

**Подорожняк С.А.¹, Волочаев М.Н.^{1,2}, Рыженков А.В.¹,
Чжан А.В.^{3,4}, Патрушева Т.Н.¹, Патрин Г.С.^{1,3}**

¹Сибирский федеральный университет

²Сибирский государственный аэрокосмический университет

³Институт физики СО РАН

⁴Красноярский аграрный университет

Магнитные плёнки CoP для СВЧ-применений

Тонкие плёнки из магнитомягких сплавов CoP были получены методом химической металлизации из водного раствора на основе цитратных комплексов с применением в качестве щелочного реагента NaOH. С помощью вариации составов рабочих растворов получены оптимальные значения магнитных параметров плёнок (намагниченности насыщения и ширины линии ферромагнитного резонанса) с целью уменьшения потерь при их применении в СВЧ-устройствах.

Ключевые слова: тонкие магнитные плёнки, CoP, химическое осаждение, ФМР.

Всё возрастающий интерес к наноматериалам, в том числе и к тонким магнитным плёнкам (ТМП), обусловлен большими потенциальными возможностями их практического применения. Тонкие плёнки из магнитомягких материалов широко используются в головках записи и считывания информации, в датчиках слабых магнитных полей, на их основе также разрабатываются конструкции различных управляемых устройств в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ): фильтров, амплитудных модуляторов, ограничителей мощности, фазовых манипуляторов. Одним из самых важных параметров плёнок для таких устройств является высокая магнитная проницаемость μ при одновременно достаточно низком уровне потерь СВЧ-мощности в заданном диапазоне частот. Для решения этой проблемы необходимо добиваться увеличения намагниченности насыщения материала M_0 и уменьшения ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР) ΔH [1], а, следовательно, совершенствовать технологию получения образцов. Таким образом, разработка и совершенствование методов синтеза ТМП, обладающих высокой магнитной проницаемостью на СВЧ, является одной из важных задач современной физики магнитных явлений.

С точки зрения технологичности особое внимание привлекает метод безтокового химического осаждения металлических плёнок из растворов. Получение магнитных плёнок на основе сплава Co-P химическим способом впервые осуществил Бренер [2] и к настоящему времени данный метод получил достаточно широкое практическое применение [3]. Химическое осаждение отличается относительной простотой, низкой себестоимостью; немаловажным является то, что таким способом можно получать плёнки как на металлических, так и на диэлектрических подложках. Привлекательным представляется возможность получения с помощью химического осаждения сэндвич-структур с толщиной слоёв в несколько нанометров [4]. Достоинством данной методики является возможность получения как кристаллических (высококоэрцитивных), так и аморфных (низкокоэрцитивных) ТМП, представляющих наибольший интерес для применения в СВЧ-электронике.

Получение плёнок CoP производилось по методике химического восстановления, включающей в себя стандартные для неё процедуры предварительной подготовки

стеклянных подложек (очистка, сенсбилизация, активация). Исследуемые плёнки CoP толщиной от 30 до 70 нм были получены из растворов солей кобальта CoSO_4 , CoCl_2 в присутствии аммиака, содовых растворов, гидроксида натрия, лимонной кислоты, а также гипофосфита натрия в качестве восстановителя. Целью настоящей работы являлось определение оптимальных составов рабочих растворов для получения плёнок с требуемыми параметрами для СВЧ применений.

Как показано в работе [5], на свойства ТМП влияет как pH раствора восстановления, так и тип комплексных соединений кобальта в растворе – цитратных или аммиачных. Преимуществом использования аммиачных комплексов является возможность вариации количества лигандов вокруг атомов кобальта в растворе путём изменения концентрации аммиака. Это приводит к изменению прочности получаемых комплексов, что напрямую влияет на магнитные свойства получаемых ТМП. Однако, в силу того, что осаждение ведётся при температурах 85–100 °С, рабочий раствор быстро меняет свои свойства, в частности pH, вследствие быстрого испарения аммиака. Поэтому более простым и технологичным нам видится использование цитратных комплексов и применение в качестве щелочного реагента едкого натра NaOH или гидрокарбоната натрия NaHCO_3 .

Для получения магнитомягких плёнок CoP осаждение на стеклянную подложку производилось в течение двух минут из раствора состава: $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 8,75 г/л, $\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_2)$ – 7,5 г/л, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ – 17,5 г/л, NaOH – до pH 9,4.

На рисунке 1 представлены изображение участка плёнки CoP и её электронограмма, полученные на сканирующем электронном микроскопе. Полученные электронограммы представляют собой диффузное гало, свидетельствующее об отсутствии кристаллической структуры.

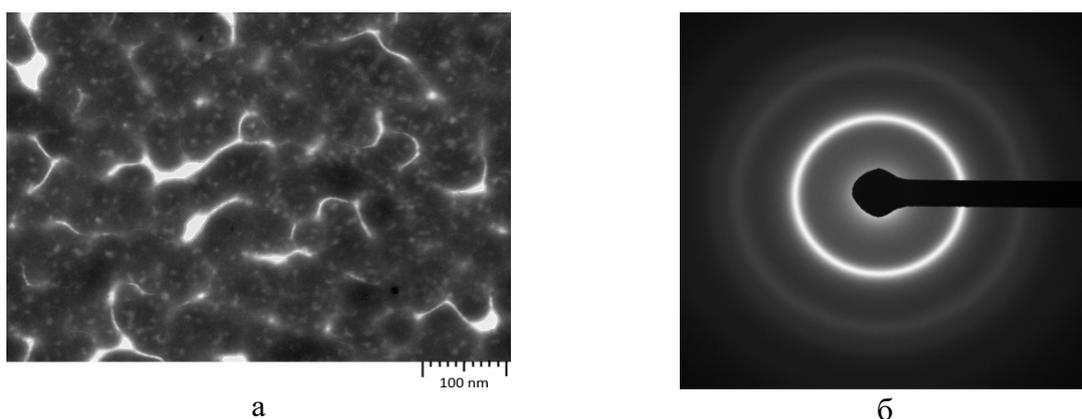


Рис. 1. а – микрофотография поверхности, б – электронограмма ТМП

На рисунке 2 показано распределение фосфора и кобальта по поверхности ТМП. Видно, что фосфор распределён достаточно равномерно по сравнению с распределением кобальта.

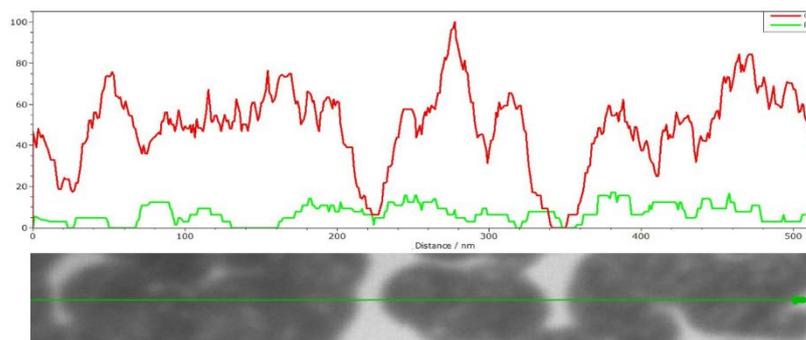


Рис. 2. Плотность распределения кобальта и фосфора по поверхности плёнки.

Определение магнитных параметров исследуемых плёнок производилось с помощью обработки кривых поглощения ферромагнитного резонанса (ФМР), которые были получены на автоматизированном сканирующем спектрометре [6]. В качестве датчика использовался миниатюрный микрополосковый резонатор с частотой накачки $f = 3.329$ ГГц. Как показано в [1], резонансная частота зависит как от величины внешнего магнитного поля H_0 , так и от магнитных параметров плёнки.

На рис. 3 точками показаны значения резонансного поля H_0 , измеренные в зависимости от угла направления магнитного поля θ_H с шагом 10° . Наименьшее среднеквадратичное отклонение теоретической угловой зависимости H_0 от экспериментальных значений наблюдается при следующих магнитных параметрах плёнки: эффективной намагниченности [7] $M_0 \approx 1120$ Гс и ширине линии ФМР $\Delta H \approx 23,7$ Э.

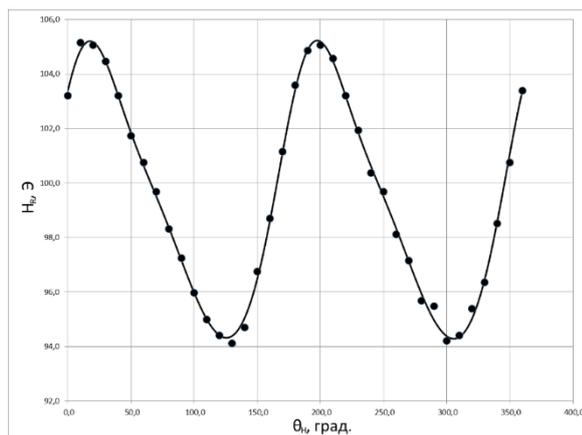


Рис. 3. Угловые зависимости резонансного поля. Точки – эксперимент, линия – расчёт.

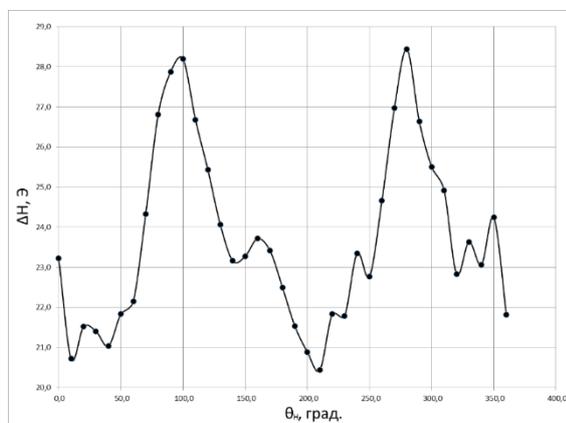


Рис. 4. Угловая зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса ТМП

Таким образом, использование цитратных комплексов и применением в качестве щелочного реагента едкого натра NaOH позволяет получить магнитные плёнки на основе Co-P, сравнимыми по магнитным параметрам плёнками, полученных ранее [1]. Для достижения оптимальных характеристик плёнок CoP авторами указанной работы были применены дополнительные процедуры, которые заключались в осаждении дополнительного подслоя из NiP, а также наложении внешнего магнитного поля, с помощью которого в плёнке наводилась одноосная анизотропия. В нашем случае достигнутые характеристики были получены в отсутствии указанных процедур, а лишь с помощью оптимизации составов рабочих растворов, из которых производилось осаждение плёнок.

Библиографический список

1. Б.А. Беляев, А.В. Изотов, С.Я. Кипарисов, Г.В. Скоморохов. Синтез и исследование магнитных характеристик нанокристаллических плёнок кобальта. Физика твердого тела. 2008. Т 50. №. 4. С. 650-656
2. A. Brenner, G. Riddell. Deposition of Nickel and Cobalt by Chemical Reduction J. Res. Nat. Bur. Std. 1947. V. 39. P. 385–395.
3. O. M. Glenn, B.H. Juan. Electroless Plating: Fundamentals and Applications. 1990. – P. 401
4. Чжан А.В., Кипарисов С.Я., Середкин В.А., Патрин Г.С., Пальчик М.Г. Магнитные свойства трехслойных пленок на основе Со-Р. Изв. РАН, сер. физич. – 2009. – Т.73. – № 8. – С. 1222-1224
5. Чжан, А.В., Патрушева Т.Н., Подорожняк С.А., Середкин В.П., Бондаренко Г.Н. Влияние щелочных реагентов на кристаллическую структуру плёнок Со-Р, полученных химическим осаждением. Упорядочение в минералах и сплавах; Материалы XVIII Междисциплинарного международного симпозиума. Ростов-на-Дону – п. Южный. 2015. Т.1. . № 18. С. 282-284
6. B. A. Belyaev, A. V. Izotov, A. A. Leksikov. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance. IEEE Sensors J. 2005. V. 5. № 2. – P. 260.
7. J. R. Macdonald. Stress in evaporated ferromagnetic film. Phys. Rev. 1957. V. 106. № 5. – P. 890-892.