

**Исследование матричных наноструктур  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , полученных ионоплазменным методом****А.А. Лозовенко** (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**М.В. Ярмолич** (ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск)**Научный руководитель – к. т. н., Г.Г. Горох** (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

В настоящее время, с развитием микроэлектронных технологий и нанотехнологий на базе материалов с туннельным магниторезистивным эффектом, а также повышением свойств и характеристик формируемых тонкопленочных наногетероструктурных систем возрастают требования к техническим параметрам новых устройств спинтроники. Соединение  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  со структурой двойного перовскита, обладающее высокими магнитотранспортными характеристиками и электрофизическими свойствами, весьма перспективно для создания магнитных структур, работающих на эффекте туннельного магнитосопротивления [1]. Использование диэлектрической матрицы анодного оксида алюминия (АОА) с регулярными цилиндрическими порами для осаждения в них ферромагнитных наночастиц  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  позволит создать заданным образом ориентированные массивы ферромагнитных нанокластеров с требуемыми и контролируемыми размерами [2, 3]. Это открывает широкие перспективы формирования магнитоупорядоченных систем с прогнозируемыми магниторезистивными свойствами. В работе изучены процессы ионно-плазменного нанесения на структурированную поверхность АОА пленок ферромolibдата стронция (ФМС), а также исследованы микроструктура, состав и свойства матриц АОА с осажденными ферромагнитными наноструктурами.

Формирование пористых диэлектрических матриц осуществлялось методом двухстадийного анодирования напыленных на кремниевые подложки пленок алюминия в растворе винной кислоты. В результате чего была приготовлена низкопрофильная матрица АОА толщиной 750 нм, с шагом около 450 нм и диаметрами пор от 220 до 250 нм. Нанесение пленок ФМС осуществляли методом ионно-плазменного напыления на вакуумной установке Z-400 "Leybold-Heraeus". В качестве распыляемого материала использовали мишень из  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ . Исследования фазового состава проводили на установке ДРОН-3 М в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении с использованием базы данных "ICSD-PDF2" (Release 2000), программ "Match! V2.0" и "POWDERCELL". Микроструктура, морфология зерен изучались методом атомно-силовой микроскопии (NT-206 ACM).

В процессе исследований ионно-плазменного нанесения пленок ФМС на гладкие подложки установлено, что пленки  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , осажденные при скоростях  $v_n = 15\text{--}20$  нм/мин в инертной среде Ag при температурах подложки  $T_n = 300\text{--}713$  К являются структурно аморфными. При нагреве подложек до  $T_n = 923$  К пленки становятся кристаллическими и фазово-неоднородными, состоящими из смеси фаз  $\text{SrMoO}_4$  и  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ . Обнаружено, что при уменьшении скорости напыления до  $v_n = 7\text{--}9$  нм/мин и повышении температуры подложки до  $T_n = 870\text{--}920$  К наблюдается увеличение плотности пленок  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  и повышение их фазовой гомогенности. Дополнительный вакуумный отжиг при  $T = 1173$  К в течение 1 часа приводит к повышению степени сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена и однородности их магнитной структуры.

Для установления закономерностей структурообразования на пористую поверхность подготовленных матриц АОА в вакууме были нанесены пленки ФМС толщинами 100 нм, 400 нм и 800 нм при скорости  $v_n = 7$  нм/мин и температуре подложки  $T_n = 923$  К. Все исследуемые структуры были подвергнуты высокотемпературному отжигу при температуре 1173 К, в результате чего произошла кристаллизация исходных пленок, увеличилась их однородность и плотность. Обнаружено, что в зависимости от толщины напыленной пленки

образуются структуры с различной морфологией, наиболее полно поры заполняются при толщине пленок, соизмеримых с толщиной оксида. На основании анализа состояния поверхности и сколов исследуемых структур установлено, что в результате высокотемпературного отжига происходит перекристаллизация и уплотнение напыленной пленки ФМС, а также частично проседание пленки в полость пор. При этом, чем толще исходная пленка, тем наблюдается более полное заполнение пор наночастицами  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ .

Для измерения магниторезистивных характеристик наноструктур с поверхности матриц АОО методом ионного травления были удалены излишки ФМС. Магнитные характеристики полученной наноструктуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}/\text{Al}_2\text{O}_3$  исследовали с помощью универсальной установки фирмы „Cryogenic Limited“ в диапазоне 4.2–300 К в постоянном магнитном поле до 8 Тл. На основании измерений удельного электросопротивления в магнитном поле установлено, что величина магнитосопротивления наногетероструктур достигает 14% при  $T = 15$  К и  $B = 8$  Тл, что связано с проявлением туннельного магнетосопротивления. Разработанные методики позволяют воспроизводимым образом получать наногетероструктуры двойных перовскитов с диэлектрическими прослойками с требуемыми для микроэлектронной промышленности физико-химическими свойствами, что открывает перспективы для применения их в микроэлектронике и приборостроении.

#### Литература

1. Fix T. et al. Absence of tunnel magnetoresistance in  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ -based magnetic tunnel junctions // Chemical physics letters. – 2007. – Т. 434. – №. 4. – С. 276-279.
2. Magnetic properties of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  nano- and micro-powders produced by different methods / E.A. Trusova, K.V. Vokhmintsev, V.P. Korneev, N.A. Kalanda, S.E. Demyanov, A.V. Petrov, L.V. Kovalev, G.G. Gorokh // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : Reviews and Short Notes / V.E. Borisenko (Ed.) ; World Scientific. – Singapore, 2013. – P. 550–553.
3. Формирование столбиковых наноструктур на основе ферромолибдата стронция в пористых матрицах анодного оксида алюминия / С.Е. Демьянов, Г.Г. Горох, Н.А. Каланда, А.А. Лозовенко, А.И. Захлебаева, А.В. Петров // Актуальные проблемы физики твердого тела: ФТТ-2011 : сб. докл. V Междунар. науч. конф., Минск, 18-21 окт. 2011 г. : в 3 т. / А.Н. Вараксин. – Минск, 2011. – Т. 3. – С. 104-106.