

УДК 53.087.92621.318.1

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ СПИН-ТУННЕЛЬНОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА

© 2020 г. Д. В. Васильев<sup>а, \*</sup>, Д. В. Костюк<sup>а</sup>, Е. П. Орлов<sup>а</sup>, Д. А. Жуков<sup>а</sup>,  
Ю. В. Казаков<sup>а</sup>, В. В. Амеличев<sup>а</sup>, П. А. Беляков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Научно-производственный комплекс “Технологический центр”, площадь Шокина, 1, стр. 7, Зеленоград, 124498 Россия

\*E-mail: tc@tcen.ru

\*\*E-mail: D.Vasilyev@tcen.ru

Поступила в редакцию 23.07.2019 г.

После доработки 25.07.2019 г.

Принята к публикации 25.07.2019 г.

Рассмотрены современные конструкции преобразователей магнитного поля на основе наноструктур со спин-туннельным магниторезистивным эффектом и основные области их применения. Представлены результаты экспериментального исследования двух конструктивных вариантов преобразователей магнитного поля с четной и нечетной выходной характеристикой. Чувствительность изготовленного макета ПМП на основе СТМР эффекта с четной выходной характеристикой составила 0.54 мВ/(В · Э) в диапазоне магнитного поля с напряженностью от 0 до 40 Э. Представлены результаты преобразования зависимости  $R(H)$  наноструктуры с СТМР эффектом путем термомагнитной обработки для снижения гистерезиса и повышения линейности в рабочем диапазоне магнитного поля. Чувствительность изготовленного макета ПМП на основе СТМР эффекта с нечетной выходной характеристикой составила 5.4 мВ/(В · Э) в диапазоне магнитного поля с напряженностью  $\pm 1$  Э. В заключении изложены перспективные направления развития конструкций ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом.

**Ключевые слова:** гистерезис, мостовая схема Уитстона, преобразователи магнитного поля, спин-туннельный магниторезистивный эффект

DOI: 10.31857/S0544126920010135

### ВВЕДЕНИЕ

ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом превосходят ПМП на основе наноструктур с анизотропным магниторезистивным (АМР) и спин-вентильным магниторезистивным (СВМР) эффектами по чувствительности и номиналу сопротивления мостовой схемы, требуют более низкого напряжения питания. Данные преимущества наноструктур с СТМР эффектом определяют основные области применения их в составе ПМП, МРАМ, телеметрических приборов и биомедицинских устройств. Ведущими фирмами по разработке и производству ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом являются: Micro

Magnetics (США), Multi Dimension Technology (КНР), Crouc Technology (США). Номенклатура продукции данных фирм включает в себя ПМП, работающие на основе мостовой и полумостовой схемы Уитстона, с одной, двумя или тремя осями чувствительности.

Изделие STJ-001 в виде дискретного резистора чувствителен к магнитному полю напряженностью 5 мкЭ, нелинейность выходной характеристики не превышает 2% на диапазоне от минус 1 до 1 Э, спектральная плотность шумов в области низких частот (100 Гц) составляет 0.5 и 50 мкЭ/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 10 кГц [1]. Основными применениями STJ-001 являются сканирующая магнитная микроскопия, обнаружение магнитных частиц и датчики тока.

Спектральная плотность шумов ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом, реализованных по полумостовой или полной мостовой схеме (STJ-340, STJ-440), на порядок меньше – 30 мкЭ/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 10 Гц и 1 мкЭ/Гц<sup>0.5</sup> на частоте 1 кГц [1], что обеспечивает их применение в

Сокращения: АМР – анизотропный магниторезистивный; ОЛН – ось легкой намагниченности; ПМП – преобразователи магнитного поля; ПМП-СТМР – преобразователи магнитного поля на основе спин-туннельных магниторезистивных наноструктур; САФ – синтетический антиферромагнетик; СВМР – спин-вентильный магниторезистивный; СТМР – спин-туннельный магниторезистивный; СТП – спин-туннельный переход; МРАМ – magnetoresistive random-access memory.

системах контроля малых магнитных полей, электронных компасах, навигационных системах и медицинских устройствах. Кроме того, система сканирования Micro Magnetics CircuitScan 1000 (CS1000) на основе наноструктур с СТМР эффектом позволяет анализировать карту токов, протекающих на каждом уровне металлизации интегральной микросхемы, вплоть до единиц микроампер, не разрушая изделие, что наделяет ее неоспоримым преимуществом перед другими диагностическими приборами [1].

Наноструктуры на основе СТМР эффекта признаны наиболее подходящими чувствительными элементами биомолекулярного распознавания и обнаружения ДНК в составе биосенсорных устройств [2]. Обладая высокой чувствительностью к магнитным частицам и совместимостью с технологией “лаборатория на кристалле”, наноструктуры на основе СТМР эффекта успешно применимы в других биоприложениях [3–5].

Массив наноструктур на основе СТМР эффекта в совокупности с технологией использования магнитных наночастиц оксида железа может применяться для обнаружения антигенов р24, которые являются биомаркерами ВИЧ инфекции [2]. В работе [6] продемонстрирована возможность обнаружения альфа-фетопротеина, связанного с магнитными наночастицами, который является важнейшим биомаркером раковой опухоли печени.

Таким образом, из представленных выше применений видно неоспоримое преимущество ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом перед магниторезистивными преобразователями на основе АМР и СВМР эффектов. Высокое соотношение сигнал/шум, малый ток потребления и малые размеры чувствительных элементов позволяют расширить области применения наноструктур с СТМР эффектом как в составе новых устройств, так и в дискретных приборах с уникальными характеристиками.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Многослойная наноструктура, состоящая из свободного и фиксированного ферромагнитных слоев, разделенных пленкой диэлектрика толщиной в единицы нанометров, которая выступает в роли туннельного барьера, содержит спин-туннельный переход (СТП) [7, 8]. Под действием магнитного поля направление намагниченности свободного слоя меняется на параллельное или антипараллельное состояние относительно фиксированного слоя, что соответствует низкоомному или высокоомному состоянию, которое при отсутствии магнитного поля сохраняется. СТМР эффект определяется как:

$$\text{СТМР}(\%) = \frac{(R_{\text{AP}} - R_{\text{P}})}{R_{\text{P}}} \times 100, \quad (1)$$

где СТМР – спин-туннельный магниторезистивный эффект, %;  $R_{\text{AP}}$  – сопротивление, соответствующее антипараллельному состоянию свободного слоя относительно фиксированного,  $R_{\text{P}}$  – сопротивление при параллельной ориентации свободного слоя относительно фиксированного.

ПМП на основе наноструктур с СТМР эффектом (ПМП-СТМР) в зависимости от конструктивного исполнения могут иметь четную или нечетную выходную характеристику. В основе преобразователей с четной выходной характеристикой лежит полумостовая схема Уитстона (рис. 1). Два противоположных плеча мостовой схемы (резисторы  $R_1$  и  $R_4$ , рис. 1) состоят из СТП, ось легкой намагниченности (ОЛН) свободного слоя которых направлена перпендикулярно оси чувствительности преобразователя, другая диагональная пара (резисторы  $R_2$  и  $R_3$ , рис. 1) представляют собой постоянные резисторы с сопротивлением, равным сопротивлению плеча с СТП при отсутствии воздействия магнитного поля.

ПМП-СТМР с четной выходной характеристикой имеют ограниченную область применения, большую нелинейность и меньшую чувствительность к магнитному полю, чем ПМП-СТМР с нечетной выходной характеристикой.

Выходное напряжение мостовой схемы Уитстона определяется выражением (2):

$$U_{\text{вых}} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \times U_{\text{пит}}. \quad (2)$$

Для полной мостовой схемы преобразователя (рис. 2) сопротивления в противоположных плечах должны удовлетворять условиям:

$$R_1 = R_4 = R + \Delta R; \quad R_3 = R_2 = R - \Delta R,$$

после упрощения выражение (2) примет вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\Delta R}{R} \times U_{\text{пит}}. \quad (3)$$

Полная мостовая схема ПМП-СТМР обладает рядом преимуществ: высокая температурная стабильность, выходной сигнал у схемы значительно больше, чем у других конфигураций мостовой схемы Уитстона [9].

В НПК “Технологический центр” изготовлен и исследован макетный образец ПМП-СТМР с четной характеристикой. Два противоположных плеча схемы содержат по два СТП в каждом, ось легкой намагниченности СТМР наноструктур направлена перпендикулярно оси чувствительности преобразователя, типовая  $R(H)$  выходная характеристика переходов при воздействии магнит-

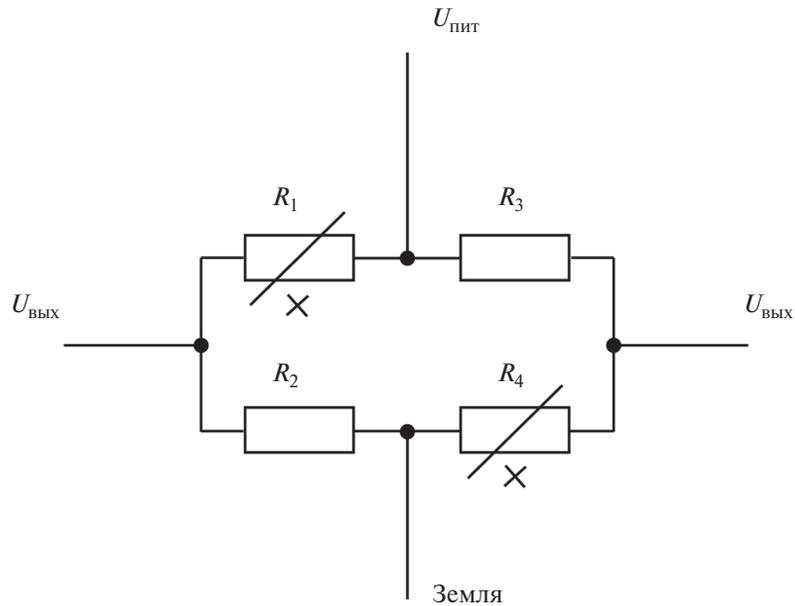


Рис. 1. Полумостовая схема Уитстона ПМП-СТМР.

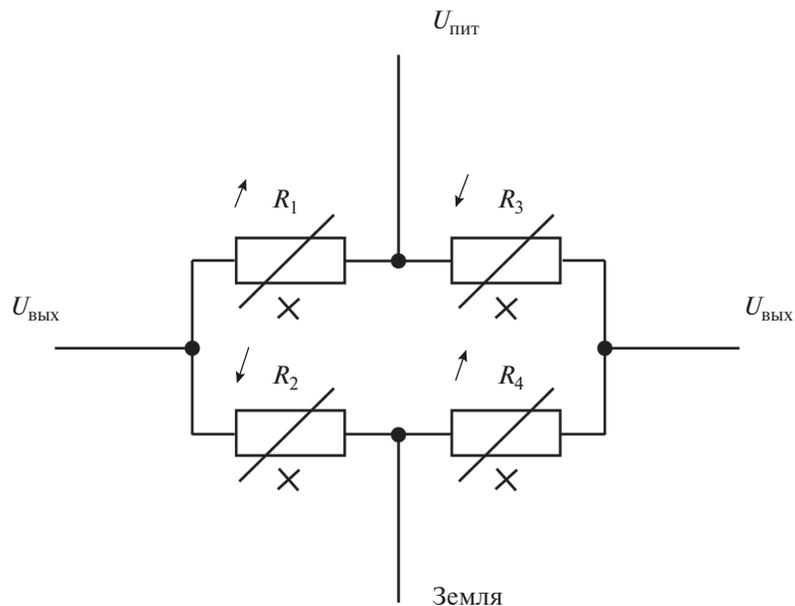


Рис. 2. Полная мостовая схема ПМП-СТМР.

ного поля перпендикулярно ОЛН представлена на рис. 3. Два балластных плеча представлены постоянными резисторами сопротивлением 390 кОм.

Экспериментальное изменение выходного сигнала при воздействии магнитного поля в диапазоне от 0 до 40 Э составило 0.86 мВ, напряжение питания полумостовой схемы: 0.04 В.

$$S_{\text{эксп}} = \frac{0.86}{40} = 0.0215 \frac{\text{мВ}}{\text{Э}} = 0.538 \frac{\text{мВ}}{\text{В} \cdot \text{Э}}.$$

Для изготовления ПМП с нечетной выходной характеристикой на основе мостовой схемы Уитстона изменение сопротивления плеч при воздействии магнитного поля должно носить линейный характер в области нуля. Линеаризация  $R(H)$  характеристики СТП в области нуля достигается при неколлинеарной конфигурации магнитной анизотропии ОЛН и оси однонаправленной анизотропии и при условии  $H_J/H_A > 1$ , где  $H_J$  – поле

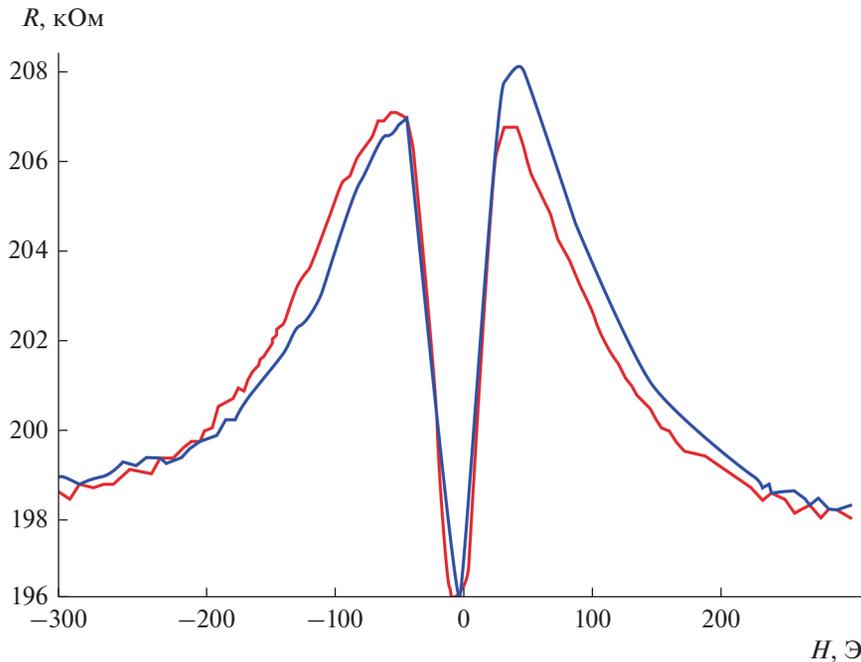


Рис. 3.  $R(H)$  характеристика СТП при воздействии внешнего магнитного поля перпендикулярно ОЛН.

межслойного взаимодействия,  $H_A$  – поле анизотропии свободного слоя [10]. Неколлинеарная конфигурация магнитной анизотропии была сформирована посредством термомагнитной обработки, гистерезис свободного слоя уменьшается при отклонении магнитного поля от оси легкого намагничивания, полученная  $R(H)$  зависимость СТП представлена на рис. 4.

Был изготовлен макетный образец ПМП на основе полной мостовой схемы Уитстона (рис. 2): в каждом плече по одному СТП, причем ОЛН в одной диагональной паре резисторов отличается на  $180^\circ$  от другой диагональной пары (рис. 4).

Изменение выходного сигнала преобразователя при воздействии магнитного поля в диапазоне от минус 40 до 40 Э составило 3.42 мВ, напряжение питания схемы: 0.1 В, рис. 5 иллюстрирует внешний вид выходной характеристики.

Чувствительность ПМП-СТМР к магнитному полю составляет:

$$S_{\text{эксп}} = \frac{51.7 - 48.28}{80} = 0.0428 \frac{\text{мВ}}{\text{Э}} = 0.428 \frac{\text{мВ}}{\text{В} \cdot \text{Э}}.$$

Повышение чувствительности ПМП-СТМР согласно выражению (3) обеспечивается увеличением напряжения питания и величины СТМР эффекта; с учетом данных требований была усовершенствована конструкция макетного образца.

Получение минимального гистерезиса при переманчивании свободного слоя СТП возможно при воздействии постоянных магнитов на много-

слойную наноструктуру, которые отклоняют направление намагниченности свободного слоя на  $90^\circ$  относительно оси фиксации многослойной наноструктуры. Рис. 6 иллюстрирует влияние постоянного магнита на зависимость сопротивления СТП от внешнего магнитного поля. В результате величина магниторезистивного эффекта снизилась незначительно, а гистерезис свободного слоя составил единицы эрстед.

Повышение напряжения питания ПМП-СТМР достигнуто путем увеличения количества СТП в каждом плече, напряжение питания новой конструкции преобразователя составило 5 В, выходная характеристика усовершенствованного макета преобразователя представлена на рис. 7.

Таким образом, чувствительность макетного образца ПМП-СТМР к магнитному полю составила  $5.43 \text{ мВ}/(\text{В} \cdot \text{Э})$ , что на порядок выше, чем у макетного образца ПМП-СТМР с четной характеристикой, при этом, гистерезис и нелинейность преобразования не превышают 3%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что конструкция макетного образца ПМП-СТМР с нечетной характеристикой на основе полной мостовой схемы обладает рядом достоинств: высокая чувствительность к магнитному полю, малый ток потребления и низкая нелинейность. Примененный подход к линеаризации  $R(H)$  характеристики СТП незначительно снизил вели-

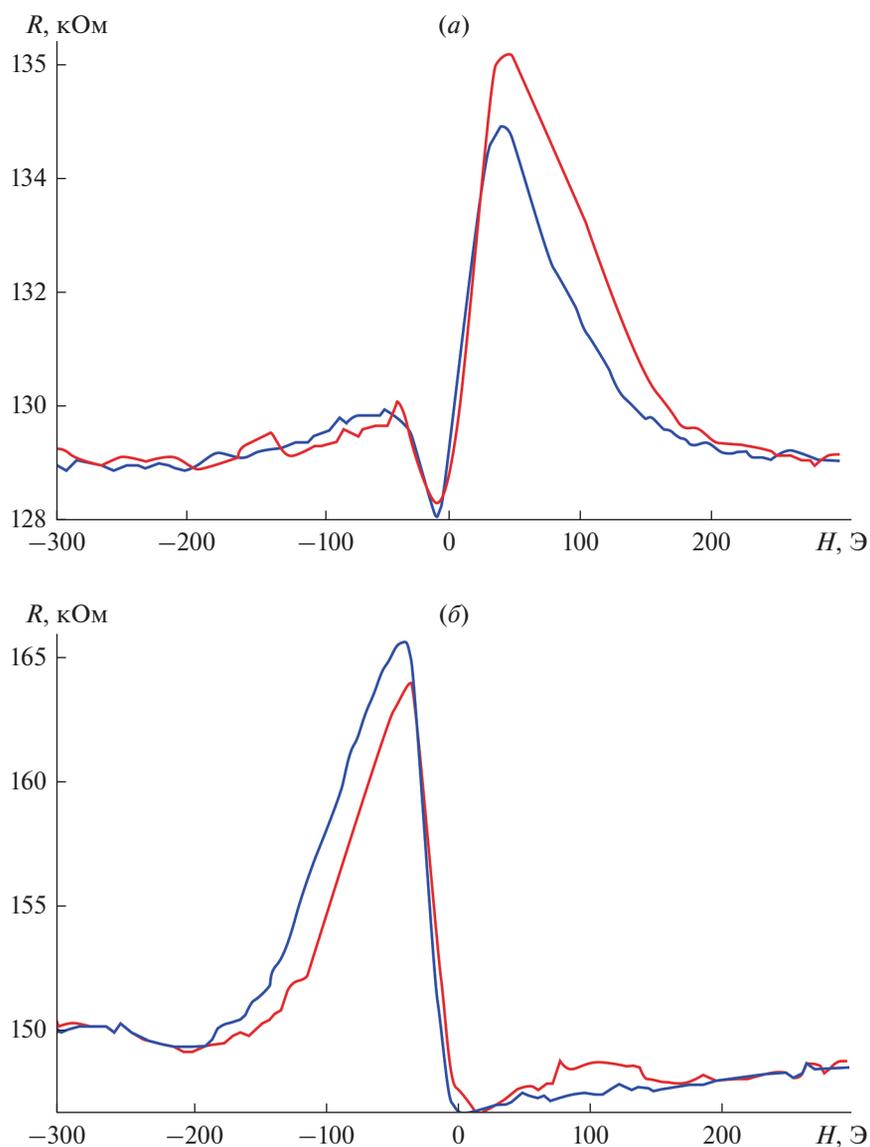


Рис. 4.  $R(H)$  характеристика СТП с положительным (а) и отрицательным (б) наклоном.

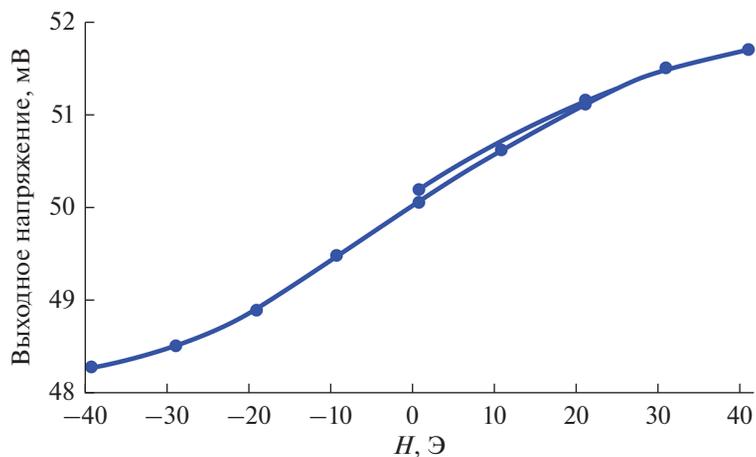


Рис. 5. Выходная характеристика ПМП-СТМР при напряжении питания 0.1 В.

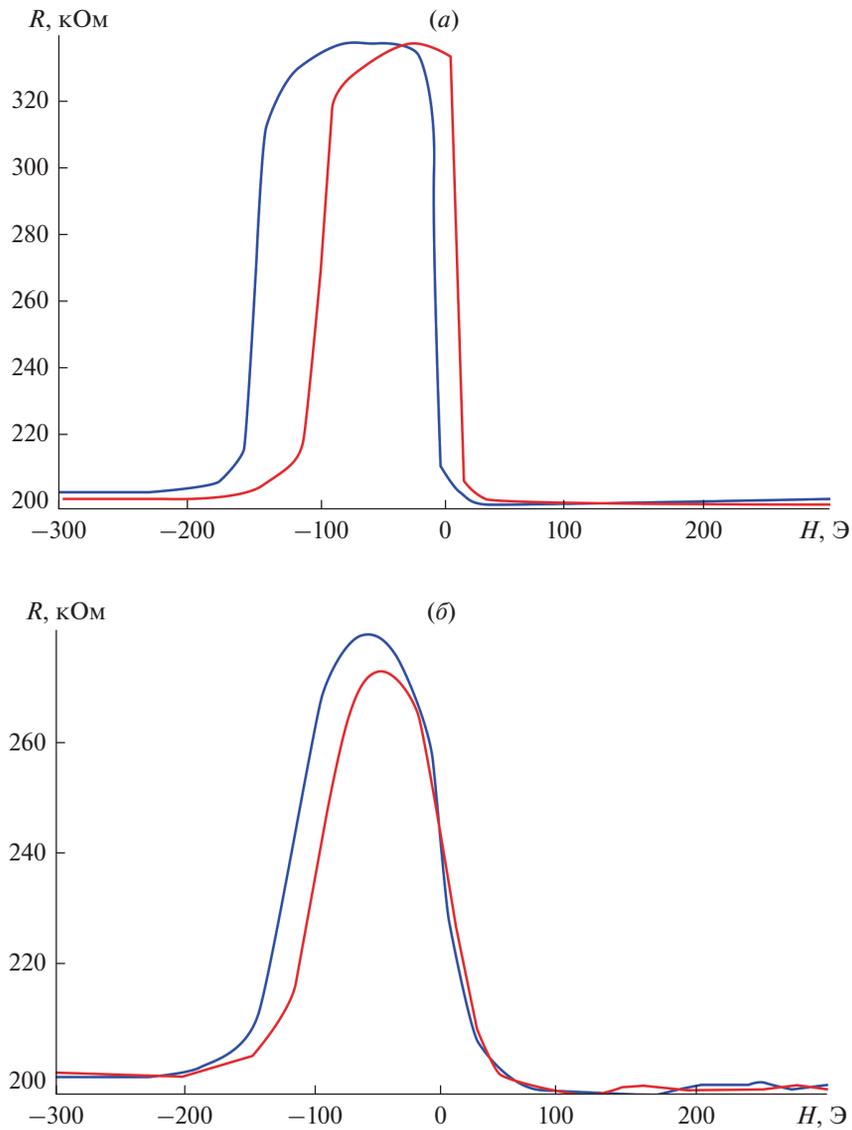


Рис. 6.  $R(H)$  характеристика СТП до (а) и после (б) монтажа постоянного магнита.

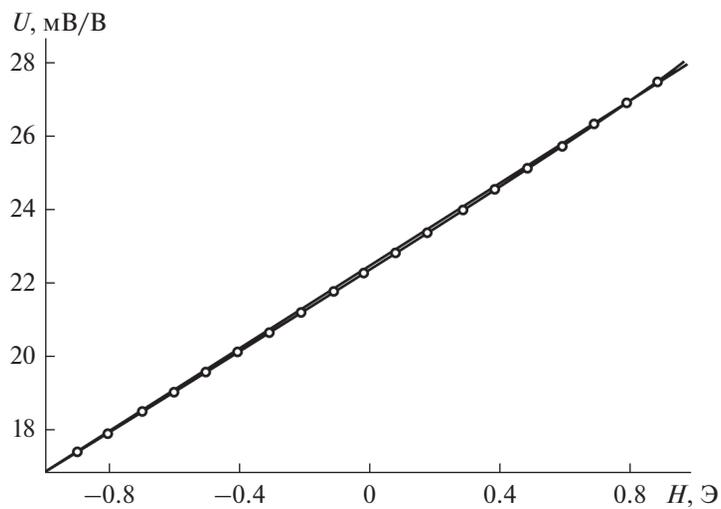


Рис. 7. Вольт-эрседная характеристика макетного образца в диапазоне магнитного поля  $\pm 1$  Э при напряжении питания мостовой схемы 5 В.

чину СТМР эффекта и уменьшил гистерезис свободного слоя до единиц эрстед. Увеличение числа СТП в каждом плече мостовой схемы повысило напряжение питания и чувствительность ПМП.

Перспективным направлением при разработке конструкций ПМП-СТМР является применение спин-туннельных наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком (САФ). СТП на основе САФ потенциально обладают более высоким СТМР эффектом [11], магнитный отжиг наноструктур позволяет снизить гистерезис свободного слоя до одного эрстеда.

Результаты исследований новых СТП смогут найти дальнейшее применение в разработке перспективных отечественных ПМП, ячеек энерго-независимой магниторезистивной памяти с произвольной выборкой.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт компании Micromagnetics. Режим доступа: [http://micromagnetics.com/products\\_mtj\\_f\\_s.html](http://micromagnetics.com/products_mtj_f_s.html), свободный. (Дата обращения: 01.04.2019).
2. Li L., Mak K.Y., Zhou Y., Wang W.W., Pong P.W.T. Detection of HIV-1 antigen based on magnetic tunnel junction sensor and magnetic nanoparticles. 2016. 12 p. // [https://www.researchgate.net/publication/301817084\\_Detection\\_of\\_HIV-1\\_antigen\\_based\\_on\\_magnetic\\_tunnel\\_junction\\_sensor\\_and\\_magnetic\\_nanoparticles](https://www.researchgate.net/publication/301817084_Detection_of_HIV-1_antigen_based_on_magnetic_tunnel_junction_sensor_and_magnetic_nanoparticles)
3. Li G., Sun S., Wilson R., White R., Pourmand N., Wang S. Spin valves sensors for ultrasensitive detection of superparamagnetic nanoparticles for biological applications // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006. V. 126. P. 98–106.
4. Shen W., Schrag B., Carter M., Xie J., Xu C., Sun S. Detection of DNA labeled with magnetic nanoparticles using MgO-based magnetic tunnel junction sensors // *J. Applied Physics*. 2008. V. 103. P. 07A306.
5. Martins V.C., Germano J., Cardoso F.A., Loureiro J., Cardoso S., Sousa L. Challenges and trends in the development of a magnetoresistive biochip portable platform // *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. V. 322. P. 1655.
6. Lei Z.Q., Li L., Li G.J., Leung C.W., Shi J. Liver cancer immunoassay with magnetic nanoparticles and MgO-based magnetic tunnel junction sensors // *J. Applied Physics*. 2012. V. 111. P. 07E505.
7. Амеличев В.В., Беляков П.А., Васильев Д.В., Жуков Д.А., Казаков Ю.В., Костюк Д.В., Орлов Е.П., Касаткин С.И., Крикунов А.И. Спин-туннельные магниторезистивные элементы на основе многослойных наноструктур // *Журн. технической физики*. 2017. Т. 87. № 8. С. 1268–1270.
8. Абанин И.Е., Амеличев В.В., Беляков П.А., Васильев Д.В., Казаков Ю.В., Костюк Д.В., Крикунов А.И., Орлов Е.П. Исследование спин-туннельных магниторезистивных наноструктур с барьерным слоем из оксида магния (MgO), полученных масочным методом // *Нано- и микросистемная техника*. 2015. № 4. С. 10–14.
9. Ekelof S. The genesis of the Wheatstone bridge // *Engineering Science and Education J.* 2001. V. 10. № 1. P. 37–40.
10. Наумова Л.И., Миляев М.А., Чернышова Т.А., Прогалядо В.В., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Безгистерезисные спиновые клапаны с неколлинеарной конфигурацией магнитной анизотропии // *Физика твердого тела*. 2014. Т. 56. № 6. С. 1082–1087.
11. Lee Y.M., Hayakawa J., Ikeda S., Matsukura F., Ohno H. Giant tunnel magnetoresistance and high annealing stability in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions with synthetic pinned layer // *Applied Physics Letters*. 2006. V. 89. P. 042506.