УДК 681.586.7:53.087.92

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ FeNiCo/CoFe НАНОСТРУКТУР МАГНИТНОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ

© 2022 г. Д. А. Жуков^{1, *}, В. В. Амеличев¹, Д. В. Костюк¹, С. И. Касаткин²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр", Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук", Москва, Россия

*E-mail: D.Zhukov@tcen.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований многослойных периодических наноструктур Ta/[FeNiCo/CoFe]_x/Ta, дополняющие научные знания в области магнитной стрейнтроники. Исследованы электрофизические параметры наноструктур в условиях контролируемой механической деформации и проведена экспериментальная оценка влияния количества периодов [FeNiCo/CoFe] на величину магниторезистивного эффекта.

DOI: 10.31857/S0367676522090356

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования в области преобразования механической деформации являются актуальной научной проблемой, одним из возможных решений которой является научное направление, основанное на объединение магниторезистивного и магнитострикционного эффекта в единой наноструктуре, получившее название магнитной стрейнтроники [1–5].

Механические напряжения наноструктур в элементах магнитной стрейнтроники приводят к изменению магнитных свойств данных наноструктур [6]. Следовательно, в наноструктурах с объединенными в комплекс магнитострикционными и магниторезистивными слоями можно установить зависимость между наведенными механическими деформациями и выходным электрическим сигналом.

В устройствах, основанных на магниторезистивном эффекте величина магнитосопротивления чувствительна к изменению магнитных свойств наноструктуры в соответствие с величиной магниторезистивного эффекта. Если эта наноструктура связана с другой магнитной наноструктурой с магнитострикционными свойствами, то устройство становится чувствительным к механическим деформациям, что позволяет расширить функциональную область применения подобных материалов для ряда устройств. Известно, что механическая деформация до 230 МПа наноструктур Та/[FeNiCo/CoFe]₆/Та, с равным содержанием магнитострикционных и магниторезистивных слоев, приводит к изменению величины анизотропного магниторезистивного (AMP) эффекта до 1.1% [4]. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения подобных наноструктур в элементах магнитной стрейнтроники, в которых внешнее воздействие приводит к механической деформации сжатия или растяжения тонкопленочного чувствительного элемента, и к изменению магнитосопротивления.

С целью исследования возможности повышения величины магниторезистивного эффекта за счет увеличения количества периодов [FeNiCo/CoFe] в наноструктуре были проведены исследования многослойных наноструктур магнитной стрейнтроники Ta/[FeNiCo/CoFe]_x/Ta, состоящих из магнитострикционного слоя CoFe и магниторезистивного слоя FeNiCo.

Многослойные периодические наноструктуры Та/[FeNiCo/CoFe]_x/Та изготовлены в НПК "Технологический центр". Интерес к подобным наноструктурам вызван поисковыми работами по определению оптимальных наноструктур для применения в элементах магнитной стрейнтроники на основе магниторезистивного и магнитострикционного эффектов.

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Формирование наноструктур Ta/[FeNiCo/ CoFe]_x/Та выполнялось методом магнетронного напыления на пластинах окисленного кремния диаметром 100 мм и толщиной 0.46 мм. В качестве буферного, а также защитного покрытия формировался верхний и нижний слой Та. Ось легкого намагничивания (ОЛН) в наноструктурах формировалась в процессе магнетронного напыления под воздействием постоянного магнитного поля величиной ~100 Э в плоскости подложки.

Магнитные параметры изготовленных наноструктур измерялись как в состоянии механической деформации сжатия, так и без механической нагрузки, на специализированной измерительной установке MESA-200 [5]. При исследовании образцов в установке подавалось контролируемое механическое напряжение, которое приводило к деформации (сжатия) наноструктуры на кремниевой подложке, при этом направление этих напряжений перпендикулярно магнитному полю, создаваемому установкой. Установка MESA-200 позволяет измерять магнитные параметры магниторезистивных наноструктур в составе кремниевых пластин, в постоянном и переменном магнитном поле до 80 кА/м.

Дальнейшие исследования наноструктур магнитной стрейнтроники проводились на образцах размером 4 × 20 мм², ОЛН в которых направлена вдоль или под 45° к длинной стороне образца, с целью измерения величины АМР эффекта в условиях меняющейся механической деформации. Механическая часть установки, создающая деформации сжатия—растяжения образца, состоит из шагового двигателя линейного перемещения с шагом 7.94 мкм, обеспечивающего механическое давление на образец до 10 H, которое контролируется тензодатчиком сжатия-растяжения, и двух катушек Гельмгольца, создающих магнитное поле до 300 Э.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовано три типа наноструктур Ta/[FeNiCo/ CoFe]_{*}/Та со следующим количеством периодов:

 $- Ta/[FeNiCo/CoFe]_3/Ta,$

- Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta,

- Ta/[FeNiCo/CoFe]₉/Ta.

Зависимость перемагничивания B(H) наноструктуры Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta, представлена на рис. 1. Из рисунка следует, что в исходном состоянии в наноструктуре наблюдается магнитная анизотропия. При приложении к образцу деформации сжатия вдоль ОЛН форма петли перемагничивания меняется, при этом коэрцитивность структуры увеличивается от 1.5 до 3 Э. При приложении сжимающих напряжений перпендику-



Рис. 1. Зависимость *B*(*H*) наноструктуры Ta/[FeNiCo/ CoFe]₆/Ta, в условиях наличия/отсутствия механической деформации.

лярно ОЛН коэрцитивность увеличивается с 15 до 18 Э, что, однако не приводит к существенному изменению петли перемагничивания.

На рис. 2 представлена характерная зависимость AMP эффекта структуры в свободном и деформированном состоянии сжатия (100, 170 и 235 МПа) от величины внешнего магнитного поля. Образцы размером 4 × 20 мм² предварительно подвергались отжигу 250°С в магнитном поле 1000 Э в течение 15 мин. Для исследованного образца, с ОЛН вдоль длинной стороны, в отсутствии механической нагрузки определен AMP эффект 0.01%. При воздействии механической нагрузки 235 МПа AMP эффект достигает 1.27%. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой ($\Delta R/R$)_о составляет 1.26%.

Зависимость изменения сопротивления обусловленного механической нагрузкой ($\Delta R/R$)_о от величины сжимающих механических напряжений, для образца с ОЛН вдоль длинной стороны, представлена на рис. За. Смещение линейного участка графика в область высоких механических напряжений можно объяснить на основе модели обменно-упругого взаимодействия на границе раздела ферромагнитных слоев с разной коэрцитивностью [7, 8].

В результате исследования образцов с ОЛН вдоль длинной стороны установлено, что максимальная величина АМР эффекта 1.0% при механической деформации сжатия определяется для наноструктуры Ta/[FeNiCo/CoFe]₃/Ta.



Рис. 2. Результаты измерения АМР эффекта, в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки.

Зависимость изменения сопротивления обусловленного механической нагрузкой $(\Delta R/R)_{\sigma}$ от величины механического напряжения сжатиярастяжения ±170 МПа для наноструктуры с ОЛН под углом 45° к длинной стороне образца представлена на рис. 36.

На рис. Зб представлены три графика зависимости величины относительного изменения сопротивления, обусловленного нагрузкой ($\Delta R/R$)_о от величины механической деформации сжатиярастяжения о для трех многослойных наноструктур Ta/[FeNiCo/CoFe]_x/Ta. Полная величина относительного изменения сопротивления, обусловленного механической нагрузкой, для исследованных наноструктур составляет:

 $- Ta/[FeNiCo/CoFe]_3/Ta - 1.3\%$,

 $- Ta/[FeNiCo/CoFe]_6/Ta - 1.7\%,$

 $- Ta/[FeNiCo/CoFe]_9/Ta - 1.5\%$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что количество периодов [FeNiCo/CoFe] в структуре существенно не влияет на величину ($\Delta R/R$)_о – относительного изменения сопротивления, обусловленного механической нагрузкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы многослойные периодические наноструктуры, содержащие магнитострикционные и магниторезистивные слои, определена зависимость величины АМР эффекта наноструктур



Рис. 3. График зависимости величины относительного изменения сопротивления, обусловленного нагрузкой $(\Delta R/R)_{\sigma}$ от величины механических напряжений **о**: деформация сжатия (*a*); деформация сжатия-растяжения (δ).

и зависимость относительного изменения сопротивления, обусловленного нагрузкой от величины контролируемой механической деформации.

На основе проведенного экспериментального многослойных исследования наноструктур Ta/[FeNiCo/CoFe],/Ta, с разным числом периодов [FeNiCo/CoFe] установлено, что количество периодов в структуре существенно не влияет на величину относительного изменения сопротивления, обусловленного механической нагрузкой сжатия-растяжения наноструктуры – данные величины для трех образцов отличается не более чем на 15%. При механической деформации сжатия, приложенной к наноструктурам, максимальный эффект проявляет Та/[FeNiCo/CoFe]₃/Та, достигая величины 1%, величина эффекта двух других наноструктур составляет ~0.5%.

Исследование параметров наноструктур выполнено с использованием оборудования ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Singh J., Kumar A., Chelvane J.A. // Sens. Actuators. A. Phys. 2019. V. 294. P. 54.
- Fuji Y., Kaji S., Hara M., et al // Appl. Phys. Lett. 2018. V.112. Art. No. 062405.
- Tavassolizadeh A., Rott K., Meier T. et al. // Sensors. 2016. V. 16. P. 1902.
- Жуков Д.А., Крикунов А.И., Амеличев В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1550; Zhukov D.A., Krikunov A.I., Amelichev V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1213.
- Zhukov D., Amelichev V., Kasatkin S., Kostyuk D. // Sensors. 2021. V. 21. P. 5785.
- Katada H., Shimatsu T., Watanabe I. et al. // J. Magn. Soc. Japan. 2002. V. 26. No. 4. Art. No. AQ9.
- Skomski R., Coey J.M.D. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. Art. No. 15812.
- 8. Leineweber T., Kronmüller H. // Phys. Stat. Sol. B. 1997. V. 201. P. 291.

Stydy of FeNiCo/CoFe multilayer nanostructures in magnetic straintronics

D. A. Zhukov^{a, *}, V. V. Amelichev^a, D. V. Kostyuk^a, S. I. Kasatkin^b

^a Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, 124498 Russia
^b Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia
*e-mail: D.Zhukov@tcen.ru

We presented the results of experimental studies of multilayer periodic nanostructures Ta/[FeNiCo/CoFe]_x/Ta, supplementing scientific knowledge in the field of magnetic straintronics. The electrophysical parameters of nanostructures under conditions of controlled mechanical deformation have been studied, and an experimental evaluation of the influence of the number of periods [FeNiCo/CoFe] on the magnitude of the magnetoresistive effect has been carried out.