

УДК 681.586.7,53.087.92

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ С ГИГАНТСКИМ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ ДЛЯ УСТРОЙСТВ МАГНИТНОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ

© 2020 г. Д. А. Жуков¹, *, 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 02.12.2019 г.

После доработки 23.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований магнитострикционных и магниторезистивных свойств многослойной тонкопленочной наноструктуры Ta/FeNiCo/CoFe/Cu/CoFe/FeNiCo/FeMn/Ta, сформированной на окисленной кремниевой подложке. Исследовано влияние механической деформации на электрофизические параметры наноструктуры. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности применения магниторезистивных наноструктур с магнитострикционным эффектом в элементах магнитной стрейнтроники.

DOI: 10.31857/S0367676520050440

ВВЕДЕНИЕ

Создание преобразователей механических напряжений с использованием магниторезистивных (МР) наноструктур является в настоящее время актуальной задачей, поскольку расширяет возможности современных приборов за счет комбинации двух физических эффектов – МР и магнитострикционного (МС) эффекта в едином устройстве. Причем комбинации данных эффектов могут быть различные, как по виду МР эффекта, так и по МС эффекту.

Коллективом авторов проведена разработка наноструктуры, обладающей одновременно спинвентильным МР (СВМР) и МС эффектами. В таких наноструктурах при их механической деформации в результате действия эффекта обратной магнитострикции (эффект Виллари) происходит изменение магнитного состояния свободного слоя, что в свою очередь ведет к изменению СВМР эффекта наноструктуры. При этом свободный слой СВМР наноструктуры должен обладать МС свойствами.

В настоящее время достаточно высокие значения СВМР эффекта (6–9%) могут быть реализованы при использовании в качестве ферромагнитных слоев сплавов Fe–Ni–Co и Co–Fe [1–3].

В ряде работ приведены результаты теоретических исследований фазовой диаграммы Co_xFe_{1-x} ,

и представлены экспериментальные подтверждения возможности реализации высоких значений коэффициентов магнитострикции для составов $0.5 < x < 0.7$ [4–6]. Показана возможность получения слоев таких сплавов с коэффициентом магнитострикции до 150 ppm при медленном охлаждении и умеренных температурах отжига.

В данной работе исследованы свойства СВМР многослойной наноструктуры Ta/FeNiCo/CoFe/Cu/CoFe/FeNiCo/FeMn/Ta, где в качестве МС слоя использовался сплав $Co_{50}Fe_{50}$.

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Исследуемые наноструктуры формировались методом магнетронного распыления, в качестве исходных подложек использовались пластины окисленного кремния. Для формирования оси легкого намагничивания (ОЛН) в напыляемых наноструктурах использовались постоянные магниты, обеспечивающие магнитное поле величиной ~100 Э в плоскости подложки.

При исследовании МС эффекта, на тестовые образцы (4×20 мм²) в измерительной установке подавалось контролируемое механическое напряжение, которое приводило к деформации (сжатия) наноструктуры на кремниевой подложке. Измерение МР эффекта проводилось двухзондовым мето-

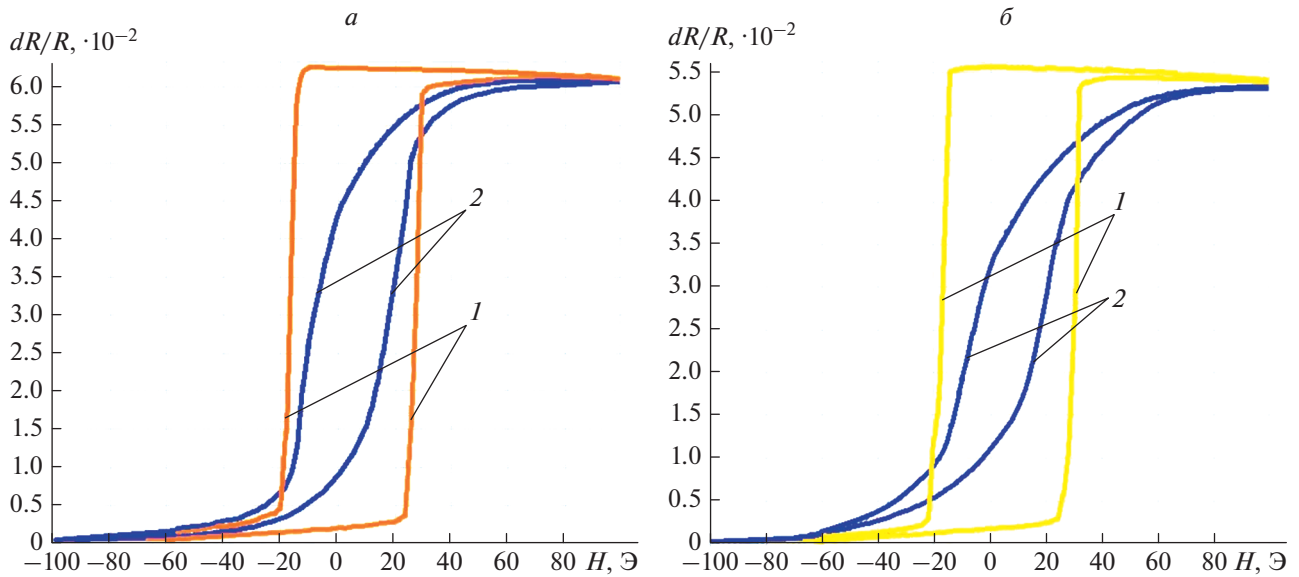


Рис. 1. Результаты измерения магниторезистивного эффекта образца СВМР наноструктуры, в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки (а) – неотожженного образца, (б) – отоженного образца, где 1 – без механической деформации, 2 – с механической деформацией.

дом [7]. Установка имеет в своей конструкции устройство для создания механических деформаций в образце [8]. Образцы представляют собой полоски $4 \times 20 \text{ мм}^2$, ОЛН направлена вдоль длинной стороны образца. В поверхностном слое образца со стороны зондов создается контролируемое механическое напряжение сжатия, совпадающее с ОЛН наноструктуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В СВМР наноструктурах, исследованных сразу после напыления, направления оси однонаправленной анизотропии (ООА) и ОЛН свободного слоя совпадают и задаются направлением магнитного поля при формировании наноструктуры.

В тестовых образцах ОЛН и ООА совпадают по направлению и располагаются вдоль длинной стороны образца. Типичная зависимость относительного изменения электрического сопротивления $(\Delta R/R)$ исходных образцов, от величины магнитного поля для ненагруженного образца и подвергнутого механической деформации 120 МПа приведена на рис. 1а.

В исходной наноструктуре без механической нагрузки величина МР эффекта составляет 6.27%, коэрцитивность свободного слоя составляет 21 Э. При приложении сжимающих напряжений величиной 120 МПа величина СВМР эффекта (в окрестности нулевого поля) уменьшается на 1.77%.

Исходные СВМР наноструктуры подвергались вакуумному отжигу в магнитном поле с це-

лью оптимизации МС свойств слоев CoFe. На рис. 1б представлена зависимость $\Delta R/R(H)$ для СВМР наноструктуры после отжига при 250°C в магнитном поле 300 Э.

Как видно из представленных зависимостей после отжига изменение СВМР эффекта, обусловленное механической нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma$ увеличилось и составило 2.25%. Увеличение абсолютной величины $(\Delta R/R)_\sigma$ обусловлено улучшением МС свойств CoFe. На рис. 2 приведен ряд кривых для обратного хода зависимостей $\Delta R/R(H)$ при разной величине механической нагрузки. Соответствующая зависимость $(\Delta R/R)_\sigma$ от величины механических напряжений σ при нулевом магнитном поле приведена на вставке рис. 2. Для существенного улучшения магнитострикционных свойств слоев CoFe необходимы отжиги при 300°C и выше, однако, для данной наноструктуры отжиг 300°C приводит к необратимой деградации свойств антиферромагнитного слоя FeMn и уменьшению ГМР эффекта.

Представленные выше кривые (рис. 1 и 2) характеризуют случай, когда ось механического напряжения параллельна ОЛН и образец находится в состоянии сжатия. Если наноструктура находится в состоянии одноосного растяжения, изменение магнитного состояния МС слоя будет незначительно. В связи с этим представляет интерес случай, когда ОЛН свободного слоя направлена под углом $\sim 45^\circ$ к оси ООА, а ось механических напряжений направлена вдоль ООА. Предполагается, что в таком случае СВМР наноструктура должна реагировать как на сжатие, так и на растя-

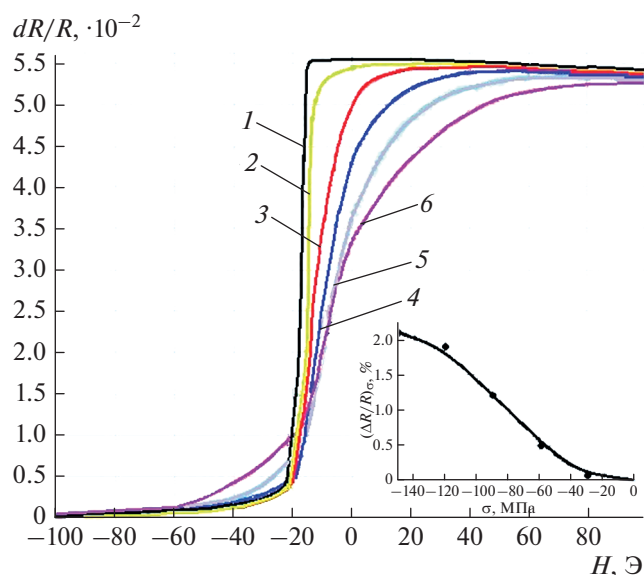


Рис. 2. Измерение величины МР эффекта при различных уровнях механической нагрузки: 1 – без механической нагрузки; 2 – механическая нагрузка 30 МПа; 3 – механическая нагрузка 60 МПа; 4 – механическая нагрузка 90 МПа; 5 – механическая нагрузка 120 МПа; 6 – механическая нагрузка 150 МПа. Вставка: График зависимости величины относительного изменения сопротивления, обусловленного нагрузкой $(\Delta R/R)_\sigma, \%$ от величины механических напряжений σ .

жение. Исследуемый тестовый образец был изготовлен со сформированной в наноструктуре ОЛН под 45° , и подвергнут отжигу в магнитном поле при температуре 250°C . При этом направление магнитного поля в процессе отжига было направлено под углом 45° к ООА. После чего проводились измерения величины МР эффекта в условиях механической деформации сжатия и растяжения (рис. 3).

Как видно из рис. 3 механическая деформация СВМР наноструктуры приводит к изменению коэрцитивности и петли перемагничивания следующим образом: при деформации сжатия происходит уменьшение величины СВМР эффекта, а при деформации растяжения – увеличение величины СВМР эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате ряда экспериментальных работ изучены свойства СВМР наноструктур содержащих в своем составе в качестве свободного слоя МС слой $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$. В результате исследования тестовых образцов показано, что механическая деформация таких структур приводит к изменению величины МР эффекта до 2.25%. Дальнейшее по-

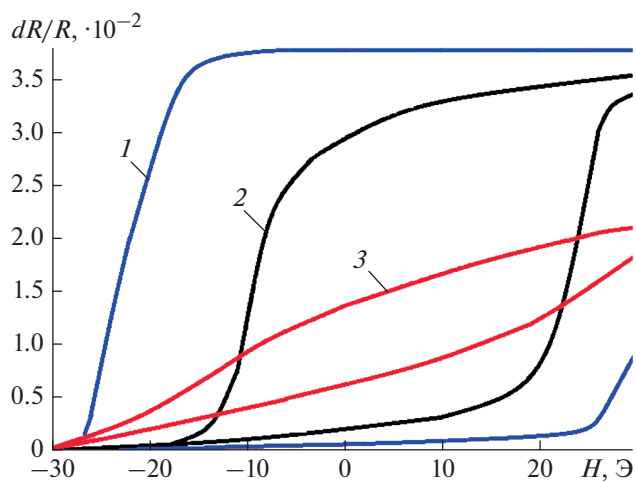


Рис. 3. Результаты измерения МР эффекта наноструктуры, в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки: 1 – механическая деформация растяжения; 2 – без деформации; 3 – механическая деформация сжатия.

вышение эффективности наноструктур может быть связано с улучшением МС свойств свободного слоя этих наноструктур.

Полученные в рамках работы результаты исследования СВМР наноструктуры с МС слоем позволяют сделать вывод о возможности применения подобных наноструктур для элементов магнитной стрейнтроники, приборов и устройств основанных на принципах преобразования механической деформации.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин С.И., Муравьев А.М., Плотникова Н.В. и др. // Автомат. телемех. 2009. № 6. С. 141.
2. Розенблат М.А. // Автомат. телемех. 1997. № 1. С. 3.
3. Amelichev V.V., Vasilyev D.V., Zhukov D.A. et al. // Int. J. Appl. Engin. Res. 2017. V. 12. № 23. Art. № 13142.
4. Ustinovshikov Y., Pushkarev B. // J. Alloys Compounds. 2006. V. 424. P. 145.
5. Nakamura T., Takeuchi T., Yuito I. et al. // Mater. Trans. 2014. V. 55. № 3. P. 556.
6. Hunter D., Osborn W., Wang K. et al. // Nat. Commun. 2011. № 2. Art. № 518.
7. Касаткин С.И., Жуков Д.А., Крикунов А.И. и др. // Дат. сист. 2018. № 3(234). С. 3.
8. Amelichev V.V., Zhukov D.A., Kostyuk D.V. et al. // IJMET. 2018. № 9(9). P. 1427.