

УДК 681.586.7:53.087.92

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ CoFe/FeNiCo

© 2021 г. Д. А. Жуков^{1, *}, А. И. Крикунов¹, 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 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований магнитоотрицательных и магниторезистивных свойств многослойной наноструктуры Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta, сформированной на окисленной кремниевой подложке. Исследовано влияние контролируемой механической деформации на электрофизические параметры наноструктуры. Сформулированы выводы о возможности применения наноструктур в элементах магнитной стрейнтроники.

DOI: 10.31857/S0367676521110399

ВВЕДЕНИЕ

Научные исследования в области спинтроники, как и феномена магниторезистивного эффекта, являются актуальным направлением, которое охватывает все больше смежных с ней научных областей микро- и нанoeлектроники, к одним из которых относят технологии магнитоэлектрических материалов и магнитную стрейнтронику.

Для магнитной стрейнтроники определенный интерес представляют материалы, сочетающие в себе высокие магнитоотрицательные и магниторезистивные свойства. В связи с этим проведено исследование многослойного нанокompозита, содержащего в определенном соотношении магниторезистивный и магнитоотрицательный материалы. Тонкие слои FeNiCo обладают высоким анизотропным магниторезистивным (AMR) эффектом (~2–4%) и низким значением коэффициента магнитоотрицательности [1, 2]. В слоях Co₅₀Fe₅₀ наблюдается низкий AMR эффект (~0.3%) и значительный магнитоотрицательный эффект [1–5]. Можно предположить, что многослойный нанокompозит на основе этих материалов будет сочетать в себе свойства высокого коэффициента магнитоотрицательности и AMR эффекта.

Для исследования свойств многослойной периодической наноструктуры на основе ферромагнитных нанослоев CoFe и FeNiCo, была разработана тонкопленочная многослойная наноструктура Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta, изготовленная в НПК “Технологический центр”.

Интерес к данной наноструктуре вызван, прежде всего, поиском оптимальной структуры для элементов магнитной стрейнтроники на основе магниторезистивного и магнитоотрицательного эффекта. Также представляет интерес фундаментальное научное исследование данной периодической наноструктуры и ее потенциальных применений в магнитополупроводниковой нанoeлектронике.

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Многослойная периодическая структура Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta формировалась на пластинах окисленного кремния диаметром 100 мм с толщиной 0.46 мм методом магнетронного напыления. Толщины ферромагнитных слоев FeNiCo и CoFe составляли 3 нм. Слои Ta толщиной 3 нм использовались в качестве буферного и защитного покрытия. Ось легкого намагничивания (ОЛН) в наноструктурах формировалась в процессе напыления под влиянием постоянного магнитного поля величиной ~100 Э в плоскости подложки.

Сформированные наноструктуры на кремниевых подложках использовались для исследования магнитных параметров как в состоянии механической деформации сжатия, так и без механической нагрузки, на специализированной измерительной установке [2, 6]. При исследовании образцов в установке подавалось контролируемое механическое напряжение, которое приводило к

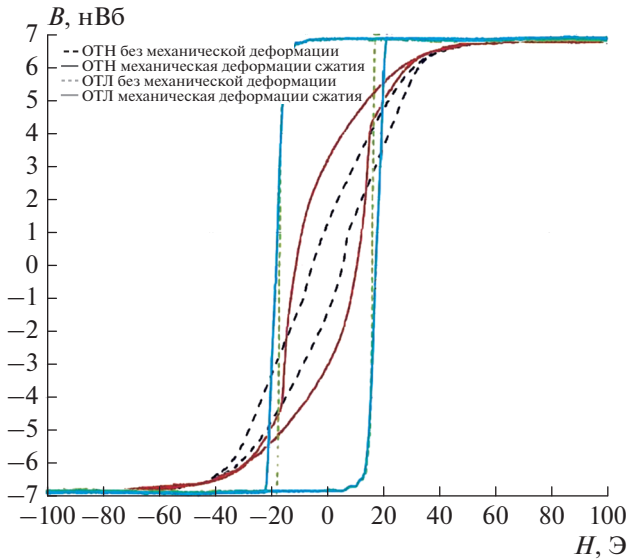


Рис. 1. Зависимость $B(H)$ многослойной исходной наноструктуры в условиях наличия/отсутствия механической деформации.

деформации (сжатия) наноструктуры на кремниевой подложке, при этом направление этих напряжений перпендикулярно магнитному полю, создаваемому установкой.

После исследования наноструктуры в целом на пластине проводилось исследование на образцах размером $4 \times 20 \text{ мм}^2$, ОЛН в которых направлена вдоль длинной стороны образца или под 45° – измерение величины АМР эффекта в условиях меняющейся механической нагрузки. Измерение АМР эффекта проводилось двухзондовым методом – установка имеет в своей конструкции устройство для создания механических деформаций в образце [6]. В поверхностном слое образца со стороны зондов создается контролируемое механическое напряжение сжатия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость перемagnичивания $B(H)$ наноструктуры 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 кривой перемagnичивания меняется, при этом коэрцитивность структуры увеличивается с 5 до 10 Э. Приложение сжимающих напряжений перпендикулярно ОЛН не приводит к существенному изменению формы кривой перемagnичивания.

На рис. 2а представлена характерная зависимость АМР эффекта структуры в свободном и деформированном состоянии сжатия (200 МПа) от величины внешнего магнитного поля. Образцы размером $4 \times 20 \text{ мм}^2$ предварительно подвергались термомагнитному отжигу 250°C при 1000 Э в течение 15 мин. Для исследованного образца, с ОЛН вдоль длинной стороны, в отсутствии механической нагрузки определен АМР эффект 0.04% при коэрцитивной силе ~ 10 Э. При воздействии механической нагрузки АМР эффект увеличился до 0.8%, а значение коэрцитивной силы составило ~ 5 Э. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ составляет 0.75%.

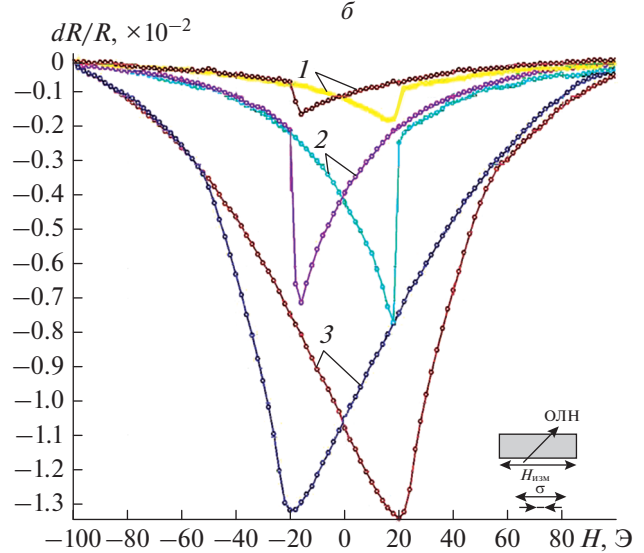
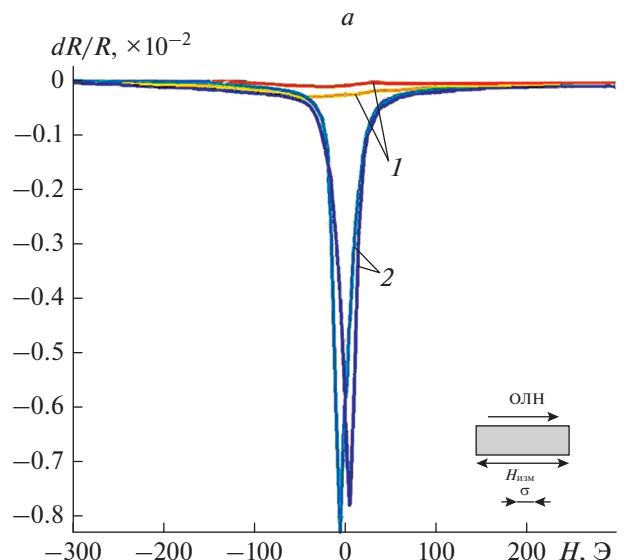


Рис. 2. Результаты измерения анизотропного магнито-резистивного эффекта, в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки. Сжатие: 1 – без механической деформации, 2 – с механической деформацией (а); сжатие–растяжение: 1 – с механической деформацией растяжения, 2 – без механической деформации, 3 – с механической деформацией сжатия (б).

лись термомагнитному отжигу 250°C при 1000 Э в течение 15 мин. Для исследованного образца, с ОЛН вдоль длинной стороны, в отсутствии механической нагрузки определен АМР эффект 0.04% при коэрцитивной силе ~ 10 Э. При воздействии механической нагрузки АМР эффект увеличился до 0.8%, а значение коэрцитивной силы составило ~ 5 Э. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ составляет 0.75%.

На рис. 2б представлена зависимость АМР эффекта для образца, в котором ОЛН направлена

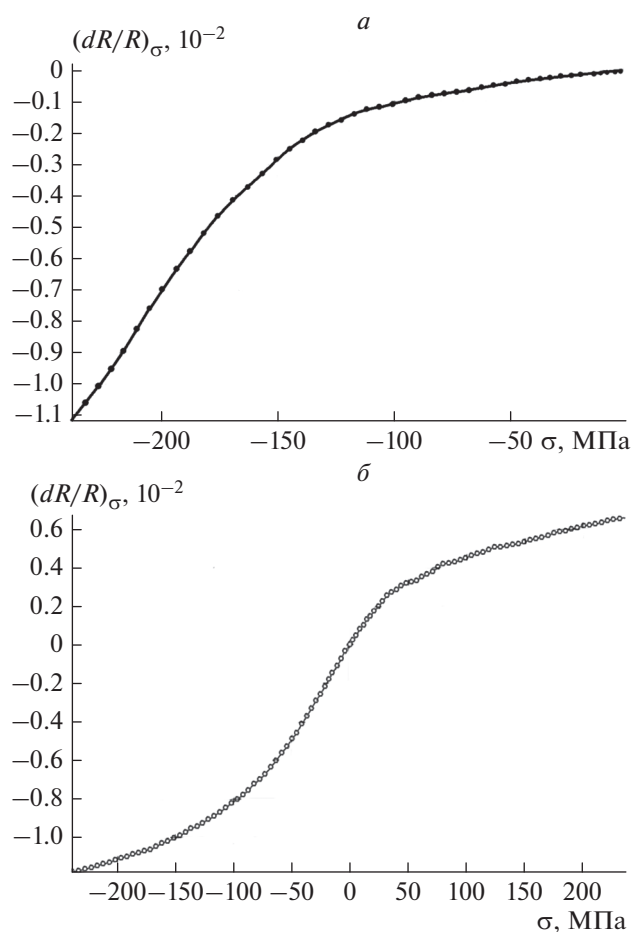


Рис. 3. График зависимости величины относительно изменения сопротивления, обусловленного нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ от величины механических напряжений σ : механическая деформация сжатия (а), механическая деформация сжатия–растяжения (б).

под углом 45° к длинной стороне образца. Максимально допустимые для данной подложки напряжения сжатия/растяжения соответствуют ± 250 МПа. Более высокие напряжения связаны с риском разрушения кремниевой подложки. Соотношение соответствующих осей представлено во вставке к рис. 2б.

В образце без приложения механической деформации регистрируется магниторезистивный эффект 0.7% при коэрцитивности 17.5 Э. Под влиянием механической деформации сжатия 230 МПа магниторезистивный эффект наноструктуры увеличивается до 1.3%, а коэрцитивность возрастает до 20.7 Э. При приложении к образцу механической деформации растяжения 230 МПа магниторезистивный эффект снижается до 0.1%, а коэрцитивность увеличивается до 19.4 Э. Из этого следует, что относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ составляет 1.2%.

Зависимость изменения сопротивления обусловленного механической нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ от величины механического напряжения сжатия, для образца с ОЛН вдоль длинной стороны, представлена на рис. 3а.

Характерной особенностью данной зависимости является смещение линейного участка графика в область более высоких напряжений. Такой эффект может быть объяснен на основе модели обменно-упругого взаимодействия на границе раздела ферромагнитных слоев с разной коэрцитивностью [7–9].

Зависимость изменения сопротивления обусловленного механической нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ от величины механического напряжения сжатия и растяжения ± 230 МПа, для наноструктуры с ОЛН под углом 45° к длинной стороне образца, представлена на рис. 3б. Из рисунка следует, что наноструктура реагирует как на механическую деформацию сжатия, так и на растяжение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы получены и исследованы тонкопленочные наноструктуры Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta, содержащие магнитострикционный слой CoFe и магниторезистивный слой FeNiCo в равных объемных долях. В результате исследования образцов установлено, что контролируемая механическая деформация таких наноструктур приводит к изменению величины АМР эффекта до 1.1%.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность применения многослойной наноструктуры в качестве чувствительного элемента в устройствах магнитной стрейнтроники, где в качестве внешнего воздействующего фактора может выступать как механическая деформация сжатия, так и растяжения, что значительно расширяет функциональный диапазон подобных наноструктур в устройствах преобразования деформаций на основе магнитной стрейнтроники.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков Д.А., Амеличев В.В., Костюк Д.В. и др. // Наноиндустрия. 2020. Т. S96-2. С. 420.
2. Касаткин С.И., Жуков Д.А., Крикунов А.И. и др. // Датчики и сист. 2018. № 3(234). С. 3.
3. Amelichev V.V., Zhukov D.A., Kostyuk D.V. et al. // Int. J. Mech. Eng. Technol. 2018. V. 9. No. 9. P. 1427.
4. Hunter D., Osborn W., Wang K. et al. // Nat. Commun. 2011. No. 2. Art. No. 518.

5. Nakamura T., Takeuchi T., Yuito I. et al. // Mater. Trans. 2014. V. 55. No. 3. P. 556.
6. Жуков Д.А., Крикунов А.И., Амеличев В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 5. С. 747; Zhukov D.A., Krikunov A.I., Amelichev V.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 5. P. 602.
7. Skomski R., Coey J.M.D. // Phys. Rev. 1993. V. 48. Art. No. 15812.
8. Leineweber T., Kronmüller H. // Phys. Stat. Sol. B. 1997. V. 201. P. 291.
9. Fullerton E.E., Jiang J.S., Grimsditch M. et al. // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. Art. No. 12193.

Magnetostrictional properties of periodic nanostructures based on CoFe/FeNiCo

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

^aScientific-Manufacturing Complex "Technological Centre", Moscow, 124498 Russia

^bInstitute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

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

The results of experimental studies of the magnetostrictive and magnetoresistive properties of a thin-film multilayer Ta/[FeNiCo/CoFe]₆/Ta nanostructure formed on an oxidized silicon substrate are presented. The effect of mechanical deformation on the electrophysical parameters of the nanostructure is investigated. Conclusions are formulated about the possibility of using nanostructures in elements of magnetic straintronics.