



Получено: 12.11.2024 г. | Принято: 22.11.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.60.69>

Научная статья

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ СПИН-ТУННЕЛЬНЫХ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ НАНОСТРУКТУР С СИНТЕТИЧЕСКИМ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОМ

Д.В.Васильев¹, нач. лаб., ORCID: 0000-0001-6568-5301

А.Н.Сауров², д.т.н., проф., акад. РАН, дир.

В.В.Амеличев¹, к.т.н., нач. отдела, ORCID: 0000-0002-4204-2626 / V.Amelichev@tcen.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования макетов преобразователей магнитного поля (ПМП) на основе спин-туннельных магниторезистивных наноструктур (СТМР) с синтетическим антиферромагнетиком (САФ). Абсолютная чувствительность к магнитному полю у исследованных макетов ПМП-САФ составила 217 мВ/Э в диапазоне магнитного поля ± 5 Э ($\pm 0,5$ мТл) при напряжении питания 5 В.

Ключевые слова: спин-туннельные магниторезистивные наноструктуры, синтетический антиферромагнетик, преобразователь магнитного поля, мостовая схема, концентраторы магнитного поля

Для цитирования: Д.В. Васильев, А.Н. Сауров, В.В. Амеличев. Высокочувствительный преобразователь магнитного поля на основе спин-туннельных магниторезистивных наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком. НАНОИНДУСТРИЯ. 2025. Т. 18. № 1. С. 60–69. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.60.69>.

Received: 12.11.2024 | Accepted: 22.11.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.60.69>

Original paper

HIGH-SENSITIVE MAGNETIC FIELD TRANSDUCER BASED ON SPIN-TUNNEL MAGNETORESISTIVE NANOSTRUCTURES WITH SYNTHETIC ANTIFERROMAGNET

D.V.Vasilyev¹, Head of Laboratory, ORCID: 0000-0001-6568-5301

A.N.Saurov², Doct. of Sci. (Tech), Prof., Academician of RAS, Director.

V.V.Amelichev¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Department, ORCID: 0000-0002-4204-2626 / V.Amelichev@tcen.ru

Abstract. The results of a study of mock-ups of magnetic field transducers (MFT) based on spin-tunnel magnetoresistive nanostructures (STMR) with a synthetic antiferromagnet (SAF) are presented. The absolute sensitivity to the magnetic field of the studied MFT-SAF mock-ups was 217 mV/Oe in the magnetic field range ± 5 Oe (± 0.5 mT) at a supply voltage of 5 V.

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр", Москва, Россия / Scientific-manufacturing complex "Technological centre", Moscow, Russia

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Россия / Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia



Keywords: spin-tunnel magnetoresistive nanostructures, synthetic antiferromagnet, magnetic field transducer, Wheatstone bridge scheme, magnetic flux concentrators

For citation: D.V. Vasilyev, A.N. Saurov, V.V. Amelichev. High-sensitive magnetic field transducer based on spin-tunnel magnetoresistive nanostructures with synthetic antiferromagnets. NANOINDUSTRY. 2025. Vol. 18. No. 1. PP. 60–69. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2025.18.1.60.69>.

ВВЕДЕНИЕ

Ряд современных научно-технических задач сложно решить без применения высокочувствительных преобразователей магнитного поля (ПМП). Одними из наиболее перспективных конструктивных решений для преобразования слабых магнитных полей в электрический сигнал являются спин-туннельные магниторезистивные (СТМР) наноструктуры. В СТМР наноструктурах изменение сопротивления происходит в результате туннелирования электронов при параллельной и антипараллельной магнитной конфигурации ферромагнитных слоев, при этом магниторезистивный эффект может превышать 200% [1]. Магнитный туннельный переход (МТП), как правило, состоит из двух ферромагнитных пленок (сплавы Fe, Ni, Co), между которыми расположен барьерный слой (MgO , Al_2O_3), причем одна из ферромагнитных пленок связана с антиферромагнитным слоем (IrMn, PtMn, FeMn) посредством обменной связи и называется "фиксированным" слоем. Намагниченность второй ферромагнитной пленки изменяется в малых магнитных полях, данный слой получил название "свободный". В СТМР-наноструктурах на основе аморфной пленки Al_2O_3 туннелирование электронов некогерентное, в результате этого магниторезистивный эффект составляет не более 70% [2]. Структура CoFeB / MgO / CoFeB в МТП обеспечивает когерентное туннелирование электронов через согласованную структуру кристаллических слоев, повышая тем самым магниторезистивный эффект до 600% [3].

Замена в МТП фиксированного слоя на синтетический антиферромагнетик (САФ) способствует снижению магнитостатического взаимодействия в СТМР-наноструктурах между фиксированным и свободным слоями. САФ, как правило, представлен двумя ферромагнитными слоями, разделенными немагнитной пленкой (Ru, Cu, Ag) и связанными между собой косвенной обменной связью, которая имеет осциллирующий вид. САФ-структура имеет замкнутую магнитную конфигурацию и концентрирует магнитное поле на фиксированном слое, минимизируя его воздействие на свободный слой.

INTRODUCTION

A number of modern scientific and technical tasks are difficult to solve without the use of highly sensitive magnetic field transducers (MFTs). One of the most promising design solutions for converting weak magnetic fields into an electrical signal are spin-tunnel magnetoresistive (STMR) nanostructures. In STMR nanostructures, the change in resistance results from electron tunnelling in parallel and antiparallel magnetic configuration of ferromagnetic layers, and the magnetoresistive effect can exceed 200% [1]. Magnetic tunnelling junctions (MTJ) usually consists of two ferromagnetic layers (Fe, Ni, Co alloys) with a barrier layer (MgO , Al_2O_3) between them, with one of the ferromagnetic layers connected to the antiferromagnetic layer (IrMn, PtMn, FeMn) by exchange coupling and is called the "fixed" layer. The magnetisation of the second ferromagnetic layer changes in small magnetic fields, and this layer is called the "free" layer. In STMR nanostructures based on amorphous Al_2O_3 film, electron tunnelling is incoherent, resulting in a magnetoresistive effect of less than 70% [2]. The CoFeB / MgO / CoFeB structure in MTJ provides coherent tunnelling of electrons through the coordinated structure of crystalline layers, thus increasing the magnetoresistive effect up to 600% [3].

The replacement of the fixed layer in MTJ by a synthetic antiferromagnetic agent (SAF) contributes to reduction of the magnetostatic interaction in STMR nanostructures between the fixed and free layers. SAF is usually represented by two ferromagnetic layers separated by a non-magnetic layer (Ru, Cu, Ag) and interconnected by an indirect exchange coupling, which has an oscillatory character. The SAF structure has a closed magnetic configuration and concentrates the magnetic field on a fixed layer, minimising its effect on the free layer.

At the same time, the SAF influence on the crystallisation mechanism of amorphous CoFeB films as a result of thermomagnetic treatment (TMT) is known [4]. In two types of structures, with a fixed CoFe (2.5 nm) / CoFeB (3 nm) layer and with a fixed layer with SAF CoFe (2.5 nm) / Ru (2.5 nm) /



Вместе с тем известно влияние САФ на механизм кристаллизации аморфных пленок CoFeB в результате термомагнитной обработки (ТМО) [4]. В двух типах структур, с фиксированным слоем CoFe (2,5 нм) / CoFeB (3 нм) и с фиксированным слоем с САФ CoFe (2,5 нм) / Ru (2,5 нм) / CoFeB (3 нм), установлено, что разделительный слой Ru в САФ обеспечивает кристаллизацию аморфных пленок CoFeB со стороны барьерного слоя MgO, формируя согласованную кристаллическую структуру слоев CoFeB / MgO / CoFeB и более эффективное туннелирование электронов, что в итоге положительно отражается на основных магнитных параметрах и их стабильности.

Таким образом, введение САФ в состав СТМР-наноструктуры позволяет добиться ряда преимуществ по следующим основным параметрам:

- повышенный магниторезистивный эффект (более 50%);
- малое смещение центра петли гистерезиса относительно нулевого значения магнитного поля;
- стабильность магнитных параметров после магнитного отжига.

Диапазон измеряемых магнитных полей с помощью ПМП на основе СТМР-наноструктур составляет от нескольких десятков пикотесла (пТл) до нескольких десятков миллитесла (мТл) [5-7]. Это один из самых больших динамических диапазонов работы у известных ПМП, которые могут быть изготовлены с использованием технологии ИМС.

ПМП-САФ находят эффективное применение в системах контроля перемещения и вращения объектов, контроля электрического тока, обнаружения ферромагнитных объектов и структурных дефектов ферромагнитных материалов, подсчета магнитных микро- и наночастиц в биологическом анализе материала, в устройствах хранения информации с ограниченным энергетическим ресурсом.

Принимая во внимание преимущества СТМР-наноструктур с САФ, разработка на их основе новых конструктивно-технологических решений в области создания высокочувствительных преобразователей магнитного поля является актуальным и перспективным направлением исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Косвенное обменное взаимодействие между ферромагнетиками в САФ носит осциллирующий характер [8], при этом первый антиферромагнитный максимум обладает наибольшей энергией, в результате чего перемагничивание фиксированного слоя происходит при больших магнитных полях. Состав и толщины пленок, входящих

CoFeB (3 нм), it was found that the separating Ru layer in SAF provides crystallisation of amorphous CoFeB films from the side of the MgO barrier layer, forming a coordinated crystal structure of CoFeB / MgO / CoFeB layers and more efficient tunnelling of electrons, which ultimately has a positive effect on the main magnetic parameters and their stability.

Thus, the incorporation of SAF into the STMR nanostructure enables a number of advantages in the following main parameters:

- increased magnetoresistive effect (more than 50%);
- small displacement of the centre of the hysteresis loop relative to the zero value of the magnetic field;
- stability of magnetic parameters after magnetic annealing.

The range of measured magnetic fields using STMR-based on MFTs nanostructures is from a few tens of picotesla (pT) to a few tens of millitesla (mT) [5-7]. This is one of the largest dynamic operating ranges of known MFTs that can be fabricated using IC technology.

MFTs-SAF find effective application in systems of control of movement and rotation of objects, control of electric current, detection of ferromagnetic objects and structural defects of ferromagnetic materials, counting of magnetic micro- and nanoparticles in biological material analysis, in information storage devices with limited energy resource.

Taking into account the advantages of STMR nanostructures with SAF, the new design and technological solutions development on their basis in the field of creating highly sensitive magnetic field transducers is an actual and promising direction of research.

EXPERIMENTS

The indirect exchange interaction between ferromagnets in SAF has an oscillatory character [8], with the first antiferromagnetic maximum having the highest energy, resulting in the remagnetisation of the fixed layer at high magnetic fields. The composition and thicknesses of the films comprising the STMR nanostructure Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru (8 Å) / CoFe / IrMn / Ta were selected in such a way as to ensure antiferromagnetic interaction of ferromagnetic layers in SAF and the minimum coercivity of the free layer. The sketch of the structure and its remagnetisation loop are presented in Fig.1.

The free layer remagnetisation loop shown in Fig.1b was obtained using a MESA-200 magnetic measurement system (Shb Instruments, USA). The remagnetisation loop

в состав СТМР-наноструктуры Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru (8 Å) / CoFe / IrMn / Ta, подбирались таким образом, чтобы обеспечить антиферромагнитное взаимодействие ферромагнитных слоев в САФ и минимальную коэрцитивную силу свободного слоя. Эскиз структуры и ее петля перемагничивания представлены на рис.1.

Представленная на рис.1b петля перемагничивания свободного слоя получена при помощи магнитной измерительной системы MESA-200 (Shb Instruments, США). Петля перемагничивания фиксированного слоя не показана на данном рисунке, так как измерительная система MESA-200 имеет ограниченный диапазон измерения (± 1000 Э), в то время как для перемагничивания САФ с толщиной немагнитного слоя, соответствующей первому антиферромагнитному максимуму, необходимо задавать магнитное поле от 2 кЭ и более [8].

Для применения ПМП-САФ в широком температурном диапазоне необходимо минимизировать влияние изменения температуры на выходной сигнал [9]. Одним из инструментов для решения данной проблемы является использование мостовой схемы Уитстона (рис.2). Существует несколько вариантов мостовых схем: с одним активным плечом, полумостовая и полная мостовая схема. С точки зрения применения в ПМП, наибольший интерес представляет полная мостовая схема Уитстона, где все четыре плеча вносят свой вклад в выходной сигнал. В отличие от схемы с одним активным плечом, в полной мостовой схеме при температурном воздействии сопротивление четырех плеч изменяется практически одинаково, при этом выходной сигнал имеет минимальное отклонение от нулевого значения. Во внешнем магнитном поле у одной диагональной пары плеч схемы сопротивление увеличивается, у другой – уменьшается, данный дисбаланс приводит к появлению сигнала на выходе мостовой схемы [9].

Согласно данным, представленным в работе [9], для уменьшения порога обнаружения каждое плечо ПМП-САФ должно состоять из N МТП. С другой стороны, с ростом количества СТМР-элементов в плече увеличивается сопротивление мостовой схемы, что ограничивает частотный диапазон работы преобразователя. Необходимость применения цепочки последовательно соединенных МТП в каждом плече мостовой схемы обуславливает конструктивные и технологические особенности создания ПМП-САФ. Вариант конструкции последовательно соединенных СТМР-элементов в виде эскиза показан на рис.3.

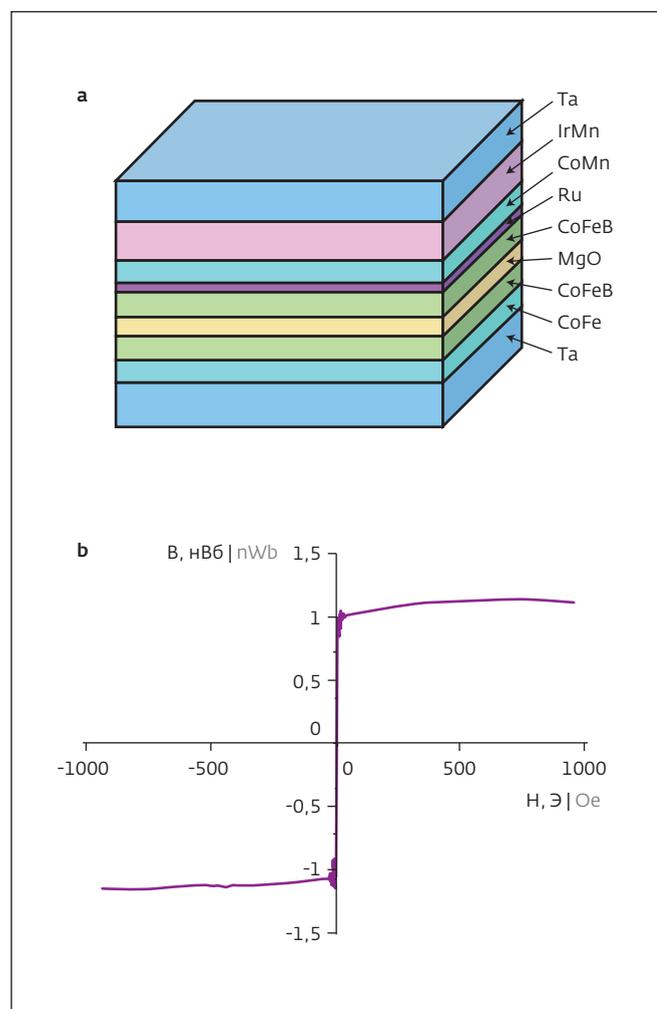


Рис.1. Эскиз СТМР наноструктуры с САФ Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru / CoFe / IrMn / Ta (a) и ее петля перемагничивания (b)

Fig.1. STMR sketch of a nanostructure with SAF Ta / CoFe / CoFeB / MgO / CoFeB / Ru / CoFe / IrMn / Ta (a) and its remagnetisation loop (b)

of the fixed layer is not shown in this figure because the MESA-200 measuring system has a limited measurement range (± 1000 Oe), while for the remagnetisation of SAF with the thickness of the non-magnetic layer corresponding to the first antiferromagnetic maximum, it is necessary to set a magnetic field of 2 kOe or more [8].

In order to apply MFTs-SAF over a wide temperature range, it is necessary to minimise the effect of temperature variation on the output signal [9]. One of the tools to solve this problem is the use of the Wheatstone bridge circuit (Fig.2). There are several variants of bridge circuits: with one active arm, half-bridge and full bridge circuit. In terms of MFTs applications, the full

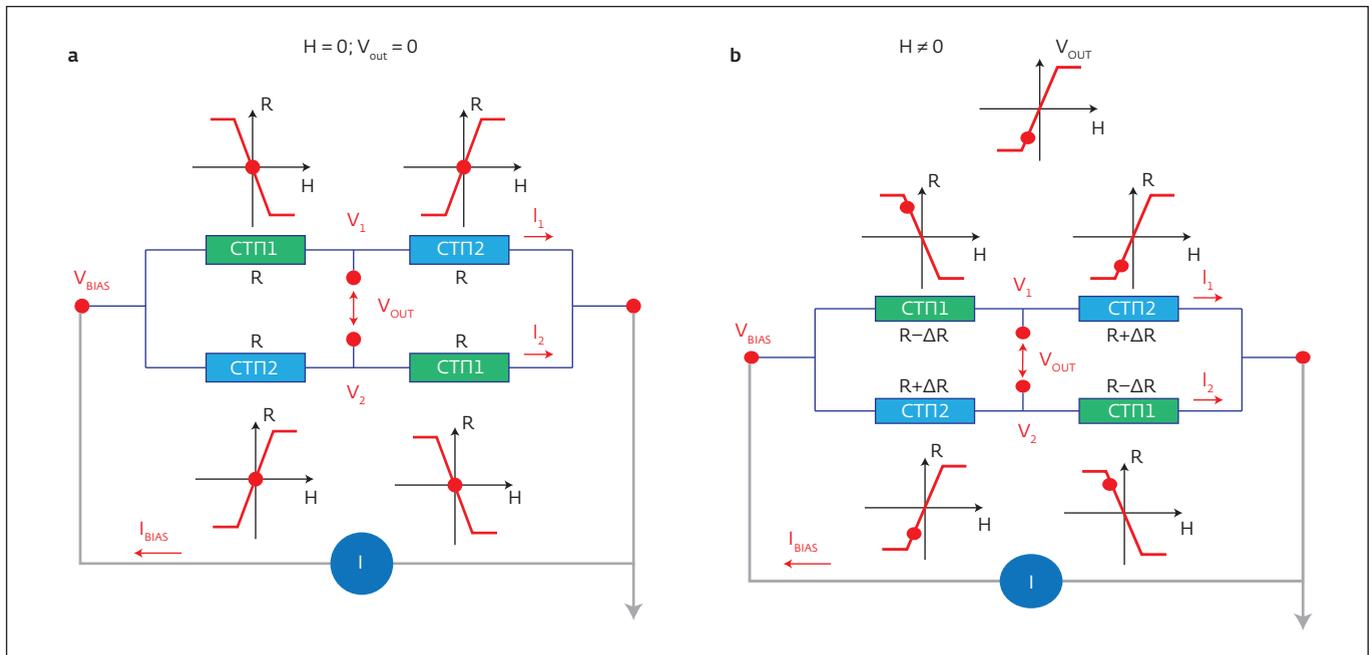


Рис.2. Полная мостовая схема Уитстона (а) на основе МТП при отсутствии внешнего магнитного поля на выходе имеет нулевой сигнал, внешнее магнитное поле (b) разбалансирует мостовую схему, на выходе появляется сигнал [9]

Fig.2. The full Wheatstone bridge circuit (a) based on MTJ has zero signal at the output in the absence of an external magnetic field, an external magnetic field (b) unbalances the bridge circuit, and a signal appears at the output [9]

Зависимость сопротивления группы последовательно соединенных МТП от внешнего магнитного поля представлена на рис.4. Коэрцитивная сила свободного слоя данной структуры равна 35 Э, поле смещения петли гистерезиса относительно нулевого значения магнитного поля отсутствует, магниторезистивный эффект составляет 45%.

Кривая на рис.4 имеет прямоугольный вид из-за параллельного расположения осей легкого намагничивания (ОЛН) и однонаправленной анизотропии (ООА). Направление ОЛН задается при напылении СТМР-наноструктуры, ООА возникает в результате обменного взаимодействия ферромагнитного и антиферромагнитного слоев [10]. Для корректной работы ПМП необходимо, чтобы зависимость имела линейный вид в области

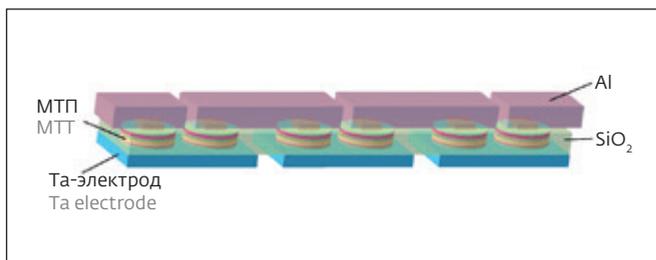


Рис.3. Последовательность соединенных МТП
Fig.3. Sequence of connected MTJs

Wheatstone bridge circuit, where all four arms contribute to the output signal, is of most interest. In contrast to a single active arm circuit, a full bridge circuit changes the impedance of the four arms almost equally with temperature and the output signal has minimal deviation from zero. In an external magnetic field, resistance of one diagonal pair of arms of the circuit increases and the other decreases, this imbalance leads to appearance of a signal at the output of the bridge circuit [9].

According to the data presented in [9], in order to reduce the detection threshold, each arm of the MFTs-SAF should consist of N MTJ. On the other hand, as the number of STMR elements in the arm increases, resistance of the bridge circuit increases, which limits the frequency range of the transducer operation. The necessity of using a chain of series-connected MTJs in each arm of the bridge circuit determines the design and technological peculiarities of the MFTs-SAF creation. The design variant of series-connected STMR elements in the form of a sketch is shown in Fig.3.

The dependence of the resistance of a group of series-connected MTJs on the external magnetic field is shown in Fig.4. The coercive force of the free layer of this structure is equal to 35 Oe,

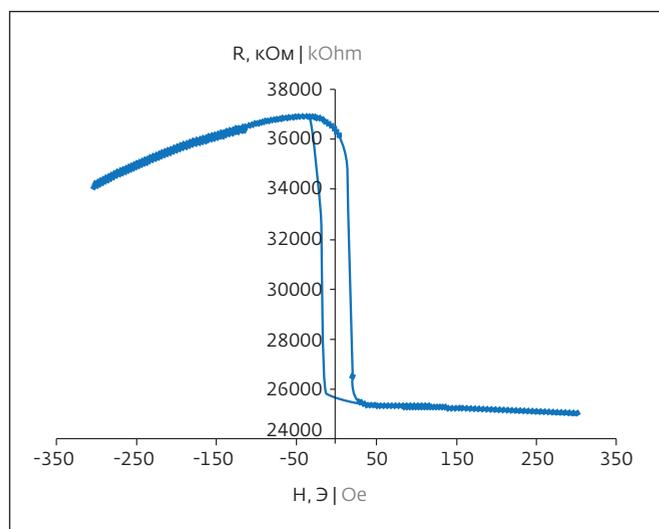


Рис.4. Зависимость $R(H)$ -цепочки последовательно соединенных МТП от внешнего магнитного поля, $dR/R=45\%$
 Fig.4. Dependence of $R(H)$ of a chain of series-connected MTJs on the external magnetic field, $dR/R=45\%$

слабых магнитных полей. С этой целью применяются методы линеаризации, которые обеспечивают ортогональное расположение векторов намагниченности свободного и опорного слоев и уменьшение ширины петли гистерезиса свободного слоя [11]. В исследуемых МТП неколлинеарная конфигурация достигалась с помощью двухэтапной ТМО и анизотропии формы. Во время первого этапа ТМО при температуре $300\text{ }^\circ\text{C}$ происходит кристаллизация аморфных пленок CoFeB , в результате чего магниторезистивный эффект увеличился до 79% (рис.5), при этом направление внешнего магнитного поля совпадало с направлением ОЛН. Второй этап ТМО осуществлялся при температуре $250\text{ }^\circ\text{C}$, направление внешнего магнитного поля было направлено для формирования перпендикулярного расположения осей однонаправленной и одноосной анизотропии. В процессе двух этапов ТМО внешнее магнитное поле задавалось с помощью системы постоянных магнитов и составляло порядка 1 кЭ .

В результате второго этапа ТМО незначительно снижается магниторезистивный эффект и коэрцитивная сила свободного слоя, МТП со скорректированной характеристикой могут стать основой для изготовления высокочувствительных ПМП-САФ.

Одним из способов повышения чувствительности магниторезистивных ПМП является внедрение в конструкцию концентраторов магнитного поля (КМП). Как правило, КМП изготавливаются из магнитомягких ферромагнитных

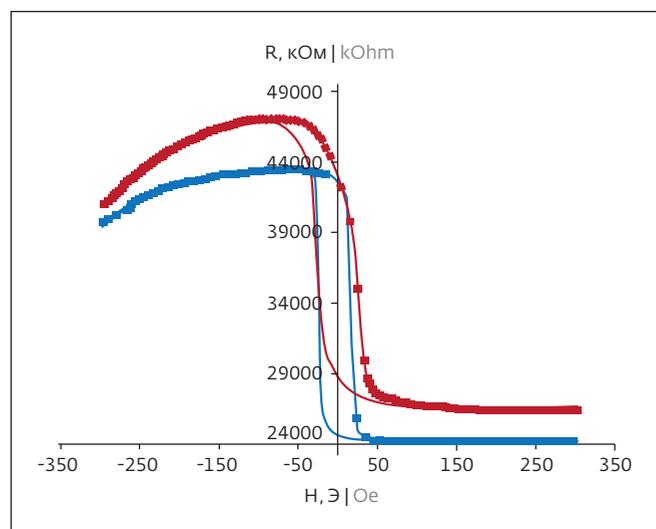


Рис.5. Зависимость $R(H)$ -цепочки последовательно соединенных МТП от внешнего магнитного поля после первого этапа магнитного отжига (синяя кривая) и после второго этапа (красная кривая)
 Fig.5. Dependence of $R(H)$ of a chain of series-connected MTJs on the external magnetic field after the first stage of magnetic annealing (blue curve) and after the second stage (red curve)

the hysteresis loop displacement field with respect to the zero value of the magnetic field is absent, the magnetoresistive effect is 45% .

The curve in Fig.4 has a rectangular shape due to the parallel arrangement of the easy axis (EA) and unidirectional anisotropy (UDA). The EA direction is set during the sputtering of the STMR nanostructure, while the UDA results from the exchange interaction between ferromagnetic and antiferromagnetic layers [10]. For correct operation of MFT it is necessary that dependence has a linear form in the area of weak magnetic fields. For this purpose, linearisation methods are used, which ensure the orthogonal arrangement of the magnetisation vectors of the free and reference layers and reduction of the width of the hysteresis loop of the free layer [11]. In the studied MTJs, the non-collinear configuration was achieved using two-stage TMT and shape anisotropy. During the first stage of TMT at $300\text{ }^\circ\text{C}$, crystallisation of amorphous CoFeB films occurs, resulting in an increase in the magnetoresistive effect up to 79% (Fig.5), with the external magnetic field direction coinciding with the EA direction. The second stage of TMT was carried out at a temperature of $250\text{ }^\circ\text{C}$, the external magnetic field direction was directed to form a perpendicular arrangement of unidirectional and uniaxial anisotropy axes.

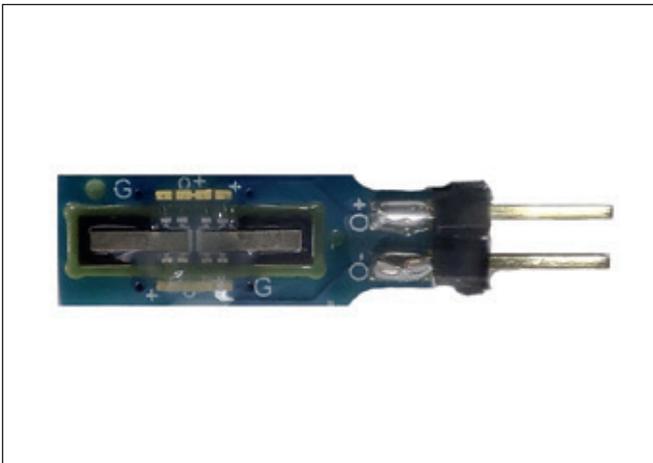


Рис.6. Фотография макета ПМП-САФ
Fig.6. Photograph of the MFTs-SAF mock-up

материалов с высокой магнитной проницаемостью, что позволяет усилить полезный сигнал в несколько раз и повысить отношение сигнал/шум [12]. Как правило, КМП представляют собой протяженные прямоугольные детали, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, в зазоре которых находятся чувствительные элементы преобразователя. На коэффициент усиления КМП влияет как геометрическая форма, так и зазор между ними [13].

С учетом вышеизложенного, научным коллективом НПК "Технологический центр" разработан и создан макет конструкции ПМП-САФ, фотография которого представлена на рис.6.

В результате исследования электрофизических характеристик ПМП-САФ установлено, что сопротивление мостовой схемы может составлять от 2 до 20 МОм, абсолютная чувствительность к магнитному полю, при напряжении питания 5 В, достигает 217 мВ/Э в диапазоне от минус 5 до 5 Э (от минус 0,5 до 0,5 мТл). Экспериментально установлено влияние величины зазора между КМП на чувствительность к магнитному полю ПМП-САФ. На рис.7 представлена вольт-эрстедная характеристика макетного образца ПМП-САФ с зазором между КМП 1,0 мм (синяя кривая), абсолютная чувствительность к магнитному полю (S) при напряжении питания 5 В составляет 108 мВ/Э; красная кривая рис.7 иллюстрирует выходную характеристику макетного образца преобразователя с зазором между КМП 0,35 мм, $S = 217$ мВ/Э. При этом геометрические размеры КМП макетных образцов были одинаковы.

Для снижения гистерезиса вольт-эрстедных характеристик макетных образцов

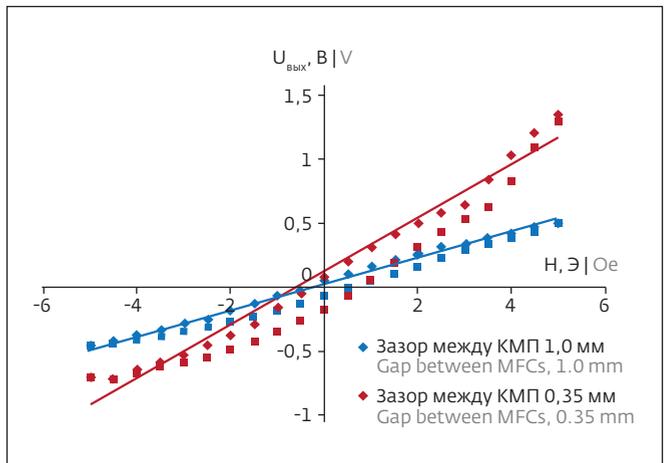


Рис.7. Вольт-эрстедные характеристики макетных образцов с зазором между КМП 1,0 мм (синяя кривая) и 0,35 мм (красная кривая)

Fig.7. Volt-Oersted characteristics of mock-up samples with a 1.0 mm (blue curve) and 0.35 mm (red curve) MFCs gap

In the process of two stages of TMT, the external magnetic field was set using a system of permanent magnets and was of the order of 1 kOe.

As a result of the second stage of TMT, the magnetoresistive effect and coercivity of the free layer are slightly reduced, the MTJs with the corrected characteristic can become the basis for the fabrication of highly sensitive MFTs-SAF.

One of the ways to increase sensitivity of magnetoresistive MFTs is introduction of magnetic flux concentrators (MFCs) into the design. As a rule, MFCs are made of magnetically soft ferromagnetic materials with high magnetic permeability, which makes it possible to amplify the useful signal several times and increase the signal-to-noise ratio [12]. As a rule, MFCs are extended rectangular parts, located at a small distance from each other, in the gap of which the sensitive elements of the transducer are located. Both the geometrical shape and the gap between them influence the gain of the MFCs [13].

Taking into account the above mentioned, the scientific team of the Scientific-Manufacturing Complex "Technological Centre" has developed and created a mock-up of the MFTs-SAF design, the photo of which is presented in Fig.6.

As a result of the study of the electrophysical characteristics of MFTs-SAF, it was found that the resistance of the bridge circuit can range from 2 to 20 MOhms, absolute sensitivity to the magnetic field, at a supply voltage of 5 V, reaches 217 мВ/Ое in the range from minus 5 to 5 Oe (from minus 0.5 to 0.5 mT). The influence of the size of the gap between MFCs on sensitivity to the magnetic field



разрабатываются методы линеаризации, предусматривающие внедрение в конструкцию ПМП-САФ дополнительных магнитных компонентов.

Увеличение количества МТП в каждом плече мостовой схемы необходимо не только для уменьшения порога обнаружения по магнитному полю, но и для перераспределения напряжения питания между элементами, что предотвращает пробой барьерного слоя и выход из строя ПМП. С целью исследования влияния напряжения питания на магнитные свойства ПМП-САФ контролировалась чувствительность к магнитному полю макетного образца при фиксированной величине внешнего магнитного поля и при изменении напряжения питания от 0 до 10 В с шагом 1 В (рис.8).

При напряжении питания более 5 В происходит замедление роста абсолютной чувствительности, и при напряжении питания 8 В кривая достигает насыщения, что может быть объяснено уменьшением магниторезистивного эффекта при повышении напряжения питания на МТП.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования созданных макетных образцов ПМП-САФ и полученные результаты показывают потенциальные возможности новой технологии магнитополупроводниковых микросистем, позволяющей получать приборы с нечетной передаточной характеристикой и высоким коэффициентом преобразования магнитного поля. Это открывает возможность создания высокочувствительных ПМП (217 мВ/Э и более) при низком токе потребления (не более 10 мкА). Полученная экспериментальная зависимость абсолютной чувствительности к магнитному полю ПМП-САФ от напряжения питания показывает высокую устойчивость МТП с САФ при его изменении до 10 В. Созданные макетные образцы ПМП-САФ по совокупности основных параметров не имеют аналогов отечественного производства и соответствуют изделиям, выпускаемым одним из лидеров зарубежных изготовителей магниторезистивных датчиков, основанных на технологии СТМР-наноструктур [14].

Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод о широком диапазоне применения МТП с САФ: от элемента хранения информации в ячейке энергонезависимой памяти до массива элементов матрицы магнитного интроскопа. Важным достоинством МТП с САФ является универсальность его применения, его можно использовать как

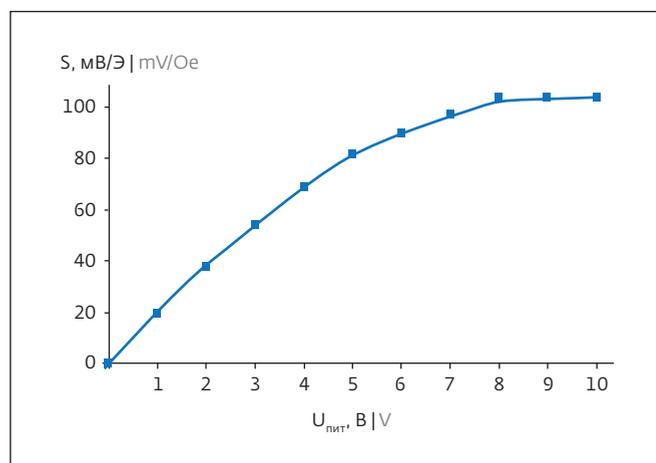


Рис.8. Зависимость абсолютной чувствительности к магнитному полю макетного образца ПМП-САФ от напряжения питания

Fig.8. Dependence of absolute sensitivity to magnetic field of the MFTs-SAF mock-up on the supply voltage

of MFTs-SAF has been experimentally established. Figure 7 shows the volt-oersted characteristic of the MFTs-SAF mock-up with the gap between the MFCs 1.0 mm (blue curve), absolute sensitivity to the magnetic field (S) at a supply voltage of 5 V is 108 mV/Oe; the red curve of Fig.7 illustrates the output characteristic of the mock-up converter with the gap between the MFCs 0.35 mm, $S=217$ mV/Oe. At the same time, the geometrical dimensions of MFCs of mock-up samples were the same.

In order to reduce the hysteresis of the volt-oersted characteristics of mock-up samples, linearisation methods are being developed that involve the introduction of additional magnetic components into the MFTs-SAF design.

Increasing the number of MTJs in each arm of the bridge circuit is necessary not only to reduce the detection threshold by magnetic field, but also to redistribute the supply voltage between the elements, which prevents the breakdown of the barrier layer and failure of the MFTs. In order to study the effect of supply voltage on the magnetic properties of MFTs-SAF, sensitivity to magnetic field of a mock-up sample was monitored at a fixed value of the external magnetic field and when the supply voltage was changed from 0 to 10 V with a step of 1 V (Fig.8).

At supply voltages higher than 5 V, the growth of absolute sensitivity slows down, and at a supply voltage of 8 V, the curve reaches saturation, which can be explained by the reduction of the magnetoresistive effect when the supply voltage to the MTJ is increased.



для детектирования изменения магнитного поля, например в биосенсорных устройствах, так и для определения направления вектора магнитной индукции в составе высокочувствительного ПМП-САФ. За счет высокой чувствительности ПМП-САФ могут быть интегрированы в устройства магнитной интроскопии, в системы обнаружения ферромагнитных объектов, в преобразователи бесконтактного измерения постоянного и переменного тока малой величины и в другие контрольно-диагностические приборы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения НИР "Теоретические и экспериментальные исследования спин-туннельных магниторезистивных наноструктур с синтетическим антиферромагнетиком для создания высокочувствительных преобразователей магнитного поля и элементов ячеек энергонезависимой магниторезистивной памяти", шифр FNRМ-2022-0010.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Djaуaprawiraа D.D., Tsunekawa K., Nagai M. et al. 230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB / MgO / CoFeB magnetic tunnel junctions // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 86. P. 092502.
2. Dieny B., Goldfarb R.B., Lee. K.-J. Introduction to magnetic random-access memory // IEEE Magnetics. 2017. 255 p.
3. Ikeda S., Hayakawa J., Ashizawa Y. et al. Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB / MgO / CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 93. P. 082508.
4. Lee Y.M., Hayakawa J., Ikeda S. et al. Giant tunnel magnetoresistance and high annealing stability in CoFeB / MgO / CoFeB magnetic tunnel

CONCLUSIONS

The studies of the created MFTs-SAF mock-up and the obtained results show the potentialities of the new technology of magnetosemiconductor microsystems, allowing to obtain devices with odd transfer characteristic and high magnetic field sensitivity. This opens up the possibility of creating highly sensitive MFT (217 mV/Oe and more) at low current consumption (less than 10 μ A). The obtained experimental dependence of absolute sensitivity to magnetic field of MFT-SAF on the supply voltage shows high stability of MTJ with SAF at its change up to 10 V. The created mock-up samples of MFTs-SAF have no analogues of domestic production by the set of basic parameters and correspond to the products produced by one of the leaders of foreign manufacturers of magnetoresistive sensors based on STMR nanostructure technology [14].

The totality of the obtained results allows us to conclude about a wide range of application of MTJ with SAF: from an information storage element in a non-volatile memory cell to an array of magnetic introscope matrix elements. An important advantage of MTJ with SAF is its application versatility; it can be used both for magnetic field changes detection, for example, in biosensor devices, and to detect the magnetic induction vector direction as part of a highly sensitive MFTs-SAF. Due to their high sensitivity, MFTs-SAF can be integrated into magnetic introscope devices, ferromagnetic object detection systems, low magnitude non-contact DC and AC current measurement transducers and other control and diagnostic devices.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Russia under the Scientific research "Theoretical and experimental studies of spin-tunnel magnetoresistive nanostructures with synthetic antiferromagnet for creation of highly sensitive magnetic field transducers and elements of non-volatile magnetoresistive memory cells", agreement FNRМ-2022-0010.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



- junctions with synthetic pinned layer // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 89. P. 042506.
5. Vidal E.G., Muñoz D.R., Arias S.I.R. *et al.* Electronic energy meter based on a tunnel magnetoresistive effect (TMR) current sensor // Materials. 2017. Vol. 10. P. 1134.
 6. Valadeiro J.P., Leitão J.A., Ferreira D.C. *et al.* Strategies for pTesla field detection using magnetoresistive sensors with a soft pinned sensing layer" // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. Vol. 51. No. 1. P. 4400204.
 7. Ferreira R., Paz E., Freitas P.P. *et al.* Large area and low aspect ratio linear magnetic tunnel junctions with a soft-pinned sensing layer // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. Vol. 48. No. 11. PP. 3719–3722.
 8. Наумова Л.И., Миляев М.А., Чернышова Т.А. и др. Безгистерезисные спиновые клапаны с синтетическим антиферромагнетиком и управляемой магниторезистивной чувствительностью // Естественные и технические науки. 2015. № 10(80). С. 92–96.
 9. Freitas P.P., Ferreira R., Cardoso S. Spintronic Sensors // Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104. No. 10. PP. 1894–1918.
 10. Чернышова Т.А., Миляев М.А., Наумова Л.И. и др. Магниторезистивная чувствительность и одноосная анизотропия микрополосок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 5. С. 439–445.
 11. Silva A.V., Leitao D.C., Valadeiro J. *et al.* Linearization strategies for high sensitivity magnetoresistive sensors // The European Physical Journal Applied Physics. 2015. Vol. 72. P. 10601.
 12. Амеличев В.В., Аравин В.В., Белов А.Н. и др. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 29–33.
 13. Патент 2568148. Российская Федерация, МПК H01L 43/00 (2006.01). Магниторезистивный преобразователь: № 2014133072/28; заявл. 12.08.2014; опубл. 10.11.2015 / И.Е. Абанин, В.В. Амеличев, В.В. Аравин и др. 5 с.
 14. Электронный ресурс: Материалы сайта компании "MultiDimension Technology Co., Ltd". www.dowaytech.com (Дата обращения: 30.10.2024).



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА



ptfair.ru

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- БИРЖА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

16+

9–11

АПРЕЛЯ
2025

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

РЕКЛАМА