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  пленок железиттриевого граната проводили по методике, разработанной в ОАО "НИИ "Феррит-Домен" (рис.3). Измерение ширины линии ферромагнитного резонанса основано на измерении частотной зависимости коэффициента отражения пленки ЖИГ (рис.4) с применением микрополосковой линии передачи в режиме отражения. Подмагничивающее поле изменялось от 1 до 350 Э. Образец размещался на закороченном отрезке микрополосковой линии.



**Рис.3.** Структурная схема измерительной установки для определения ширины линии ферромагнитного резонанса и намагниченности насыщения

Ширина линии ферромагнитного резонанса определялась из соотношения  $2\Delta H = 2\Delta f / \gamma$ , где  $\gamma = 2,8$  МГц/Э – гиромагнитное отношение для материала пленки ЖИГ. Из графика (см. рис.4) видно, что ширина полосы отраженного сигнала  $2\Delta f$  для данного материала равна 12 МГц. Подставляя эту



**Рис.4.** Частотная зависимость модуля коэффициента отражения ( $S_{22}$  – коэффициент матрицы рассеивания). Пик поглощения соответствует частоте линии ферромагнитного резонанса

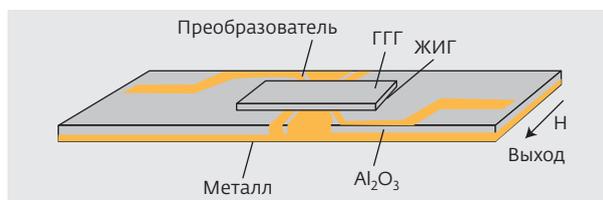
величину в формулу  $2\Delta H = 2\Delta f / \gamma$ , получаем ширину линии ферромагнитного резонанса  $2\Delta H = 4$  Э.

### ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЕНОК ЖИГ В ФИЛЬТРАХ НА СПИНОВЫХ ВОЛНАХ

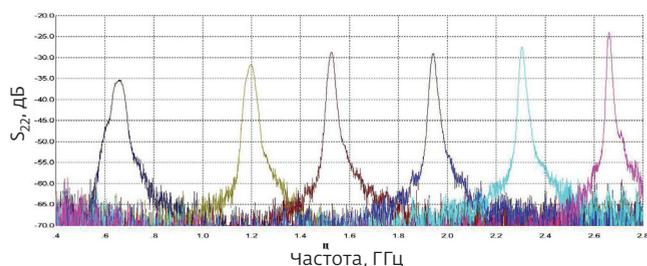
В макете фильтра (рис.5) на поверхностных магнитостатических волнах (ПМСВ) пленка ЖИГ на подложке ГГГ (111) устанавливалась без зазора на микрополосковую поликоровую плату. Входной преобразователь электромагнитных волн (ЭМВ) в ПМСВ и выходной преобразователь ПМСВ в ЭМВ были выполнены в виде несимметричных копланарных линий с шириной зазора 100 мкм, шириной полосок 50 мкм, расстоянием между полосками 200 мкм. Металлизация платы осуществлялась вакуумным напылением меди до толщины 7 мкм. Макет помещался в зазор постоянного магнита так, что смещающее магнитное поле  $H_0$  прикладывалось в плоскости пленки перпендикулярно направлению распространения спиновой волны. Входной СВЧ-сигнал по подводящей микрополосковой линии поступал на преобразователь, который возбуждал в намагиченной до насыщения ферритовой пленке поверхностные магнитостатические волны. Спектр возбуждаемых ПМСВ определялся как параметрами ферритовой пленки (намагниченностью насыщения, полем анизотропии, шириной линии ферромагнитного резонанса), так и величиной и направлением поля подмагничивания. Энергия СВЧ-сигнала распространялась в виде ПМСВ в пленке ЖИГ от входного преобразователя до выходного, где происходило обратное преобразование из ПМСВ в ЭМВ. Местоположение спектра ПМСВ по частоте перестраивалось изменением величины поля подмагничивания.

Амплитудно-частотные характеристики фильтров измеряли векторным анализатором цепей ZVA-40 (фирма Rohde-Schwarz) при мощностях входного сигнала 0,1 и 1 мВт, магнитное поле – миллитесламетром ЭМЗ-27. Перестройка фильтра по частоте происходила в диапазоне 0,6–2,8 ГГц (рис.6), толщина пленки ЖИГ составляла 250 нм.

В заключение можно сказать, что композиционные структуры на основе пленок ЖИГ легко сов-



**Рис.5.** Схема фильтра на спиновых волнах



**Рис.6.** Амплитудно-частотная характеристика фильтра на спиновых волнах

местимы с другими планарными структурами и позволяют получить спинволновой прибор в едином технологическом цикле. Полученные пленки ЖИГ имеют намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 1750$  Гс, ширину линии ферромагнитного резонанса  $2\Delta H = 4$  Э, а также одинаковый порядок с параметрами пленок, полученных жидкофазной эпитаксией. Пленки ЖИГ были опробованы в управляемых фильтрах на спиновых волнах. Параметры фильтра: вносимые потери от 35 до 25 дБ, ширина полосы пропускания  $2\Delta f = 10$  МГц.

Данная работа выполнена в рамках проекта "Проведение поисковых научно-исследовательских работ по направлению "Нанотехнологии и наноматериалы" (мероприятие 1.2.2: "Разработка технологии получения нанокластеризованных ферромагнитных материалов для приборов полупроводниковой спиновой наноэлектроники"). Контракт №.4907/645-0109 от 3 сентября 2009 года.

*Авторы выражают благодарность за участие в работе и обработке экспериментальных результатов С.В.Якушкинскому и д.т.н. С.В.Яковлеву (посмертно).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. **S.A.Manuilov, S.I.Khartsev, A.M.Grishin.** Pulsed laser deposited  $Y_3Fe_5O_{12}$  films. – J. Appl. Phys., 2009, 106, 123917.
2. **P.W.Jang, J.Y.Kim.** New Growth Method of Solid Phase Epitaxy in Sputtered YIG films. – IEEE Trans. on Magnetics, 2001, v.37, № 4.
3. **Николайчук Г.А., Яковлев С.В.** и др. Физические свойства и технология напыления пленок железиттриевого граната для спинволновой электроники. – Microwave and Telecommunication Crimico, 2008, Conference Proceedings, 2008, v.2, p.552.