

07

Создание совмещенной технологии спин-вентильных магниторезистивных элементов и микромагнитов

© В.В. Амеличев,^{1,2} П.А. Беляков,^{1,2} Д.В. Костюк,^{1,2} Д.В. Васильев,^{1,2} Е.П. Орлов,^{1,2} Ю.В. Казаков,² С.И. Касаткин,³ А.И. Крикунов⁴

¹ ООО Научно-производственное предприятие „Технология“, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

² Научно-производственный комплекс „Технологический центр“ МИЭТ, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

³ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117997 Москва, Россия

⁴ ООО Научно-производственный комплекс „Фотрон–Авто“, 117105 Москва, Россия
e-mail: goodnessgims@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 сентября 2017 г.)

Представлены результаты исследования технологии создания магниторезистивных (МР) элементов на основе многослойных спин-вентильных МР (СВМР) Ta–FeNiCo–CoFe–Cu–CoFe–FeNiCo–FeMn–Ta-наноструктур и CoNi-микромагнитов для построения цифровых гальванических развязок и преобразователей магнитного поля. Представлены результаты экспериментальных исследований тестовых элементов на основе многослойных СВМР наноструктур с МР эффектом 7–8% и пленки из магнитотвердого материала с коэрцитивной силой до 95 Ое, сформированных на одном кристалле.

DOI: 10.21883/JTF.2018.06.46033.2489

На сегодняшний день в мире наблюдается постоянный интерес к разработке и исследованию тонкопленочных магниторезистивных (МР) элементов, связанный с открытием в 1988 г. гигантского МР (ГМР) эффекта. Разрабатываются и выпускаются различного типа преобразователи магнитного поля и тока [1,2], головки считывания для магнитных дисков [3], гальванических развязок (ГР) [4]. Ведутся разработки запоминающих элементов и устройств на их основе [5], логических элементов, спиновых транзисторов, биосенсоров на основе МР чувствительных элементов [6]. Выпускаются измерительные системы на основе МР преобразователей: диагностика объектов с близлежащими магнитными полями, медицинские системы, компасы и т.п.

В настоящее время на рынке существует потребность в высокоэффективных МР преобразователях магнитного поля для контроля слабого магнитного поля и ГР для защиты входных цепей электронных приборов и устройств. МР преобразователи представляют собой мостовую схему с магниточувствительными плечами из полосок на основе напыленных многослойных наноструктур с ферромагнитными пленками, сформированную на окисленной кремниевой подложке [7]. При воздействии на мостовую схему магнитного поля происходит изменение магнитосопротивления полосок и формируется нечетная или четная вольт-эрстедная характеристика (ВЭХ) преобразователя, чувствительность которой зависит, в том числе, и от оптимального угла разворота векторов намагниченности ферромагнитных пленок МР наноструктуры в полоске. Одним из перспективных методов для разворота векторов намагниченности полосок является формирование напыленных CoNi-микромагнитов на од-

ном кристалле с МР наноструктурами [8], разворачивающих своим постоянным магнитным полем векторы намагниченности ферромагнитных пленок наноструктуры на оптимальный угол.

Современные высокочувствительные преобразователи магнитного поля и цифровые ГР построены на наноструктурах с ГМР эффектом, которые работают при слабых магнитных полях (до 1 мТ). Некоторые промышленно выпускаемые ГР, основанные на ГМР наноструктурах, имеют ряд технических преимуществ перед оптическими и работают на частотах до 200 МГц [7–9].

Нами исследованы преобразователи и чувствительные элементы ГР на основе спинвентильных МР (СВМР) Ta–FeNiCo–CoFe–Cu–CoFe–FeNiCo–FeMn–Ta-наноструктуры. В подобных наноструктурах в нижней ферромагнитной FeNiCo-пленке (свободной) вектор намагниченности реагирует на внешнее магнитное поле, а в верхней (фиксированной) вектор намагниченности зафиксирован благодаря обменно-взаимодействию с прилегающим к нему антиферромагнитным FeMn-слоем. Поскольку изменение сопротивления СВМР элемента пропорционально косинусу угла между магнитными моментами (М) ферромагнитных свободной и фиксированной пленок в многослойной наноструктуре, следовательно, для эффективной работы прибора необходимо обеспечить отклонение М свободной пленки на 90° относительно оси легкого намагничивания (ОЛН) фиксированной пленки. Выполнение этого условия позволяет сформировать ВЭХ с максимальной крутизной преобразования и линейностью рабочего диапазона по магнитному полю. Для этого необходимо воздействие на данную наноструктуру внешним магнитным полем, при-

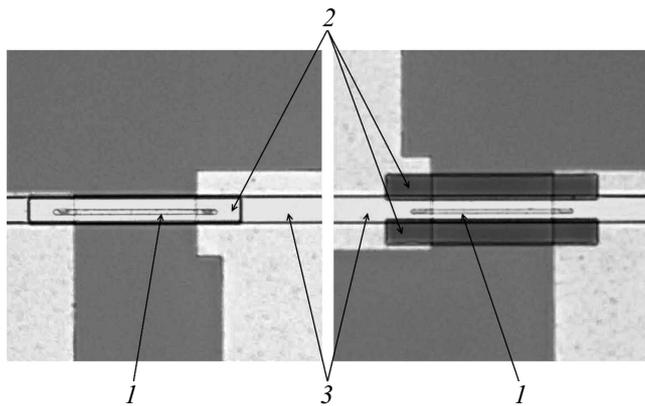


Рис. 1. Топологический фрагмент тестового элемента гальванической развязки: 1 — СВМР элемент, 2 — микромагниты, 3 — планарный проводник.

водящим к отклонению \mathbf{M} свободной ферромагнитной пленки. В качестве источника магнитного поля могут быть использованы микромагниты из магнитотвердых материалов (например, CoNi и т.п.) [9].

Фрагмент топологии конструкции тестового элемента ГР с микромагнитами и СВМР элементами, объединенными алюминиевым проводником в мостовую схему, представлен на рис. 1. Входной сигнал поступает в планарный проводник, расположенный над СВМР полосками и парой микромагнитов. Другая пара микромагнитов обеспечивает противоположное направление магнитного поля так, что в мостовой схеме СВМР полоски, расположенные в двух его диагоналях, находятся под влиянием противоположно направленных магнитных полей, обеспечивающих разворот \mathbf{M} свободной ферромагнитной пленки. Таким образом, в зависимости от направления вектора магнитной индукции на выходе данного СВМР преобразователя сигнал будет возрастать или уменьшаться, что соответствует нечетной характеристике преобразования.

СВМР Ta-FeNiCo-CoFe-Cu-CoFe-FeNiCo-FeMn-Ta наноструктура была сформирована с использованием установки магнетронного напыления на окисленных кремниевых пластинах диаметром 100 мм. На рис. 2, *a* приведена зависимость изменения сопротивления СВМР наноструктуры $\Delta R/R\%(H)$, измеренная на зондовой установке в переменном магнитном поле, направленном вдоль ОЛН ферромагнитных пленок на основе сплава FeNiCo. Петля перемагничивания с небольшой коэрцитивной силой H_c величиной до 6–8 Ое принадлежит свободной FeNiCo-пленке. Сдвинутая по магнитному полю на величину до 250 Ое петля гистерезиса с H_c , увеличенной свыше 10 Ое, принадлежит фиксированной FeNiCo-пленке.

Создание микромагнитов производилось на основе магнитотвердого материала CoNi с использованием установки электронно-лучевого испарения материала в вакууме [8]. Подслой титана использовался для улучше-

ния адгезии магнитотвердой пленки CoNi к поверхности диэлектрика на кремниевой пластине. На рис. 2, *b*

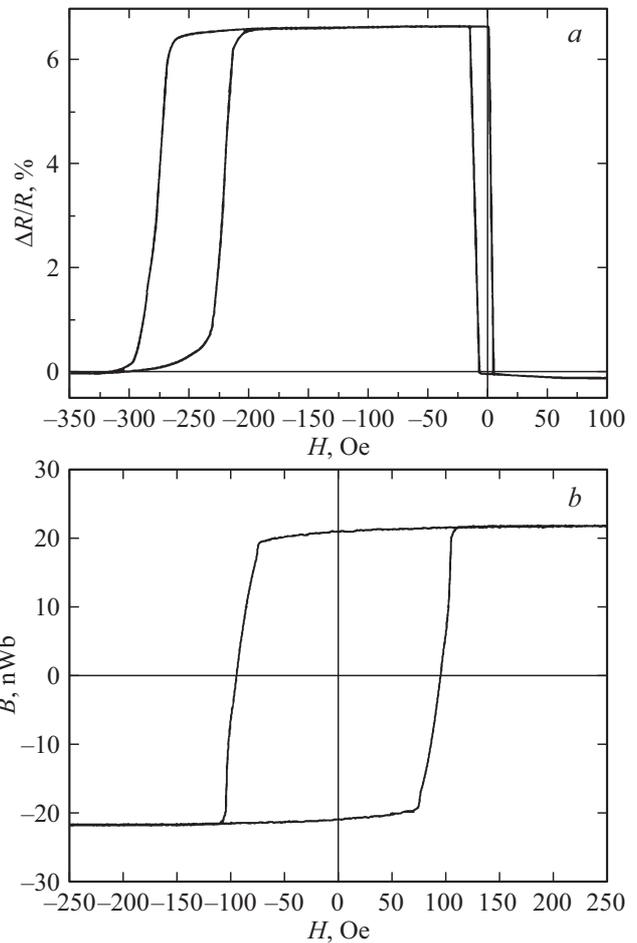


Рис. 2. *a* — изменение сопротивления СВМР наноструктуры в магнитном поле напряженностью до 350 Ое. *b* — петля гистерезиса магнитотвердой пленки в структуре Ti-CoNi-Ti.

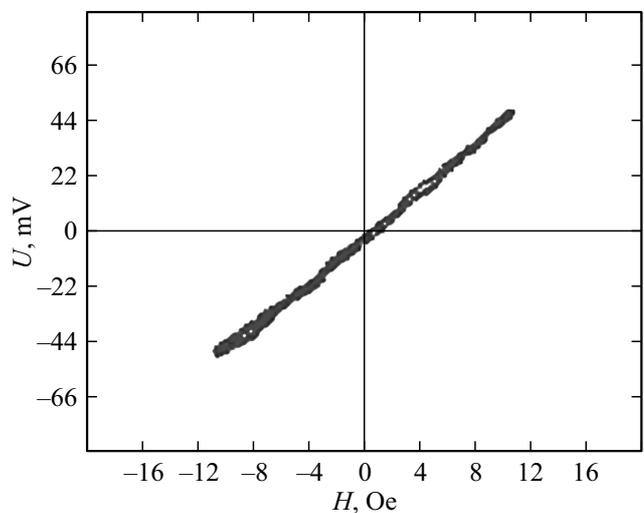


Рис. 3. ВЭХ тестового элемента на основе СВМР наноструктуры и микромагнитов.

приведена петля гистерезиса структуры Ti–CoNi–Ti на основе магнитотвердой пленки с достаточно хорошей степенью прямоугольности и коэрцитивной силой на уровне 95 Ое.

В результате совмещения технологических процессов создания СВМР наноэлементов и микромагнитов на одном кристалле был получен тестовый элемент ГР, топология которого представлена на рис. 1. Конструкция тестового элемента была спроектирована таким образом, чтобы намагничивание микромагнитов было поперек ОЛН ферромагнитных пленок СВМР полосок.

На рис. 3 приведена нечетная ВЭХ тестового элемента ГР на основе СВМР наноструктур [10]. Исследования проводились при протекании через СВМР мостовую схему тока 2 мА в переменном магнитном поле с частотой 50 Hz и величиной 10 Ое. Тестовый элемент ГР имеет нечетный линейный вид практически без гистерезиса. С увеличением напряженности магнитного поля ВЭХ тестового элемента гальванической развязки становится нелинейной и появляется гистерезис.

Таким образом, полученные результаты исследования СВМР наноструктур с МР эффектом (7–8%) и микромагнитами, сформированными на одном кристалле, могут быть использованы при разработке перспективных отечественных цифровых ГР и высокочувствительных преобразователей магнитного поля.

Результаты, представленные в настоящей работе, получены при частичной финансовой поддержке Минобрнауки ГК № 14.427.12.0002 от 30.09.2013 г. и при использовании оборудования ЦКП „Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники „на базе НПК „Технологический центр“.

Список литературы

- [1] Jogschies L., Klaas D., Rittenger J., Taptimthong P. et al. // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 28665–28689.
- [2] Маргелов А. Магнеторезистивные датчики положения фирмы Honeywell // *Chipnews*. 2005. N 5. С. 52–56.
- [3] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.nve.com>
- [4] Nagasaka K. // *JMMM*. 2009. Vol. 321. P. 508–511.
- [5] Zhao W.S., Zhang Y., Devolder T., Klein J.O. et al. // *Microel. Reliab.* 2012. Vol. 52. P. 1848–1852.
- [6] Muluneh M., Issadore D. // *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2014. Vol. 66. P. 101–109.
- [7] Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Спиновые магнеторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электронинформ, 2005. 168 с.
- [8] Касаткин С.И., Муравьев А.М., Амеличев В.В., Поломошнов С.А., Решетников И.А. // *Датчики и системы*. 2011. № 8. С. 61–64.
- [9] Вагин Д.В., Амеличев В.В., Беляков П.А., Касаткин С.И., Костюк Д.В. // *Нано- и микросистемная техника*. 2013. № 4. С. 12–15.
- [10] Беляков П.А., Костюк Д.В., Абанин И.Е. и др. // *Датчики и системы*. 2015. № 4. С. 32–36.