

УДК 621.318.1, 53.087.92

# МНОГОСЛОЙНЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ МАГНИТНОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ

**С.И. Касаткин**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [serkasat@ipu.ru](mailto:serkasat@ipu.ru)

**Д.А. Жуков**

*«Научно-производственный комплекс «Технологический центр»*  
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7  
E-mail: [D.Zhukov@tcen.ru](mailto:D.Zhukov@tcen.ru)

**А.И. Крикунов**

*ООО Научно-производственный комплекс «Фотрон – Авто»*  
Россия, 117105, Москва, наб. Новоданиловская, 8  
E-mail: [kral@mail.ru](mailto:kral@mail.ru)

**В.В. Амеличев**

*Научно-производственный комплекс «Технологический центр»*  
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7  
E-mail: [V.Amelichev@tcen.ru](mailto:V.Amelichev@tcen.ru)

**Д.В. Костюк**

*Научно-производственный комплекс «Технологический центр»*  
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7  
E-mail: [D.Kostyuk@tcen.ru](mailto:D.Kostyuk@tcen.ru)

**Д.В. Васильев**

*Научно-производственный комплекс «Технологический центр»*  
Россия, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7  
E-mail: [D.Vasilyev@tcen.ru](mailto:D.Vasilyev@tcen.ru)

**Ключевые слова:** магнитострикционный эффект, магниторезистивный эффект, стрейн-троника, наноструктура.

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментальных исследований магнитострикционных и магниторезистивных свойств тонкопленочных многослойных наноструктур Ta / FeNiCo / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> / Ta и Ta / FeNiCo / CoFeB / Ta на окисленных кремниевых подложках диаметром 100 мм для создания на их основе гибридных магниторезистивных и магнитострикционных элементов магнитной стрейнтроники. Приведены методики исследования магнитострикционных и магниторезистивных свойств наноструктур. Экспериментально установлена зависимость величины анизотропного магниторезистивного эффекта от механической деформации в экспериментальных образцах наноструктур.

## 1. Введение

При разработке устройств стрейнтроники на основе анизотропного магниторезистивного эффекта (АМР) необходимы материалы, сочетающие в себе как высокие значения АМР эффекта, так и эффекта магнитострикции (МС). Поиск материалов с такими свойствами представляет определенный интерес к решению задачи по созданию многофункциональных преобразователей физических величин [1].

В данном случае результативным может быть подход, суть которого состоит в пространственном разделении ферромагнитной среды на два слоя: один из которых обеспечивает высокое значение АМР эффекта, а другой высокое значение эффекта МС. Необходимым требованием является также эффективное обменное взаимодействие между слоями. В такой двухслойной ферромагнитной наноструктуре при ее механической деформации происходит изменение магнитного состояния МС слоя, что влечет изменение магнитного состояния МР слоя и, в итоге, изменение величины электропроводности. Величина АМР эффекта в двухслойной наноструктуре может зависеть как от толщин слоев, так и от соотношения толщин слоев. Кроме того, возможно влияние структурного соответствия на границе раздела слоев.

В данной работе проведены оценочные исследования возможности реализации двухслойных наноструктур на основе изученных нами ранее материалов [2,3]. В качестве магниторезистивного слоя использовался сплав FeNiCo, в качестве магнитострикционного материала использовались сплавы Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> и CoFeB. Ферромагнитная наноструктура сформирована между тонкими нанослоями тантала.

## 2. Экспериментальные исследования

Проведены экспериментальные исследования магнитострикционных и магниторезистивных свойств тонкопленочных многослойных наноструктур (Ta / FeNiCo / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> / Ta и Ta / FeNiCo / CoFeB / Ta). Формирование данных наноструктур производилось методом магнетронного распыления, где в качестве исходных подложек использовались пластины окисленного кремния диаметром 100 мм. Для формирования оси легкого намагничивания (ОЛН) в напыляемых наноструктурах использовались постоянные магниты, обеспечивающие магнитное поле величиной ~100 Э в плоскости подложки.

Измерение магнитных свойств напыленных наноструктур проводилось на установке MESA-200 фирмы Shb Instruments (США), позволяющей определить и визуализировать магнитные параметры, включая магнитострикцию [2]. При этом, на образцы в установке MESA-200 подавалось контролируемое механическое напряжение, которое приводило к деформации (сжатию) наноструктуры на кремниевой подложке. Измерительная система MESA-200 имеет в своей конструкции систему «ножей» для создания механических деформаций в образце. Измерения магнитных параметров напыленных наноструктур проводились вдоль ОЛН и оси трудной намагниченности (ОТН) ферромагнитных пленок. Измерение АМР эффекта проводилось двухзондовым методом. Установка имеет в своей конструкции устройство для создания механических деформаций в образце [3]. В поверхностном слое образца со стороны зондов создается контролируемое механическое напряжение сжатия. Перед измерением все исследуемые образцы с наноструктурами подвергались вакуумному отжигу в магнитном поле при температуре 300°C, поскольку данная операция улучшает МС свойства [4,5].

На рис.1 а представлены кривые перемагничивания наноструктур FeNiCo (20 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (10 нм) для ОЛН и ОТН в условиях механической нагрузки и в ее отсутствие. Результаты измерения АМР эффекта в условиях приложения механи-

ческой деформации в наноструктуре FeNiCo (20 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (10 нм) представлены на рис. 1 б.

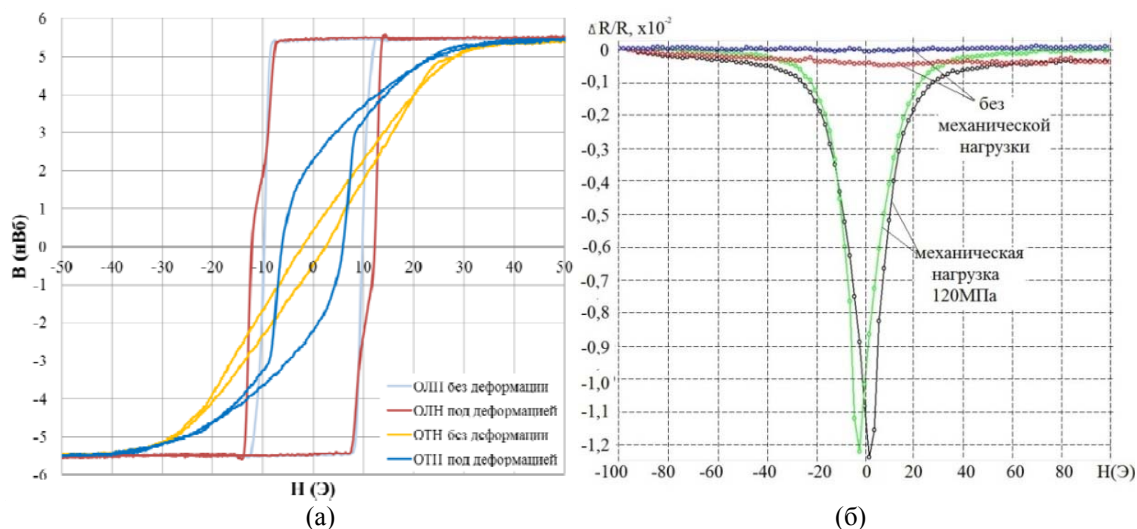


Рис. 1. Магнитные характеристики наноструктуры FeNiCo (20 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (10 нм).

Для исследованного экспериментального образца в отсутствии механической нагрузки определен АМР эффект на уровне 0,01%. Однако, при воздействии механической нагрузки 120 МПа зарегистрирован рост АМР эффекта до 1,23%. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой  $(\Delta R/R)_\sigma$  составляет 1,22%.

На рис. 2а представлены кривые перемагничивания наноструктуры FeNiCo (10 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (20 нм) для ОЛН и ОТН в условиях механической нагрузки и в ее отсутствие. Проведенные исследования величины АМР эффекта наноструктуры FeNiCo (10 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (20 нм) представлены на рис. 2б.

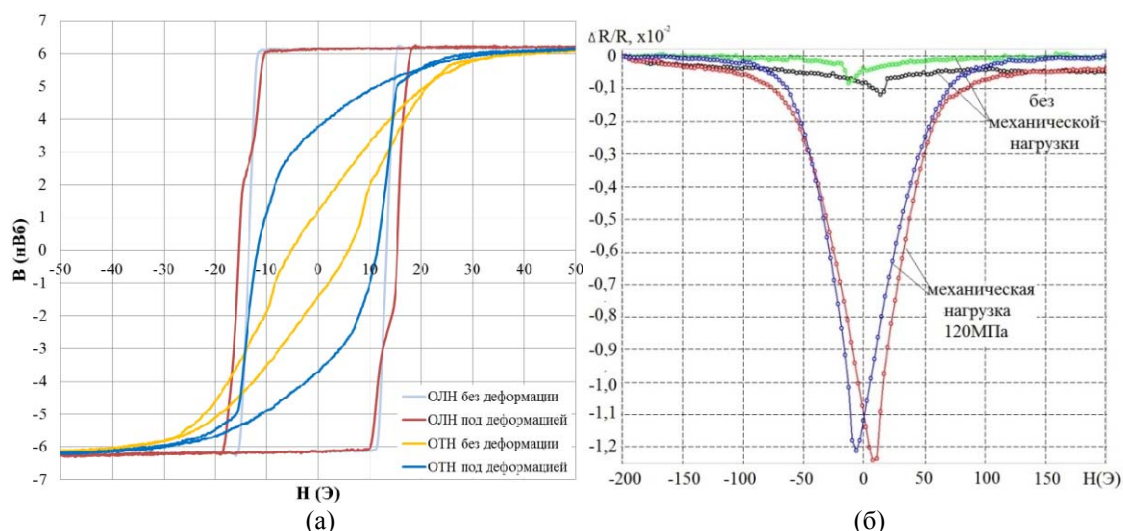


Рис. 2. Магнитные характеристики наноструктуры FeNiCo (10 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (20 нм).

Для исследованного образца в отсутствии механической нагрузки определен АМР эффект на уровне 0,1%, значение коэрцитивной силы составило ~ 13 Э. При воздействии деформации АМР эффект увеличился до 1,22%, а значение коэрцитивной силы уменьшилось до 7 Э. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой  $(\Delta R/R)_\sigma$  составляет 1,12%.

На рис. 3а представлены кривые перемагничивания наноструктуры FeNiCo (10 нм) / CoFeB (10 нм) для ОЛН и ОТН в условиях механической нагрузки и в ее отсутствие. Результаты измерения АМР эффекта, в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки, наноструктуры FeNiCo (10 нм) / CoFeB (10 нм) представлены на рис. 3 б.

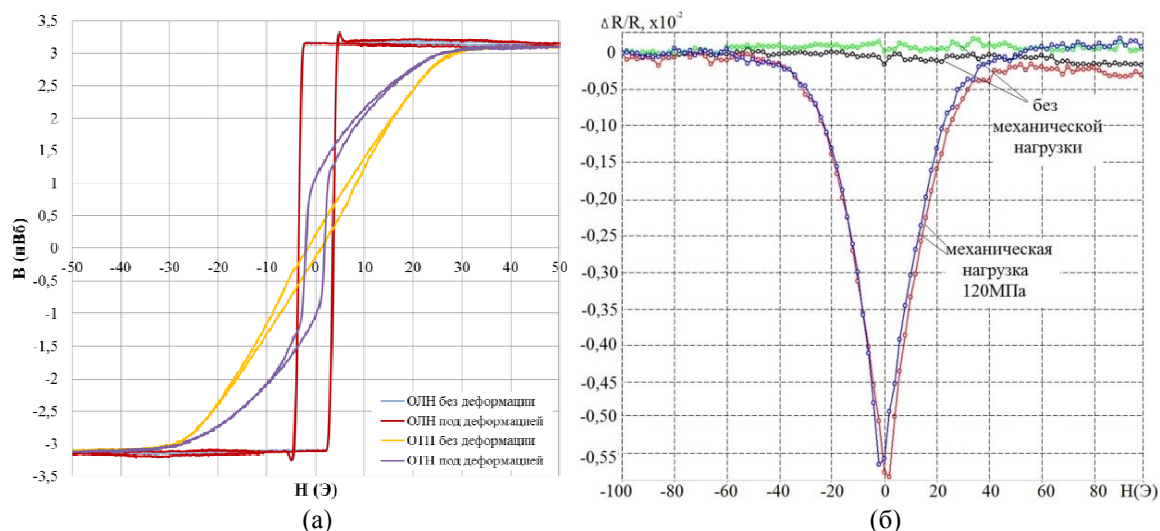


Рис. 3. Магнитные характеристики наноструктуры FeNiCo (10 нм) / CoFeB (10 нм).

Для образца FeNiCo (10 нм) / CoFeB (10 нм) в отсутствии механической нагрузки определен АМР эффект 0,01%. При воздействии механической нагрузки 120 МПа АМР эффект увеличился до 1,1%. Таким образом, относительное изменение сопротивления, обусловленное нагрузкой  $(\Delta R/R)_\sigma$  составляет 0,57%.

### 3. Заключение/Выводы

Предварительные исследования [2, 3] показали, что FeNiCo является магнитомягким материалом с величиной АМР эффекта 1,5-3 %, при этом величина МС эффекта близка к нулю. Материал  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$  обладает слабо выраженной магнитной анизотропией и низким АМР эффектом. Величина МС эффекта в слоях  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$  может достигать ~ 100 ppm в результате отжига при температуре ~ 500°C [4,5]. В таблице 1 приведены физические и магнитные параметры исследуемых структур. Результаты получены на установке MESA-200 (Shb Instruments) на пластинах диаметром 100 мм с использованием устройства одноосной механической деформации пластин.

Таблица 1. Результаты измерений.

№	Структура Ta / SL / Ta	Толщина пленки <i>d</i> , нм	Магнитная индукция насыщения <i>B<sub>s</sub></i> , мВб	Коэрцитивная сила <i>H<sub>c</sub></i> , Э		Изменение магнитной анизотропии $\Delta H_s$ , Э		АМР эф- фект $\Delta R/R$ , %	Коэффициент $(\frac{\Delta R}{R})_\sigma$ , %
				ОЛН	ОТН	ОЛН	ОТН		
1	FeNiCo / $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$	20 / 10	5,5	9,7	2,3	3,1	13,8	2,3	1,22
2	FeNiCo / $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$	10 / 20	6,1	13,4	5,5	2,3	-11,4	1,3	1,12
3	FeNiCo / CoFeB	10 / 10	3,2	3,3	0,9	0,1	-17,4	1,5	0,57

В таблице величина  $\Delta H_s$  – изменение величины магнитной анизотропии наноструктуры, обусловленное механической деформацией – данная величина характеризует МС свойства наноструктуры. Согласно таблице, очевидно, что наилучшие АМР свойства

проявляет наноструктура FeNiCo (20 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (10 нм), а наилучшие МС свойства наноструктура FeNiCo (10 нм) / CoFeB (10 нм).

Наибольшая величина  $(\Delta R/R)_\sigma$  соответствует наноструктуре FeNiCo (20 нм) / Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> (10 нм), при этом величина  $(\Delta R/R)_\sigma$  равная 1,2% составляет около 50% от максимальной величины АМР эффекта в данном образце. Это свидетельствует о том, что имеется ресурс для увеличения  $(\Delta R/R)_\sigma$  и он связан с усилением МС свойств слоя Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>.

На рис. 4 представлена зависимость величины  $(\Delta R/R)_\sigma$  от величины одноосных сжимающих напряжений для исследуемых наноструктур.

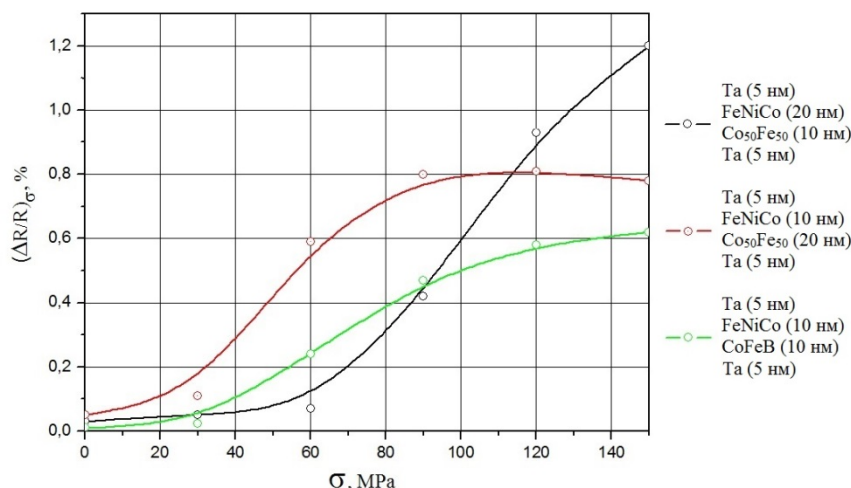


Рис. 4. График зависимости величины  $(\Delta R/R)_\sigma$  от величины механических напряжений,

Исследованные двухслойные ферромагнитные наноструктуры являются аналогом тензорезистивных элементов с той разницей, что одной из составляющих их физических основ функционирования является АМР эффект. Чувствительность магниторезистивных элементов к механической деформации обычно оценивают как:  $GF = (\Delta R/R)_\sigma / \Delta \epsilon$ , где  $\Delta \epsilon$  – деформация чувствительного слоя обусловленная механической нагрузкой в пределах упругости. В данном случае величина  $GF$  составляет  $\sim 150$ , что может представлять интерес для практического применения таких слоев в разрабатываемых элементах магнитной стрейнтроники.

## Список литературы

1. Amelichev V., Belyakov P., Vasilyev D., Zhukov D. et al. Straintronic elements of the basis of magnetostriction // Intern. J. Environm. & Science Education. 2016. No. 11. P. 10923–10940.
2. Amelichev V.V., Vasilyev D.V., Zhukov D.A. et al. Investigation of Magnetic Properties of Thin-Film Nanostructures of Elements of Magnetic Straintronics // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, No. 23. P. 13142-13149.
3. Amelichev V.V., Zhukov D.A., Kostyuk D.V. et al. Magnetoresistive and Magnetostrictive Properties of Co<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub> Thin-Film Nanostructures for Magnetic Straintronic Devices // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9(9). P. 1427-1438.
4. Hunter D., Osborn W., Wang K., Kazantseva N. et al. Giant magnetostriction in annealed Co<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub> thin-films // Nat. Comm. 2011. Vol. 2, paper 518.
5. Nakamura T., Takeuchi T., Yuito I., Kato K. et al. Effect of annealing on magnetostrictive properties of Fe-Co alloy thin films // Mater. Trans. 2014. Vol. 55, No. 3. P. 556-560.