

05;15

Самосовмещенные магниторезистивные структуры: новый подход к увеличению чувствительности

© Н.А. Дюжев¹, А.С. Юров¹, Р.Ю. Преображенский¹,
Н.С. Мазуркин¹, М.Ю. Чиненков^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва

² ООО „СПИНТЕК“, Москва

E-mail: cogtsum@gmail.com

Поступило в Редакцию 20 ноября 2015 г.

Предложен новый тип конструкции анизотропных магниторезистивных структур, в котором форма ферромагнитных элементов повторяет форму немагнитных проводящих шунтов. Численное моделирование, учитывающее неоднородное распределение намагниченности, показало, что самосовмещенные структуры демонстрируют значительное (~ 70%) увеличение чувствительности по сравнению с классическими barber-pole структурами.

В настоящее время наиболее распространенными типами магниторезистивных структур являются структуры на основе анизотропного магниторезистивного (AMR) эффекта, гигантского магниторезистивного (GMR) эффекта и туннельного магнитосопротивления (TMR). Хотя приборы на GMR- и TMR-магниторезисторах обладают большей величиной выходного сигнала (но в более сильных магнитных полях) [1], технология их изготовления значительно сложнее и дороже технологии изготовления AMR-структур. Это связано с необходимостью получения тонких (порядка 1 nm) диэлектрических слоев высокого качества. Именно простота и дешевизна технологии, а также чувствительность к слабым магнитным полям обеспечивают преобразователям на основе AMR-структур применение в сферах измерения магнитного поля Земли [2], бесконтактного измерения тока [3], определения положения и угла поворота элементов различных механических устройств [4], детектирования транспортных средств [5,6]. Различные гибридные конструкции, основанные на AMR-преобразователях, предлагаются к применению в космических аппаратах [7] и медицинских исследованиях [8,9].

Разработка современных микроприборов, в частности преобразователей на основе AMR-структур, требует увеличения их чувствительности, повышения термостабильности, миниатюризации [6,10]. Чувствительность AMR-структуры является основным параметром, определяющим возможность применения этих структур в тех или иных устройствах, и определяется величиной магниторезистивного эффекта и топологическими параметрами, такими как размеры пермаллоевой полоски [1,11]. Наиболее широко используемым в настоящее время является AMR-преобразователь в виде полоски магнитного материала, на которую нанесены под углом 45° к продольной оси тонкие полоски проводящего материала — шунты (так называемая barber-pole структура) [12]. Передаточная характеристика этого преобразователя является нечетной с большим линейным участком, что теоретически объясняется тем, что линии тока между проводящими полосками направлены под углом 45° к оси магнитной полоски. Однако в реальных структурах это происходит не по всей длине проводящей полоски и на краях наблюдается сильный изгиб. Поскольку намагниченность в магнитной полоске имеет достаточно однородное пространственное распределение, в областях искривления линий тока происходит соответствующая разориентация векторов локальной намагниченности и электрического тока, приводящая к снижению чувствительности. Следовательно, основная задача повышения чувствительности состоит в уменьшении влияния этих областей.

Для решения этой задачи предложена AMR-структура, в которой магнитный слой лежит под наклонными проводниками и повторяет их форму. Такая структура может быть названа „самосовмещенной структурой“. Повторение магнитным слоем формы проводящей полоски приводит к совершенно отличному от однородного распределению намагниченности. В местах сильного искривления линий тока следует ожидать образования неоднородностей распределения намагниченности, которое повысит эффективность взаимодействия намагниченности с протекающим по магнитной полоске током. В результате возможно возрастание чувствительности к магнитному полю как отдельного участка между наклонными проводящими полосками, так и всей структуры в целом. Результаты математического моделирования подтверждают этот эффект.

Проводилось моделирование AMR-преобразователя, представляющего собой четыре анизотропных магниторезистора, объединенных по

Значения параметров, использованных при проведении микромагнитного моделирования

Параметр	Значение
Материал магнитного элемента	NiFe
Удельное сопротивление ферромагнетика	$34.97 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
Величина AMR-эффекта	2.3%
Ширина магнитного элемента	$10 \mu\text{m}$
Толщина магнитного элемента	$30 \mu\text{m}$
Магнитокристаллическая анизотропия	500 J/m^3
Константа обменного взаимодействия	$13 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$
Намагниченность насыщения	8 kA/m
Величина внешнего магнитного поля	3.2 kA/m
Материал шунтирующих элементов	Al
Ширина шунтирующих элементов	$6 \mu\text{m}$
Расстояние между шунтирующими элементами	$6 \mu\text{m}$

схеме моста Уитстона. Каждый магниторезистор — массив классических barber-pole [13] чувствительных элементов (рис. 1, *a*), имеющих длину $L = 200 \mu\text{m}$, расстояние между шунтами $d = 6 \mu\text{m}$ и ширину W , варьируемую в диапазоне от 10 до $40 \mu\text{m}$. Величина выступов элементов немагнитного проводящего слоя h также варьируется от 0 до $6 \mu\text{m}$. Материал магнитных элементов структуры — пленка пермаллоя 80% Ni 20% Fe толщиной 30 nm , материал проводящего слоя — алюминиевая пленка толщиной $0.6 \mu\text{m}$.

Для расчета распределения намагниченности была использована микромагнитная модель [14], основанная на уравнении Ландау–Лифшица–Гильберта. Эта модель уже применялась для расчета AMR-эффекта в малоразмерных структурах [15–17], но не для расчета полномасштабных AMR-элементов, что обусловлено ограничениями временной сложности модели. Сегодня такие ограничения можно обойти, используя современное программное обеспечение для вычислений на графических процессорах (GPU). Микромагнитное моделирование выполнялось в открытом программном пакете MuMax3 [18], расчет электрического сопротивления производился с использованием пакета COMSOL Multiphysics® [19]. Параметры, использованные при моделировании, приведены в таблице.

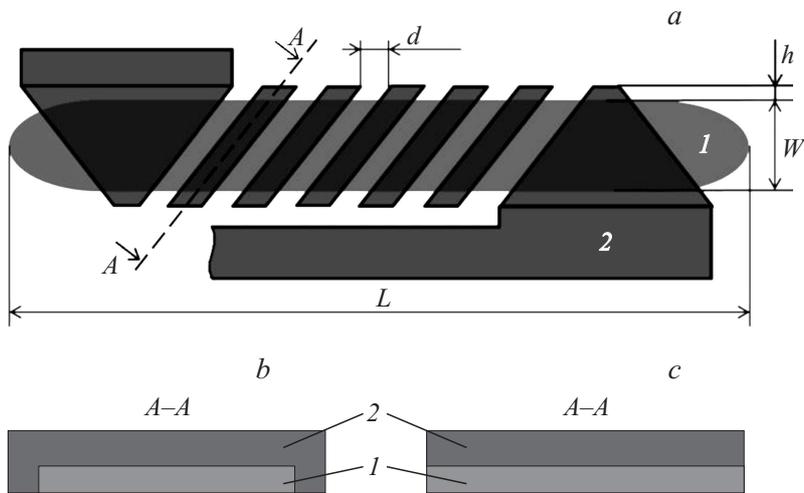


Рис. 1. *a* — схема магниточувствительного элемента: 1 — пермаллой, 2 — алюминий. *b–c* — сравнение топологии слоев классического (*b*) и самосовмещенного (*c*) магниточувствительного элемента. 1 — пермаллой, 2 — алюминий.

Полученные распределения намагниченности в структурах с самосовмещенной (рис. 2, *a*) и классической (рис. 2, *b*) геометриями подтверждают предположение о возникновении в самосовмещенных структурах периодических неоднородностей распределения намагниченности. Для оценки влияния этих неоднородностей на чувствительность структур был проведен соответствующий анализ, результаты которого представлены на рис. 2, *c* в виде выходных характеристик структур с различным значением параметра h . Значение $h = 0 \mu\text{m}$ соответствует структуре с традиционной геометрией, форма соответствующей кривой согласуется с экспериментальными данными [10] для традиционных AMR-преобразователей. Можно видеть, что при увеличении выступа h от 0 до $3 \mu\text{m}$ наблюдается возрастание чувствительности структуры на $\sim 70\%$. Однако при дальнейшем увеличении h от 3 до $6 \mu\text{m}$ возникает негативный эффект — смещение точки прохождения характеристикой нуля при отсутствии дальнейшего увеличения чувствительности. Таким образом, оптимальной конфигурацией самосовмещенной структуры является конфигурация, соответствующая значению параметра $h = 3 \mu\text{m}$.

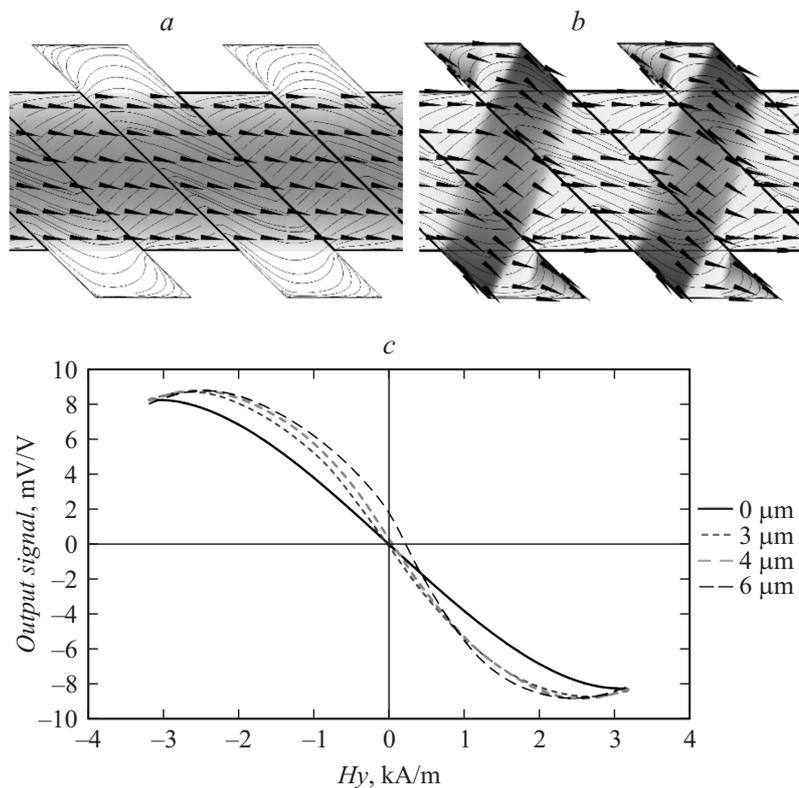


Рис. 2. Распределение намагниченности и линий тока в традиционной (*a*) и самосовмещенной (*b*) структурах. Светлые области соответствуют большей величине X -компоненты намагниченности, темные области — меньшей. Векторы локальной намагниченности обозначены стрелками. Сплошные линии представляют линии тока. *c* — теоретические кривые зависимости выходного сигнала магниторезистивного преобразователя от величины управляющего магнитного поля для структур с различной величиной выступов.

Таким образом, продемонстрирована возможность значительного увеличения чувствительности AMR-преобразователей при использовании самосовмещенных структур. Микромагнитное моделирование показало возрастание расчетной чувствительности самосовмещенных

структур по сравнению с классическими магниторезисторами на 70% в случае оптимального выбора параметра h .

Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант № 14.578.21.0007 (RFMEFI57814X0007), с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Микросистемная техника и электронная компонентная база“ МИЭТ.

Список литературы

- [1] *Tumanski S.* Thin film magnetoresistive sensors. CRC Press, 2001. P. 83.
- [2] *Abidin Z., Faizal A., Jusoh M.H., Junid A., Mutalib S.A.* // Appl. Mech. Mater. Trans. Tech. Publications. 2015. V. 785. P. 714–718.
- [3] *Zhenhong Z., Syuji O., Osamu A., Hideto K.* // IEEE Trans. Magnet. 2015. V. 51. N 1. P. 1–5.
- [4] *Witschnig H., Morici A., Schaffer B., Zimmer J.* // Solid-State Sens. Actuat. Microsyst. 2013. Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference. IEEE, 2013. C. 2257–2260.
- [5] *Yang B., Lei Y.* // IEEE Sensors J. 2015. V. 15. N 2. P. 1132–1138.
- [6] *Беспалов В.А., Дюжев Н.А., Юров А.С., Чиненков М.Ю., Мазуркин Н.С.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 11. С. 48–54.
- [7] *Brown P., Whiteside B.J., Beek T.J.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. T. 85. N 12. C. 125–117.
- [8] *Paixao F.C., Cora L.A., Americo M.F.* et al. // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2012. V. 59. N 10. P. 2737–2743.
- [9] *Ichkitidze L.P., Bazaev N.A., Telyshev D.V., Preobrazhensky R.Y., Gavru-shina M.L.* // Magnetic Field Sensors in Medical Diagnostics // Biomedical Engineering. 2015. V. 48. N 6. P. 305–309.
- [10] *Дюжев Н.А., Мазуркин Н.С., Поздняков В.С., Чиненков М.Ю., Юров А.С.* // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 2. С. 113–119.
- [11] *Горячев А.В., Дюжев Н.А., Медников А.М., Попков А.Ф., Пудонин Ф.А., Чиненков М.Ю.* // Изв. вузов. Электроника. 2009. № 1. С. 33–39.
- [12] *Wakatsuki N., Kurashima S., Shimizu N., Endoh M., Tanaka A.* Barber-pole magnetoresistive magnetic field sensor: Пат. 5055786 США. 1991.
- [13] *Guo Y., Gorman G.* Highly sensitive AMR bridge for gear tooth sensor: Пат. 7592803 США. 2009.
- [14] *Miltat J., Albuquerque G., Thiaville A.* // Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures I. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 1–33.
- [15] *Koehler T.R., Yang B., Chen W., Fredkin D.R.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 10. C. 6504–6506.
- [16] *Nam C.* // J. Nanosci. Nanotechnol. 2015. V. 15. N 10. P. 7620–7623.

- [17] *Bolte M.A.* Micromagnetic Simulation and X-ray Microscopy of Field- and Current-Induced Magnetization Dynamics in Ferromagnetic Nanostructures // Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Departments Physik der Universität Hamburg. Hamburg, 2007.
[e-RES]<http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2008/3833/pdf/DissMarkus200709092008.pdf>
- [18] *Vansteenkiste A., Van de Wiele B.* // J. Magn. Magn. Mater. 2011. V. 323. N 21. P. 2585–2591.
- [19] <http://www.comsol.com/>