

И.И. Иванова, Т.И. Кадурина, Е.Л. Трисветова, В.В. Чемоданов, М.Л. Чухловина // Передовая статья. – 2016. – Т.7. – №2. – С. 5-39

2. Методические рекомендации «Методические рекомендации по использованию методики определения специальной работоспособности высококвалифицированных спортсменов - представителей игровых видов спорта на основе использования специфических нагрузок и светового тренажера». Методические рекомендации. / Под ред. В.В. Уйба // М.: ФМБА России, 2018. – 25 с.

3. Наследственные и многофакторные нарушения соединительной ткани у детей алгоритмы диагностики / Кадурина Т.И. [и др.] // Медицинский вестник Северного Кавказа. – 2015. – Т.1. – №10. – С. 5–35.

4. Национальные рекомендации Российского научного медицинского общества терапевтов по диагностике, лечению и реабилитации пациентов с дисплазиями соединительной ткани / Мартынов А.И. [и др.] // Медицинский вестник Северного Кавказа. – 2016. – Т.1. – С. 2-76.

5. Нечаева Г. И. Дисплазия соединительной ткани: терминология, диагностика, тактика ведения пациентов. / Г.И. Нечаева, И.А. Викторова // Омск, Издательство: ООО «Типография БЛАНКОМ», 2007. – 188 с.

УДК 537.622.4

**Мельников Г.Ю., Щербинин С.В., Курляндская Г.В.
ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР
ТИПА $Ti/[Py/Ti]_x/[Cu/Ti]_5/[Py/Ti]_y$: ФОКУС НА МАГНИТНОЕ
БИОДЕТЕКТИРОВАНИЕ**

Кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов
Уральский федеральный университет
Екатеринбург, Российская Федерация

**Melnikov G.Yu., Shcherbinin S.V., Kurlyandskaya G.V.
SELECTION OF MULTILAYERED FILM PARAMETERS STRUCTURES
OF $Ti/[Py/Ti]_x/[Cu/Ti]_5/[Py/Ti]_y$ TYPE: FOCUS ON MAGNETIC
BIODETECTION**

Department of magnetism and magnetic nanomaterials
Ural federal university
Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: grisha2207@list.ru

Аннотация. В настоящей работе исследованы структура и магнитные свойства мультислоев типа $Ti/[Py/Ti]_x/[Cu/Ti]_5/[Py/Ti]_y$ с различным количеством слоев пермаллоя $Py=Fe_{19}Ni_{81}$ ($x = 1, 10$; $y = 1, 7 - 10$). Выбор оптимальных параметров для чувствительного элемента для магнитного

детектирования, работающего на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта, проводился по таким характеристикам как особенности структуры и характеристики, полученные из петель магнитного гистерезиса.

Annotation. In this work the structure and magnetic properties of multilayered films $Ti/[Py/Ti]_x/[Cu/Ti]_5/[Py/Ti]_y$ with different number of layers of permalloy $Py=Fe_{19}Ni_{81}$ ($x = 1, 10$; $y = 1, 7 - 10$) were studied. The choice of optimal parameters for a sensitive element for magnetic detection, operating on the basis of a giant magnetoimpedance effect, was carried out according to such characteristics as structural features and characteristics obtained from magnetic hysteresis loops.

Ключевые слова: тонкие магнитные пленки, магнитные сенсоры, магнитные свойства, биодетектирование.

Key words: thin magnetic films, magnetic sensors, magnetic properties, biodetection.

Введение

Магнитные сенсоры применяются в различных областях, включая приложения в биологии и медицине, где решаются две основных задачи: анализ тесно связанных с функциональностью живых систем электрических и магнитных свойств и оценка специфических свойств биожидкостей [2]. Магнитные биосенсоры должны обладать высочайшей чувствительностью, т.к. магнитный сигнал биологических объектов близок к 1 нЭ [4]. Существует ряд физических эффектов, на основе которых можно создать сенсор для магнитного биодетектирования: гигантский магнитоимпедансный эффект, гигантский магнитоимпедансный эффект (ГМИ), и т.д. На сегодняшний момент максимальная чувствительность к магнитному полю наблюдается у сенсоров типа-СКВИД. Однако режим их функционирования подразумевает работу при температуре жидкого гелия, что делает их дорогостоящими [3]. ГМИ эффект – это изменение полного электрического сопротивления (импеданса $Z = R + i \times X$) ферромагнитного проводника при протекании по нему переменного тока высокой частоты в условиях приложения внешнего постоянного магнитного поля [3-5]. Развитие технологий получения наноматериалов позволяет создавать ГМИ сенсоры с чувствительностью сравнимой со СКВИД датчиками при комнатной температуре.

Примерами ГМИ сенсоров являются многослойные пленочные структуры, хорошо совместимые с технологией интегральных схем. Данные структуры могут использоваться в медицине. Например, с помощью ГМИ - сенсора была получена магнитокардиограмма высокой точности [7] или проводился анализ концентрации магнитных наночастиц в полиакриламидном геле, который моделировал структуру человеческой ткани [1].

К ГМИ пленочным структурам предъявляется ряд требований. Одно из них - это высокая магнитная проницаемость (низкая коэрцитивная сила). Использование такого материала как пермаллой ($Fe_{19}Ni_{81}$) позволяет получать указанные характеристики при определенных условиях. Для высокой

чувствительности ГМИ структуры должны иметь толщину не менее 500 нм. Однако при таких толщинах однослойная пленка пермаллоя характеризуется повышенной коэрцитивной силой, переходит в “закритическое” состояние [6]. Для предотвращения такого перехода слои пермаллоя разделяют слоями проводящего материала [3]. Таким образом, варьируя количество магнитных слоев можно добиться необходимой толщины материала и коэрцитивной силы для использования пленочной структуры в качестве ГМИ – сенсора.

Цель исследования – подбор оптимальных параметров сенсорного элемента на основе структуры $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Ti}$ для последующего ГМИ - детектирования.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались магнитные характеристики многослойных пленочных структур на основе пермаллоя: $\text{Ti}(5)/\text{Py}(250)/\text{Ti}(5)$; $\text{Ti}(5)/\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)/[\text{Cu}(50)/\text{Ti}(5)]_5/\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)$; $\text{Ti}(5)/[\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)]_{10}/[\text{Cu}(50)/\text{Ti}(5)]_5/[\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)]_y$ ($y = 7 - 10$), (в скобках указана толщина слоев в нм). Пленочные структуры были получены методом магнетронного распыления: предварительный вакуум $2 \cdot 10^{-7}$ мбар, рабочее давление аргона $4 \cdot 10^{-3}$ мбар. В ходе напыления было приложено постоянное внешнее магнитное поле $H_{\text{тех}} = 200$ Э для создания наведенной магнитной анизотропии. Буферный слой титана, напыляемый первым на стеклянную подложку, позволял получить хорошо текстурированное состояние. Коэрцитивная сила определялась при перемагничивании пленочного образца вдоль направления наведенной анизотропии ($H \parallel H_{\text{тех}}$) в плоскости пленки.

Определение кристаллической структуры, особенностей текстуры и среднего размера зерна проводилось с помощью рентгенофазового анализа (РФА) с использованием автоматического дифрактометра PHILIPS X'PERT PRO и медного излучения, длина волны $\lambda = 1,5418$ Å. Для идентификации индексов Миллера использовали программу PANalytical X'Pert High Score.

Петли магнитного гистерезиса измеряли с помощью магнитооптического Керр – микроскопа (Evico magnetics GmbH). Линейные размеры области измерений 500 мкм \times 500 мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным рентгенофазового анализа и однослойные пленки, и слои FeNi во всех случаях имели кристаллическую структуру при размере зерна от 10 до 30 нм, (Рис.1 (а)), т.е. рассматриваемые материалу относятся к классу наноматериалов не только с точки зрения толщины напыляемых слоев, но и с точки зрения среднего размера зерна. Хорошо видно, что однослойная пленка ($\text{Ti}(5)/\text{Py}(250)/\text{Ti}(5)$) характеризуется очень высокой степенью остроты кристаллографической текстуры (высокая интенсивность пика при $2\theta \approx 44,5^\circ$) и средним размером зерна около 30 нм, определенным по методу Шеррера. Многослойная пленочная структура $\text{Ti}(5)/\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)/[\text{Cu}(50)/\text{Ti}(5)]_5/\text{Py}(25)/\text{Ti}(5)$ характеризуется меньшей степенью остроты кристаллографической текстуры и меньшим средним размером зерна около 10 нм. Последний

результат довольно хорошо согласуется с ранее наблюдаемой тенденцией для пленок пермаллоя. Стоит дополнительно отметить, что увеличение среднего размера зерна пленок пермаллоя предположительно можно связать с образованием столбчатой структуры, являющейся одной из причин перехода в «закритическое» состояние [6].

Структура $Ti(5)/Py(250)/Ti(5)$ обладает толщиной магнитного слоя, которая могла бы, с точки зрения электродинамики, быть достаточна для соблюдения условий сильного скин-эффекта и высокого ГМИ (при сохранении магнитной мягкости). Однако пермаллой имеет высокую магнитную проницаемость только при толщинах, меньших толщин перехода в закритическое состояние. Магнитные измерения пленки $Ti(5)/Py(250)/Ti(5)$ показали, что данная структура имеет высокую коэрцитивную силу порядка 63 Э, т.е. критическая толщина перехода в закритическое состояние при выбранных параметрах напыления лежит ниже 250 нм.

Рассмотрим пленочную структуру $Ti(5)/Py(25)/Ti(5)/[Cu(50)/Ti(5)]_5/Py(25)/Ti(5)$ уже в конфигурации ГМИ-«сендвича», т.е. с центральным тоководом (пример ГМИ-«сендвича» представлен на рис 1(б)). Уменьшение толщины магнитного слоя пермаллоя до 25 нм приводит к уменьшению коэрцитивной силы до 1 Э, т.е. сохраняется магнитная мягкость.

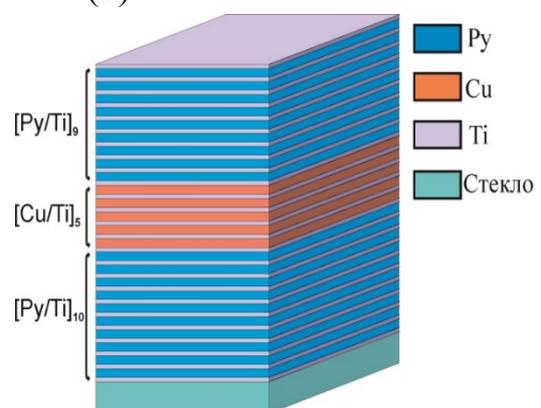
Достаточно большая толщина магнитных слоев ГМИ элемента необходима потому, что на больших толщинах ГМИ эффект проявляется при меньших частотах переменного тока, что очень важно для приложений. Для достижения толщины каждой многослойной магнитной структуры «сендвича» порядка 0,5 мкм, была получена структура $Ti(5)/[Py(25)/Ti(5)]_{10}/[Cu(50)/Ti(5)]_5/[Py(25)/Ti(5)]_y$. Дополнительно варьировалось количество слоев верхней многослойной структуры ($y = 7 - 10$). При увеличении количества слоев пермаллоя с 7 до 9 наблюдается снижение коэрцитивной силы с 2,0 Э до 0,1 Э. Предположительно подобное поведение связано с тем, что ферромагнитные слои пермаллоя, разделенные немагнитным слоем титана, взаимодействуют магнитостатически как на границе интерфейсов, так и как целое [6].

Наилучшие магнитомягкие характеристики были получены для структуры $Ti(5)/[Py(25)/Ti(5)]_{10}/[Cu(50)/Ti(5)]_5/[Py(25)/Ti(5)]_9$ (Рис 1. (б)). Следует отметить, что полученное значение для коэрцитивной силы $H_c = 0,1$ является очень низким, особенно если принять во внимание факт, что оно получено при осаждении материала на не нагреваемую подложку и при

(а)

(б)

225



отсутствии дополнительного отжига для снятия напряжений.

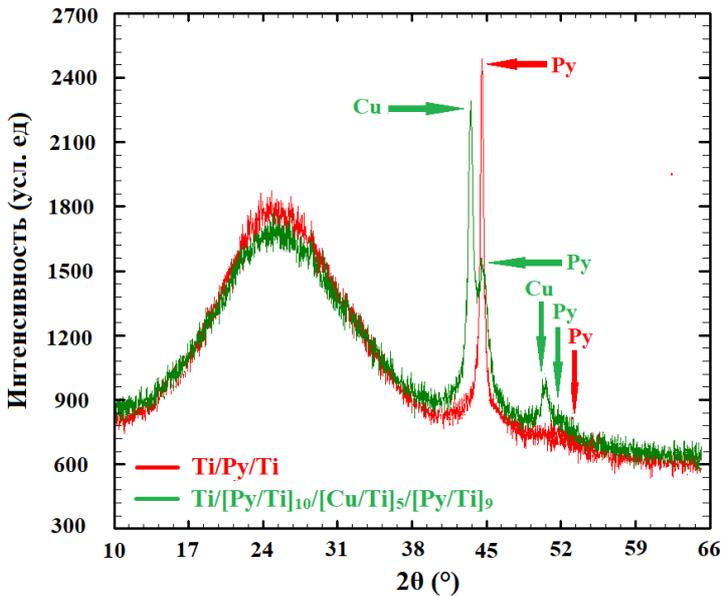


Рис. 1 – Рентгенофазовый анализ структур Ti(5)/Pu(250)/Ti(5) и Ti(5)/[Pu(25)/Ti(5)]₁₀/[Cu(50)/Ti(5)]₅/[Pu(25)/Ti(5)]₉ (а). Пример многослойной пленочной структуры Ti(5)/[Pu(25)/Ti(5)]₁₀/[Cu(50)/Ti(5)]₅/[Pu(25)/Ti(5)]₉ (б).

Выводы:

1) Получены и исследованы многослойные пленочные структуры Ti(5)/Pu(250)/Ti(5); Ti(5)/Pu(25)/Ti(5)/[Cu(50)/Ti(5)]₅/Pu(25)/Ti(5); Ti(5)/[Pu(25)/Ti(5)]₁₀/[Cu(50)/Ti(5)]₅/[Pu(25)/Ti(5)]_y (y = 7 - 10).

2) Исследована кристаллическая структура многослойных пленок. И установлено, что они являются нанокристаллическими. Добавление прослоек титана приводит к снижению среднего размера зерна: в 250 нм пленке без прослоек он составляет 30 нм, а в многослойной структуре с прослойками он снижается до 10 нм по данным РФА.

3) Для структуры Ti(5)/[Pu(25)/Ti(5)]₁₀/[Cu(50)/Ti(5)]₅/[Pu(25)/Ti(5)]₉ получена наименьшая величина коэрцитивной силы ($H_c = 0,1$ Э). Данная структура признана оптимальной, именно с ней предполагается проведение экспериментов по магнитному биодетектированию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00094.

Список литературы:

1. Blyakhman F.A. Mechanical, Electrical and Magnetic Properties of Ferrogels with Embedded Iron Oxide Nanoparticles Obtained by Laser Target Evaporation: Focus on Multifunctional Biosensor Applications / F.A. Blyakhman, N.A. Buznikov, T.F. Sklyar, A.P. Safronov, E.V. Golubeva, A.V. Svalov, S.Yu.

Sokolov, G.Yu. Melnikov, Iñaki Orue, G.V. Kurlyandskaya // Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 3. – С. 872.

2. Darton N. Magnetic Nanoparticles in Biosensing and Medicine / N. Darton A. Ionescu, J. Llandro. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – P. 295

3. Kurlyandskaya G.V. Domain structure and magnetization process of a giant magnetoimpedance geometry FeNi/Cu/FeNi (Cu) FeNi/Cu/FeNi sensitive element / G. V. Kurlyandskaya, L. Elbaile, F. Alves, B. Ahmada, R. Barrue, A. V. Svalov, V. O. Vas'kovskiy, //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2004. – Т. 16. – №. 36. – С. 6561.

4. Mohri K. Recent advances of amorphous wire CMOS IC magnetoimpedance sensors: innovative high-performance micromagnetic sensor chip / K. Mohri, T. Uchiyama, L.V. Panina, M. Yamamoto, K. Bushida // Journal of Sensors. – 2015. – Т. 2015.

5. Mahdi A.E. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials / A.E. Mahdi, L. Panina, D. Mapps // Sensors and Actuators A: physical. – 2003. – Т. 105. – №. 3. – С. 271-285.

6. Sugita Y. Critical thickness and perpendicular anisotropy of evaporated permalloy films with stripe domains / Y. Sugita, H. Fujiwara, T. Sato // Applied Physics Letters. – 1967. – Т. 10. – №. 8. – С. 229-231.

7. Yabukami S. A thin film magnetic field sensor of sub-pT resolution and magnetocardiogram (MCG) measurement at room temperature / S. Yabukami, K. Kato, Y. Ohtomo, T. Ozawa, K.I. Arai // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2009. – Т. 321. – №. 7. – С. 675-678.

УДК 616.9:614.47

**Платонова Т.А., Обабков В.Н., Голубкова А.А.
ИМИТАЦИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В
ПРОГНОЗЕ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ КОРЕВОЙ ИНФЕКЦИЕЙ В
УСЛОВИЯХ АКТИВИЗАЦИИ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА
ЭТАПЕ ЭЛИМИНАЦИИ**

Кафедра эпидемиологии, социальной гигиены и организации
госсанэпидслужбы

Уральский государственный медицинский университет
Кафедра интеллектуальных информационных технологий
Уральский федеральный университет
Екатеринбург, Российская Федерация

**Platonova T.A., Obabkov V.N., Golubkova A.A.
SIMULATION MATHEMATICAL MODELING TO FORECAST THE
INCIDENCE OF MEASLES INFECTION IN THE ACTIVATION OF THE
EPIDEMIC PROCESS AT THE STAGE OF ELIMINATION**