



УДК 681.586.7, 53.087.92

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.506.508

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ С ВЫСОКОЙ КРУТИЗНОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

THIN-FILM MAGNETORESISTIVE MICROSYSTEMS WITH HIGH STEEPNESS OF TRANSFORMATION

АМЕЛИЧЕВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

avv@tcen.ru

AMELICHEV VLADIMIR V.

avv@tcen.ru

КОСТЮК ДМИТРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

KOSTYUK DMITRIY V.

ВАСИЛЬЕВ ДМИТРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

VASIL'EV DMITRIY V.

КАЗАКОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

KAZAKOV YURIY V.

ЖУКОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

ZHUKOV DMITRIY A.

ОРЛОВ ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ

ORLOV EVGENIY P.

БЕЛЯКОВ ПЕТР АЛЕКСЕЕВИЧ

BELYAKOV PETR A.

НПК «Технологический центр»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1,
стр. 7, комната 7237
Тел.: +7 (499) 720-87-79

“Technological Centre” SMC
Room 7237, bld. 7, 1 Shokin Square,
Zelenograd, Moscow, 124498, Russia
Tel.: +7 (499) 720-87-79

Представлены результаты разработки тонкопленочных магниторезистивных микросистем с четной и нечетной передаточной характеристикой. Показаны перспективы создания высокочувствительных микросистем преобразования магнитного поля и энергонезависимой памяти с произвольной выборкой на основе спин-туннельного магниторезистивного эффекта. *Ключевые слова:* крутизна преобразования; магниторезистивный эффект; магнитное поле; микросистема.

The paper presents the results of the development of thin-film magnetoresistive microsystems with even and odd transfer characteristics. Besides, it considers the prospects of creating highly sensitive microsystems for converting the magnetic field and nonvolatile memory with arbitrary sampling based on the spin-tunnel magnetoresistive effect.

Keywords: steepness of transformation; magnetoresistive effect; magnetic field; microsystem.

Эффективность ряда магнитометрических приборов и устройств зависит от чувствительности применяемых преобразователей магнитного поля (ПМП). Отношение сигнал/шум (С/Ш) определяет пороговую чувствительность ПМП и, как правило, является приоритетным параметром при выборе тех или иных электронных компонентов входного каскада магнитометрических приборов. Не менее важными параметрами, влияющими на эффективность магнитометрических приборов и устройств, являются энергопотребление и габариты ПМП. Поэтому одной из актуальных задач на данный момент является создание высокочувствительных и малогабаритных ПМП, обладающих низким энергопотреблением.

Магниторезистивные преобразователи магнитного поля (МР ПМП) являются одними из наиболее востребованных компонентов при разработке современных магнитометрических приборов и устройств. Стоит отметить, что современные МР ПМП востребованы в различных областях приборостроения: средства измерений физических величин, средства контроля параметров процессов, системы обработки и представления информации, компоненты автоматических и автоматизированных систем управления и многое другое. Причины столь высокой

востребованности исходят от уникальных характеристик МР ПМП, среди которых высокая чувствительность к магнитному полю, большой динамический диапазон, быстродействие, высокая стойкость к внешним воздействующим факторам.

МР ПМП могут быть реализованы на тонкопленочных магниторезистивных наноструктурах (ТМРНС) как с анизотропным магниторезистивным (АМР) эффектом, так и с гигантским магниторезистивным (ГМР) эффектом. Передаточная выходная характеристика МР ПМП может быть четной или нечетной, а применение — как прямым, для преобразования магнитного поля, так и косвенным, для преобразования тока, перемещения или угла поворота.

Номенклатура МР ПМП у различных производителей отличается значительно не только по основным параметрам, но и по применяемым эффектам: например, у фирмы Honeywell (США) МР ПМП на АМР-эффекте представлены достаточно широко, как с одной осью чувствительности, так и с двумя, и с тремя осями чувствительности. Продукция фирмы NVE представлена МР ПМП на ГМР-эффекте в многослойных периодических наноструктурах с прослойками меди. Количество известных фирм в данном секторе рынка превышает полтора



десятка и регулярно увеличивается, причем новые игроки данного сектора выступают как с новыми продуктами, так и с новыми идеями их применения. Ожидается, что к 2025 году объем продаж магнитометров на рынке достигнет 13,66 млрд долл. США [1].

Отечественные производители МР ПМП представлены в данном секторе рынка не так широко, как зарубежные с номенклатурой продукции, реализованной в основном на АМР-эффекте. Стоимость единицы отечественных МР ПМП, как правило, более высокая из-за ряда технологических особенностей выпуска данной продукции. Более высокая цена отечественной продукции может быть обоснована также и более высокими значениями основных параметров МР ПМП, их надежностью и стойкостью к внешним воздействующим факторам.

К основным параметрам МР ПМП, как правило, относят чувствительность, сопротивление мостовой схемы и спектральную плотность шума. У разных производителей МР ПМП чувствительность и крутизна преобразования могут обозначать один и тот же параметр, выражаемый в отношении уровня выходного сигнала к единичному значению величины магнитного поля при напряжении питания один вольт. Пороговая чувствительность к магнитному полю зависит от отношения С/Ш и характеризует нижнюю границу динамического диапазона. Так, например, для анизотропных тонкопленочных МР ПМП нижняя граница динамического диапазона составляет величину на уровне 10^{-8} – 10^{-9} Тл [2]. Многие потребители акцентируют внимание именно на значении пороговой чувствительности, по обыкновению называя данный параметр просто чувствительностью.

Повышение отношения С/Ш может быть реализовано путем комбинации ряда конструктивно-технологических решений. Одним из наиболее эффективных способов повышения отношения С/Ш является применение в конструкции МР ПМП концентраторов магнитного поля (КМП) [3–5]. В разработанных конструкциях анизотропных МР ПМП коэффициент усиления КМП составляет 15–20, а в перспективе может достигать сотен и более.

Другим не менее эффективным способом повышения уровня сигнала является использование гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР) в ТМРНС, что позволяет получать высокочувствительные МР ПМП с низким уровнем шума [6]. Уровень шума МР ПМП на основе ТМРНС с ГМР-эффектом зависит от типа структуры, способа ее формирования и дизайнерских (топологических) решений. Проведенные нашим коллективом экспериментальные исследования показывают, что получение высокочувствительных МР ПМП на основе ТМРНС со спин-вентильным и спин-туннельным ГМР-эффектами возможно и практически реализуемо с использованием определенного конструктивно-технологического базиса.

Разработанный в НПК «Технологический центр» конструктивно-технологический базис производства магниторезистивных микросистем содержит блок технологических операций, определяющих способ имплантации миниатюрных КМП в кристалл, на поверхности которого в локальной области сформированы элементы на основе ТМРНС с анизотропным магниторезистивным (АМР) эффектом или ГМР-эффектом. На рис. 1 представлены внешний вид МР ПМП с АМР-эффектом и его нечетная передаточная вольт-эрстедная характеристика (ВЭХ), построенная при напряжении питания 10 В. АМР ПМП с нечетной ВЭХ востребованы в ряде применений, где необходимо

определять вектор магнитного поля (навигация, магнитная интроскопия, измерение электрического тока в проводнике, и др.). В целях минимизации гистерезиса в ТМРНС и величины начального смещения в конструкциях АМР ПМП практически всегда присутствуют планарные катушки подмагничивания. В разработанных нашим коллективом конструкциях АМР ПМП с КМП крутизна преобразования на линейном участке ВЭХ ($\pm 0,5$ Э) достигает 8 мВ/(В·Э), при этом величина АМР-эффекта в ТМРНС, из которой сформирована мостовая схема ПМП с сопротивлением 0,7–1,5 кОм, составляет 2–2,5%.

На рис. 2 представлены внешний вид МР ПМП с ГМР-эффектом и его четная передаточная ВЭХ, построенная при напряжении питания 5 В. ПМП с четной ВЭХ востребованы в тех применениях, где неважно направление вектора магнитного поля, где контролируется только его абсолютное значение с достаточно широким допуском из-за наличия гистерезиса в ТМРНС. Используемая в мостовой схеме многослойная ТМРНС обладает величиной ГМР-эффекта на уровне 18–20%. Из зависимости, представленной на рис. 2, следует, что крутизна преобразования ГМР ПМП на линейном участке ВЭХ составляет 27 мВ/(В·Э).

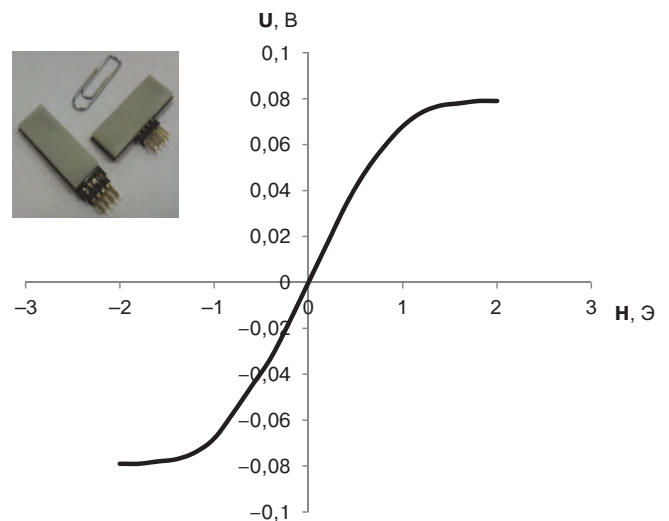


Рис. 1. Внешний вид разработанного МР ПМП с АМР-эффектом и его нечетная передаточная ВЭХ

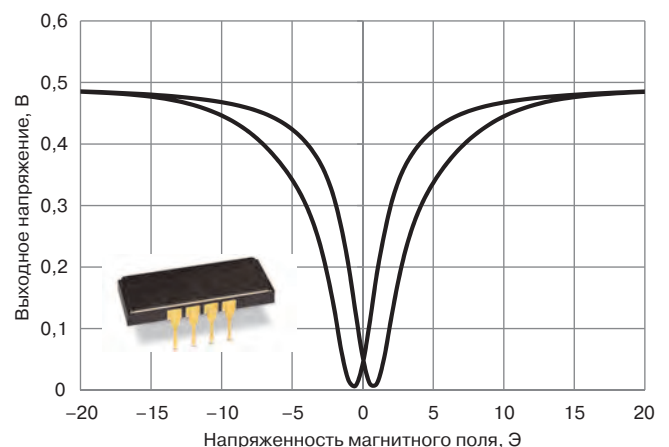


Рис. 2. Внешний вид разработанного МР ПМП с ГМР-эффектом и его четная передаточная ВЭХ

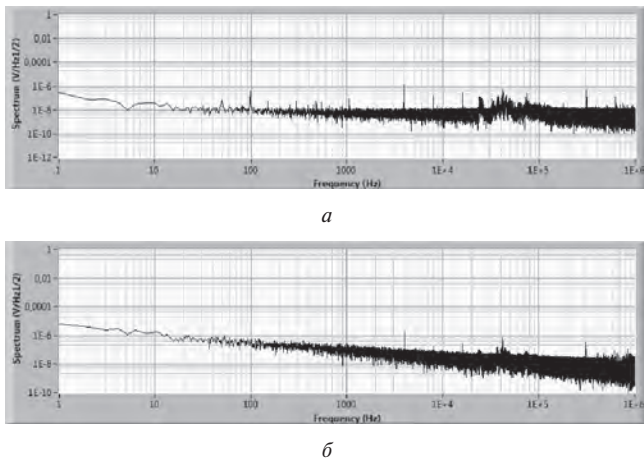


Рис. 3. Зависимости спектральной плотности шума двух типов МР ПМП, созданных на основе ТМРНС с АМР- (а) и ГМР- (б) эффектами

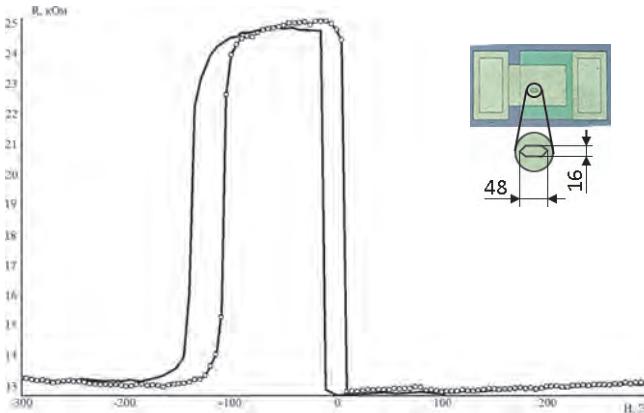


Рис. 4. Внешний вид тестовой спин-туннельной ТМРНС с ГМР-эффектом 92% и ее изменение сопротивления в диапазоне ± 300 Э

Исследование собственных шумов, созданных МР ПМП в условиях промышленных помех, требует применения специальных экранов из пермаллоя, специализированной оснастки, определенного времени проведения измерения, когда уровень помех минимален, и специализированного прибора. Следует отметить, что спектральная плотность шума МР ПМП измерялась с автономными источниками питания на приборе, позволяющем с погрешностью $\pm 1\%$ определять спектральную плотность шума ПМП в диапазоне частот от 0,01 Гц до 500 кГц. Для сравнительной оценки, какой из МР ПМП обладает более широким динамическим диапазоном и наименьшим порогом чувствительности, данных условий вполне достаточно. На рис. 3 представлены две зависимости спектральной плотности шума, характерные для двух типов МР ПМП, созданных на основе ТМРНС с АМР- и ГМР-эффектами. Из данных зависимостей следует, что уровень собственных шумов в МР ПМП с ГМР эффектом выше, чем в МР ПМП с АМР-эффектом. На частоте 1 Гц спектральная плотность шума в ГМР ПМП составляет $6 \text{ мкВ}/\text{Гц}^{1/2}$, а в АМР ПМП — $0,4 \text{ мкВ}/\text{Гц}^{1/2}$.

В целях создания высокочувствительных МР ПМП и энерго-независимой магниторезистивной памяти с произвольной выборкой нашим коллективом ведутся работы по созданию ТМРНС с более высокими значениями ГМР-эффекта [7]. На рис. 4 представлена зависимость изменения сопротивления в тестовой спин-туннельной ТМРНС с ГМР-эффектом, сформированной

интегральным способом с линейными размерами чувствительного элемента 16×48 мкм. Сопротивление тестовой спин-туннельной ТМРНС изменяется от 13 кОм до 25 кОм под воздействием напряженности магнитного поля от -15 Э до $+15$ Э, что соответствует ГМР-эффекту на уровне 92%.

Одной из особенностей спин-туннельной ТМРНС является низкое напряжение питания (не более 0,1 В), ограниченное напряжением пробоя тонкого слоя диэлектрика (не более 5 нм), разделяющего ферромагнитные слои в ТМРНС. С учетом данного факта, как правило, в МР ПМП последовательно включаются несколько десятков таких спин-туннельных ТМРНС, что приводит к высокому входному сопротивлению (до нескольких сотен кОм). Высокое значение ГМР-эффекта спин-туннельной ТМРНС позволит получить высокочувствительные МР ПМП с малым энергопотреблением и высокой крутизной преобразования. Кроме того, подобные спин-туннельные ТМРНС могут быть использованы в составе ячейки энергонезависимой памяти с произвольной выборкой.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются результаты исследования МР ПМП и спин-туннельной ТМРНС с ГМР-эффектом, созданные на основе конструктивно-технологического базиса магниторезистивных микросистем с КМП. Данные результаты исследования являются очередным шагом в развитии отечественных высокочувствительных МР ПМП, обладающих низким энергопотреблением, высокой крутизной преобразования и пониженным порогом чувствительности до 10^{-10} Тл.

Представленные в данной работе результаты получены в том числе с использованием оборудования центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Magnetometer Market: Snapshot. Электронный ресурс <https://www.transparencymarketresearch.com/magnetometer-market.html>, дата обращения: 13.09.18, язык английский.
2. Ripka P. *Advances in Magnetic Field Sensors*, IEEE Sensors Journal, 2010. Vol. 10. №6, June. P. 1108–1116.
3. Буслов И., Бауткин В., Драпезо А., Ярмолович В. Датчики слабых магнитных полей на эффекте Холла // Современная электроника, 2011. — № 1. — С. 12–17.
4. Marinho Z., Cardoso S., Chaves R., Ferreira R., Melo L.V., Freitas P.P. *Three dimensional magnetic flux concentrators with improved efficiency for magnetoresistive sensors* // Journal of Applied Physics. Vol. 109. Is. 7, 2011. P. 07E521-07E521-3.
5. Амеличев В. В., Аравин В. В., Белов А. Н., Красюков А. Ю., Резнев А. А., Сауров А. Н. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов // Нано- и микросистемная техника, 2013. — № 3. — С. 29–33.
6. TMR9001 Ultra High Sensitivity, Ultra Low Noise TMR linear sensor [Электронный ресурс] MultiDimension Technology Co., Ltd. Режим доступа: <http://www.dowaytech.com/en/1866.html> — свободный. — Яз. англ. (дата обращения — 03.07.2018).
7. Амеличев В. В., Абанин И. Е., Аравин В. В., Костюк Д. В., Касаткин С. И., Резнев А. А., Сауров А. Н. Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем // Известия вузов. Электроника, 2015. — Т. 20. — № 5. — С. 505–510.