



РАСЧЕТ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНИЗОТРОПНОГО МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

CALCULATION OF THE TRANSFER CHARACTERISTIC OF THE ANISOTROPIC MAGNETORESISTIVE MAGNETIC FIELD TRANSDUCER

В.В.Амеличев¹, к.т.н., начальник отдела, (ORCID: 0000-0002-4204-2626), Д.В.Костюк¹, начальник НИЛ, (ORCID: 0000-0003-2795-5547), Д.А.Жуков¹, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-5904-8189), А.Б.Шевченко¹, ст. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-1471-7099), С.И.Касаткин², д.т.н., гл. науч., сотр., (ORCID: 0000-0003-4444-0473), О.П.Поляков², к.т.н., ст. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-9232-5790), В.С.Шевцов², мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-4836-1094), П.А.Поляков³, д.ф.-м.н., проф. МГУ, (ORCID: 0000-0001-9232-5790) / avv@tcen.ru
V.V.Amelichev¹, Cand. of Sc. (Technical), Head of Department, (ORCID: 0000-0002-4204-2626), D.V.Kostyuk¹, Head of Laboratory, (ORCID: 0000-0002-4204-2626), D.A.Zhukov¹, Research Assistant, (ORCID: 0000-0002-4204-2626), A.B.Shevchenko¹, Senior Researcher, (ORCID: 0000-0003-1471-7099), S.I.Kasatkin², Doct. of Sc. (Technical), Chief Researcher, (ORCID: 0000-0003-4444-0473), O.P.Polyakov², Cand. of Sc. (Technical), Senior Researcher, (ORCID: 0000-0001-9232-5790), V.S.Shevtsov², Research Assistant, (ORCID: 0000-0003-4836-1094), P.A.Polyakov³, Doct. of Sc. (Physics and Mathematics), Prof., (ORCID: 0000-0001-9232-5790)

УДК 681.586.7, 53.087.92, DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3-4.230.238

Получено: 25.03.2020 г.

Представлена разработанная теоретическая модель одномерной неоднородности (МОН) и описаны основные факторы, влияющие на распределение вектора намагниченности тонкого магниторезистивного элемента анизотропного магниторезистивного преобразователя (АМРП). Получены результаты расчета вольт-эрстедных характеристик АМРП с помощью МОН, которые согласуются с экспериментальными данными.

The developed theoretical model of one-dimensional heterogeneity (MODH) is presented. Described are the main factors affecting distribution of a thin magnetoresistive element magnetization vector of an anisotropic magnetoresistive transducer (AMRT). The calculated results of AMRT volt-oersted characteristics obtained using MODH are consistent with the experimental data.

ВВЕДЕНИЕ

АМРП магнитного поля достаточно широко востребованы потребителями в гражданской, космической и военной областях. Примерами таких применений являются высокочувствительные датчики магнитного поля и электрического тока, градиентные головки считывания, гальванические развязки, биосенсорные устройства

и электронные компасы. Для данных применений АМРП выбирают, в основном, благодаря хорошему сочетанию потребительских свойств – высокой чувствительности в диапазоне слабых магнитных полей (порог чувствительности составляет единицы нТл), малым массогабаритным параметрам и приемлемой стоимости. Эти достоинства исходят от используемых ферромагнитных

¹ НПК "Технологический центр" / SMC "Technological Centre".

² Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН / V.A.Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS.

³ МГУ имени М.В.Ломоносова / Lomonosov Moscow State University.



наноструктур, конструктивных особенностей АМРП и интегральных методов их изготовления. Благодаря ряду факторов, включая нечетный вид передаточной характеристики, данные преобразователи успешно выдерживают конкуренцию с появившимися гораздо позже преобразователями магнитного поля на основе гигантского магниторезистивного эффекта. Основной функциональной частью магниточувствительного элемента в АМРП является полоска металлической ферромагнитной наноструктуры $\text{Ti}(\text{Ta})\text{-FeNiCo-Ti}(\text{Ta})$ толщиной около (25–35) нм. АМРП имеют ось чувствительности, параллельную плоскости кристалла и перпендикулярную оси легкого намагничивания (ОЛН) ферромагнитной наноструктуры. ОЛН формируется в процессе напыления ферромагнитной наноструктуры в постоянном однородном магнитном поле.

Разработка и изготовление приборов и устройств на основе АМРП является одной из актуальных задач современной

микроэлектроники РФ. В результате исследовательских фундаментальных, экспериментальных и технологических работ открываются новые возможности для создания перспективных изделий с улучшенными характеристиками и новыми функциями. Примером тому могут служить новые, развивающиеся направления магнитной стрейнтроники и спинтроники. В новых приборах, например, могут быть объединены магнитострикционные и магниторезистивные свойства [1], что позволит расширить их функциональные возможности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В НПК "Технологический центр" совместно с ИПУ РАН разработаны и запатентованы конструкции АМРП, предназначенные для измерения величины магнитного поля и электрического тока. АМРП представляет собой мостовую схему, каждое плечо которой состоит из нескольких АМР-полосок, соединенных последовательно

INTRODUCTION

AMRTs of a magnetic field are quite widely demanded by consumers in the civil, space and military fields. Examples of such applications are: highly sensitive magnetic field and electric current sensors, gradient read heads, galvanic isolation, bio-sensor devices and electronic compasses. AMRT is chosen for these applications mainly due to a good combination of consumer properties, such as high sensitivity in the range of weak magnetic fields (sensitivity threshold is units of nT), small weight and size parameters and reasonable cost. These advantages come from the used ferromagnetic nanostructures, the AMRT design features and integrated methods of their manufacture. Due to a number of factors, including the odd form of the transfer characteristic, these transducers successfully withstand competition with the magnetic field transducers that appeared much later on the basis of the giant magnetoresistive

effect. The main functional part of the magnetically sensitive element in AMRT is a $\text{Ti}(\text{Ta})\text{-FeNiCo-Ti}(\text{Ta})$ strip of metal ferromagnetic nanostructure with a thickness of about (25–35) nm. AMRTs have an axis of sensitivity parallel to the plane of the crystal and perpendicular to the axis of easy magnetization (EMA) of the ferromagnetic nanostructure. EMA is formed during deposition of a ferromagnetic nanostructure in a constant uniform magnetic field.

The development and manufacture of instruments and devices based on AMRT is one of the urgent tasks of modern microelectronics of the Russian Federation. As a result of fundamental, experimental and technological research, new opportunities are opening up for the creation of promising products with improved characteristics and new functions. Magnetic straintronics and spintronics present examples of this new developing areas. In new devices, for example, magnetostrictive and

magnetoresistive properties can be combined [1], which will expand their functionality.

RESEARCH METHODS

In SMC "Technological Centre", together with V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, AMRT devices designed to measure the magnitude of magnetic field and electric current were developed and patented. AMRT is a bridge circuit, each arm of which consists of several AMR strips connected in series by low-resistance non-magnetic jumpers, and has an even or odd transfer voltage-current characteristic (VOC), the parameters of which are determined by the design of the magnetically sensitive element and the type of nanostructure. Above the AMR strips are three layers of planar low-resistance conductors, separated by layers of a dielectric, usually SiO_2 . In the first layer, the conductors combine AMR strips into a bridge circuit. The conductor formed in the second metallization



низкорезистивными немагнитными перемычками, и имеет четную или нечетную передаточную вольт-эрстедную характеристику (ВЭХ), параметры которой определяются конструкцией магниточувствительного элемента и типом наноструктуры. Над АМР-полосками располагаются три слоя планарных низкорезистивных проводников, разделенных слоями диэлектрика, обычно SiO_2 . В первом слое проводники объединяют АМР-полоски в мостовую схему. Проводник, сформированный во втором уровне металлизации, представляет собой планарную катушку offset, создающую магнитное поле, направленное параллельно оси чувствительности преобразователя для минимизации величины начального разбаланса мостовой схемы. Проводник set/reset, выполненный на третьем уровне металлизации в виде меандра, необходим для установки начального направления векторов намагниченности АМР-полосок вдоль их ОЛН и снижения величины гистерезиса ВЭХ АМРП.

Для экспериментальных исследований АМРП использовались гальваномангнитные методы, позволяющие измерять ВЭХ АМРП для различных параметров устройства и режимов его работы.

Для теоретических исследований применены разработанные модели взаимодействия в двумерном распределении векторов намагниченности в ферромагнитных полосках для расчета их конфигурации и ВЭХ АМРП на базе теории микромагнетизма.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При разработке теоретической модели в качестве основных факторов, влияющих на распределение вектора намагниченности $\vec{M}$ в исследуемом образце, были выделены эффективное поле одноосной анизотропии H_a , магнитостатическое поле размагничивания $\vec{H}_m$, внешнее магнитное поле $\vec{H}_0$. Для теоретического расчета АМР-характеристик образца необходимо определить результирующее распределение вектора намагниченности $\vec{M}$ в образце. Это стало возможным благодаря нахождению эффективного алгоритма решения вариационной задачи нахождения минимума полной магнитной энергии ферромагнетика [2]:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H) dV \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь W_a – плотность энергии магнитной анизотропии [3]:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H) dV \rightarrow \min, \quad (2)$$

где K – константа одноосной анизотропии, $\vec{n}$ – единичный вектор, направленный вдоль координатной оси z , $\vec{m}$ – единичный вектор в направлении $\vec{M}$.

Величина W_m – плотность магнитостатической энергии, определяемая выражением

$$w_m = -\frac{1}{2} (\vec{M} \cdot \vec{H}_m), \quad (3)$$

level is a planar offset coil, which creates a magnetic field directed parallel to the sensitivity axis of the transducer to minimize the initial unbalance of the bridge circuit. The set/reset conductor, made in the third level of metallization in the form of a meander, is necessary to set the initial direction of the magnetization vectors of the AMR strips along their EMA and to reduce the hysteresis of the AMRP VOC.

For experimental studies of AMRT, galvanomagnetic methods were used, which make it possible to measure the VOC of AMRT for various parameters of the device and its operating modes.

For theoretical studies, the developed models of interaction in the two-dimensional distribution of magnetization vectors in ferromagnetic strips are used to calculate their configuration and AMRP VOC based on the theory of micromagnetism.

THEORETICAL MODEL

When developing a theoretical model, the following factors were identified as the main factors affecting distribution of the magnetization vector $\vec{M}$ in the studied sample: the effective uniaxial anisotropy field H_a , the magnetostatic demagnetization

field $\vec{H}_m$ and the external magnetic field $\vec{H}_0$. For theoretical calculation of the AMR characteristics of a sample, it is necessary to determine the resulting distribution of the magnetization vector $\vec{M}$ in the sample. This became possible due to finding an effective algorithm for solving the variational problem of finding the minimum of the total magnetic energy of a ferromagnet [2]:

$$W = \int_V (w_a + w_m + w_H) dV \rightarrow \min \quad (1)$$

Here w_a is density of magnetic anisotropy energy [3]:



где $\vec{H}_m$ – магнитное поле, создаваемое внутренними и поверхностными магнитными "зарядами" и называемое магнитоэстатическим или размагничивающим полем. Размагничивающее поле $\vec{H}_m$ определяется уравнениями магнитоэстатики:

$$\text{rot } \vec{H}_m = 0, \quad (4)$$

$$\text{div}(\vec{H}_m + 4\pi\vec{M}) = 0. \quad (5)$$

Последнее слагаемое в (1) представляет собой плотность зеемановской энергии:

$$w_H = -(\vec{M} \cdot \vec{H}_0). \quad (6)$$

Разработанная модель одномерной неоднородности учитывает особенности геометрических параметров магнитоэстатической (МР) полоски. В случае исследуемого образца длина полоски на порядок превышает ширину. Таким образом, можно считать, что неоднородность распределения намагниченности на концах полоски пренебрежимо мала.

Для численного решения вариационной задачи (1) с учетом (2)–(6) разобьем область интегрирования на N узких полосок, в пределах которых распределение вектора намагниченности $\vec{M}_i$ можно считать однородным (рис.1). Тогда континуальное уравнение (1) можно заменить дискретным (сеточным) уравнением для N переменных проекций вектора намагниченности $M_{iy} = |\vec{M}| \sin\theta_i$. Магнитное поле, создаваемое однородно

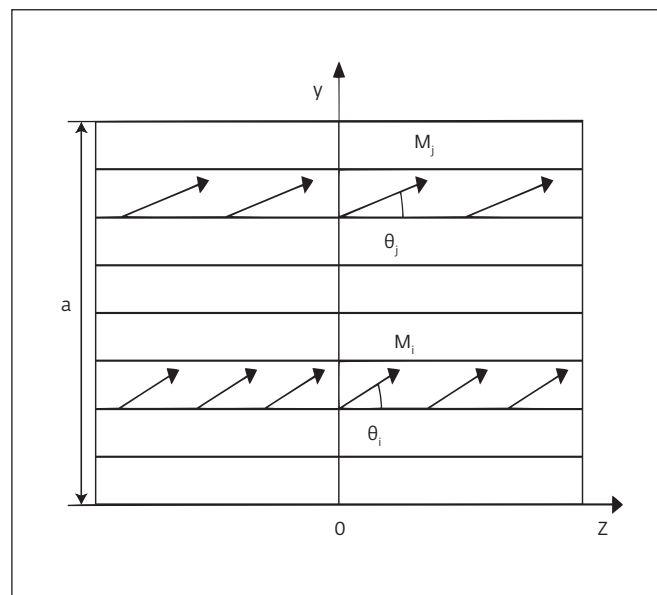


Рис.1. Визуализация метода одномерной неоднородности
Fig.1. Visualization of the one-dimensional heterogeneity method

намагниченными прямоугольными полосками, определяется аналитическими выражениями [4–5]. С учетом этого, решение вариационной задачи (1) сводится к решению системы N уравнений Лагранжа, которая в данном случае сводится к системе линейных уравнений относительно $\sin\theta_i$:

$$-\sum_{j=1}^N H_{ij} + H_a \sin\theta_i = H_0, \quad (7)$$

$$w_a = K(1 - (\vec{m} \cdot \vec{n})^2), \quad (2)$$

where K – uniaxial anisotropy constant, $\vec{n}$ – unit vector directed along the coordinate axis z , $\vec{m}$ – unit vector in the $\vec{M}$ direction.

Value w_m is density of magnetostatic energy defined by the expression

$$w_m = -\frac{1}{2}(\vec{M} \cdot \vec{H}_m), \quad (3)$$

where $\vec{H}_m$ – a magnetic field created by internal and surface magnetic "charges" and called a magnetostatic or demagnetizing field. The demagnetizing field $\vec{H}_m$ is determined by the equations of magnetostatics:

$$\text{rot } \vec{H}_m = 0, \quad (4)$$

$$\text{div}(\vec{H}_m + 4\pi\vec{M}) = 0 \quad (5)$$

The last term in (1) is the density of Zeeman energy:

$$w_H = -(\vec{M} \cdot \vec{H}_0) \quad (6)$$

The developed model of one-dimensional heterogeneity takes into account the features of the geometric parameters of the magneto-resistive (MR) strip. In case of the test sample, the strip length is an order of magnitude greater than the width. Thus, we can assume

that the heterogeneity of the distribution of magnetization at the ends of the strip is negligible.

To solve the variational problem (1) numerically, taking into account (2)–(6), we divide the integration region into N narrow strips, within which the distribution of the magnetization vector $\vec{M}_i$ can be considered homogeneous (see Fig.1). Then the continuous equation (1) can be replaced by a discrete (grid) equation for N variable projections of the magnetization vector $M_{iy} = |\vec{M}| \sin\theta_i$.

The magnetic field created by uniformly magnetized rectangular stripes is determined by

где

$$H_{ij} = 4 \left[\left[(j-i) \cdot \arctg\left(\frac{h}{2\Delta y(j-i)}\right) - (j-i+1) \cdot \arctg\left(\frac{h}{2\Delta y(j-i+1)}\right) \right] + \right. \\ \left. + \left[(j-i) \cdot \arctg\left(\frac{h}{2\Delta y(j-i)}\right) - (j-i-1) \cdot \arctg\left(\frac{h}{2\Delta y(j-i-1)}\right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{h}{4\Delta y} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{h}{2\Delta y}\right)^2 + (j-i)^2}{\left(\frac{h}{2\Delta y}\right)^2 + (j-i+1)^2} \right) + \frac{h}{4\Delta y} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{h}{2\Delta y}\right)^2 + (j-i)^2}{\left(\frac{h}{2\Delta y}\right)^2 + (j-i-1)^2} \right) \right] \cdot \sin\theta_i$$

Δy – ширина полосок разбиения (шаг сетки)
 Δy – split stripe width (grid spacing)

форм. (8)

form. (8)

Получив решение системы уравнений (7), можно вычислить изменение сопротивления в каждой МР-полоске, вызванное внешним магнитным полем $\vec{H}_0$, которое приложено перпендикулярно ОЛН (рис.1), в соответствии с формулой для АМР-эффекта [6]:

$$R_i = R_{i\perp} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cos^2\theta_i \right), \quad (9)$$

где $R_{i\perp}$ – сопротивление полоски при перпендикулярной ориентации вектора намагниченности по отношению ОЛН (вдоль оси y), $\Delta\rho/\rho$ – коэффициент магниторезистивного эффекта. Для исследуемого в нашем случае материала $\Delta\rho/\rho = 0,02$. Зная сопротивление каждой

полоски, несложно вычислить результирующее сопротивление R исходной полоски по формуле:

$$R_i = R_{i\perp} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2\theta_i \right), \quad (10)$$

где $R_{i\perp} = R_{i\perp} / N$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В чувствительном элементе АМРП применяются пермаллоевые (FeNi) АМР-полоски, а также полоски на основе сплава FeNiCo, с 6- и 20%-ным содержанием кобальта. Применение пермаллоя в АМРП позволяет достигать максимальных величин чувствительности. Но в настоящее время, несмотря на высокую чувствительность преобразователей на основе пермаллоя, этот материал реже применяется в конструкции АМРП из-за повышенных значений гистерезиса, магнитных шумов и температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Использование FeNiCo-сплава увеличивает поле магнитной анизотропии, расширяет диапазон измеряемого магнитного поля, увеличивает величину АМР-эффекта до 2,0-2,5%. При этом несколько падает чувствительность преобразователей, но уменьшаются их магнитные шумы, гистерезис и ТКС, в процессе перемагничивания АМР-полосок превалирует безгистерезисное вращение векторов намагниченности.

В работе [7] рассмотрены результаты экспериментальных исследований АМРП с нечетной передаточной характеристикой МР с полосками, под углами $\pm 45^\circ$ относительно ОЛН (рис.2). Это означает,

analytical expressions [4-5]. With this in mind, solving variational problem (1) reduces to solving a system of N Lagrange equations, which, in this case, reduces to a system of linear equations with respect to $\sin\theta_i$:

$$-\sum_{j=1}^N H_{ij} + H_a \sin\theta_i = H_0, \quad (7)$$

where (look at form. 8).

Having obtained the solution of the system of equations (7), we can calculate the change in resistance in each MR strip caused by an external magnetic field $\vec{H}_0$, which is applied perpendicular to the EMA (see Fig.1), in accordance

with the formula for the AMR effect [6]:

$$R_i = R_{i\perp} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cos^2\theta_i \right), \quad (9)$$

where $R_{i\perp}$ is the resistance of the strip at the perpendicular orientation of the magnetization vector with respect to the EMA (along the y axis), $\Delta\rho/\rho$ is the coefficient of the magnetoresistive effect. For the material studied in our case, $\Delta\rho/\rho = 0,02$. Knowing the resistance of each strip, it is easy to calculate the resulting resistance R of the original strip according to the formula:

$$R_i = R_{i\perp} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2\theta_i \right), \quad (10)$$

here $R_{i\perp} = R_{i\perp} / N$.

RESULTS

Permalloy (FeNi) AMP strips, as well as strips based on FeNiCo alloy, with 6 and 20 percent cobalt content are used in the AMRT sensitive element. The use of permalloy in AMRT allows to achieve maximum sensitivity values. But, at present, despite the high sensitivity of permalloy based converters, this material is less commonly used in the AMRT design, due to increased values of hysteresis,



что для устранения влияния гистерезиса перед измерением магнитного поля через проводник set/reset необходимо пропускать импульсы тока от 0,5 до 2,5 А длительностью не менее 2 мкс, в результате чего МР-полоски в соседних плечах мостовой схемы будут перемагничиваться в противоположные стороны. Расположение векторов намагниченности в мостовой схеме АМРП, установленное с помощью импульсов тока set/reset, в совокупности с расположением самих полосок относительно ОЛН создает нечетную ВЭХ с линейным участком.

Структурно такой АМРП магнитного поля представляет собой подложку с диэлектрическим слоем, на котором расположены четыре ряда МР-полосок с $\text{Ti(Ta)-FeNi(FeNiCo)-Ti(Ta)}$ металлической ферромагнитной наноструктурой. Над МР-полосками, вдоль каждого ряда, может быть сформирована планарная катушка offset со вторым защитным слоем. Катушка предназначена для устранения технологического разбаланса при измерении постоянного магнитного поля путем подачи в нее постоянного тока, создающего магнитное поле вдоль направления измеряемого поля. Проводник set/reset располагается над верхним изолирующим слоем (рис.2). Сверху сформирован защитный SiO_2 слой с окнами для контактных площадок.

При подаче в проводник set/reset импульса тока создаваемое им магнитное поле действует вдоль ОЛН на два ряда МР-полосок в одном направлении, а на два других ряда – в противоположном. Под действием магнитного поля, создаваемого импульсом тока в проводнике set/reset, векторы

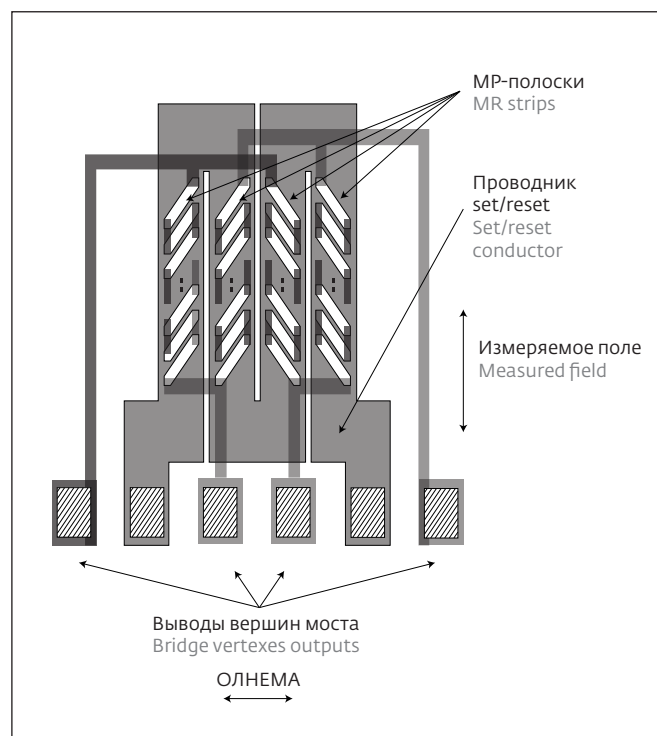


Рис.2. Конструкция АМРП

Fig.2. AMRT design

намагниченности в двух парах рядов МР-полосок повернутся в противоположные стороны.

При воздействии внешнего магнитного поля, направленного поперек ОЛН, все векторы намагниченности рядов МР-полосок поворачиваются в его направлении, причем в двух рядах МР-полосок

magnetic noise, and temperature coefficient of resistance (TCR). The use of FeNiCo alloy increases the magnetic anisotropy field, expands the range of the measured magnetic field and increases the magnitude of the AMR effect to 2.0–2.5%. In this case, sensitivity of the transducers somewhat decreases but their magnetic noise, hysteresis, and TCR decrease; during magnetization reversal of AMR strips, the hysteresis-free rotation of the magnetization vectors prevails.

In [7], the results of experimental studies of AMRT with an odd transfer characteristic of MR with

strips at angles of $\pm 45^\circ$ relative to the EMA were considered (see Fig.2). This means that to eliminate the influence of hysteresis before measuring the magnetic field through the set/reset conductor, it is necessary to pass current pulses from 0.5 to 2.5 A with duration of at least 2 μs , as a result of which the MR strips in the adjacent shoulders of the bridge circuit will be magnetized in opposite sides. The location of the magnetization vectors in the AMRT bridge circuit, established using the set/reset current pulses, in combination with the location of the strips themselves relative to the EMA,

creates an odd VOC with a linear section.

Structurally, such an AMRT of a magnetic field is a substrate with a dielectric layer on which four rows of MR strips with $\text{Ti(Ta)-FeNi(FeNiCo)-Ti(Ta)}$ metal ferromagnetic nanostructure are located. Above the MP strips, along each row, a planar offset coil with a second protective layer can be formed. The coil is designed to eliminate technological imbalance in the measurement of a constant magnetic field by applying a direct current to it, creating a magnetic field along the direction of the measured field. The set/

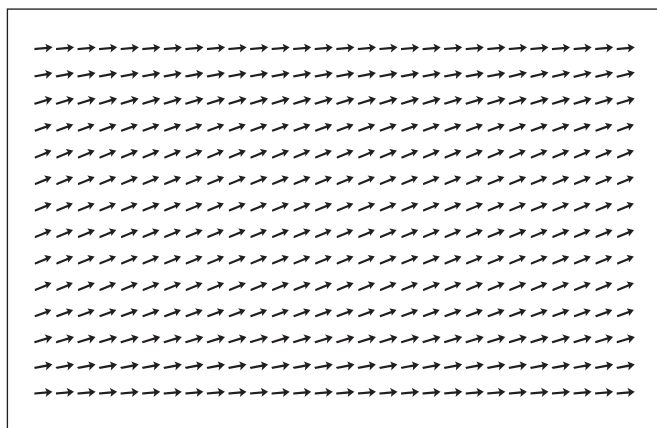


Рис. 3. Визуализация распределения намагниченности в полоске состава FeNi, рассчитанная при помощи пакета OOMMF

Fig.3. Visualization of magnetizability distribution in FeNi strip calculated using OOMMF software

угол между вектором намагниченности и ОЛН увеличивается, а в двух других – уменьшается. Следовательно, увеличиваются и уменьшаются углы между векторами намагниченности и направлениями тока в полосках. Таким образом, мостовая схема разбалансируется, и на выходе АМРП магнитного поля появляется выходной сигнал, полярность которого зависит от направления измеряемого магнитного поля, при этом формируется нечетная ВЭХ преобразователя.

Теоретическое исследование описанных выше образцов затруднено в первую очередь тем, что

структура возникающих магнитных неоднородностей может быть самой разнообразной [8, 9]. В образце могут возникать магнитные домены различного вида, разделенные доменными границами [10], которые могут содержать субдоменные структуры (блоховские линии, точки) [11]. Механизм перемагничивания таких структур под действием внешнего магнитного поля сложен для теоретического представления.

Проведенные коллективом исследования в рамках математического пакета для микромагнитного моделирования OOMMF [12] для описанных выше структур и сравнение с экспериментальными данными позволили выявить следующую закономерность. В центральной части полоски не наблюдается сложных двумерных микромагнитных структур и доменов (рис.3), а неоднородности на краях практически не влияют на результирующее магнитосопротивление, так как длина полоски на порядок превышает ее ширину. Также можно отметить тот факт, что неоднородность распределения намагниченности в центральной части является одномерной, что позволяет использовать разработанную нами МОН, описанную выше.

На рис.4–5 представлено сравнение эксперимента с теоретическими расчетами при помощи пакета OOMMF, а также с использованием МОН. Линейный характер экспериментальных зависимостей выходного напряжения от величины внешнего магнитного поля дополнительно свидетельствует об отсутствии сложных магнитных структур в образце.

reset conductor is located above the upper insulating layer (see Fig.2). A protective SiO_2 layer with windows for contact pads is formed on top.

When a current pulse is applied to the set/reset conductor, the magnetic field created by it acts along the EMA on two rows of MR strips in one direction, and on the other two rows in the opposite direction. Under the action of the magnetic field created by the current pulse in the set/reset conductor, the magnetization vectors in two pairs of rows of MR strips will turn in opposite directions.

Under the action of an external magnetic field directed across the

EMA, all the magnetization vectors of the rows of MR strips rotate in its direction, and in two rows of MR strips, the angle between the magnetization vector and OLS increases, and decreases in the other two. Consequently, the angles between the magnetization vectors and the current directions in the strips increase and decrease. Thus, the bridge circuit will be unbalanced, and an output signal appears at the AMRT output of the magnetic field which polarity depends on the direction of the measured magnetic field, and an odd VOC of the converter is formed.

A theoretical study of the samples described above is hindered, first of all, by the fact that the structure of the arising magnetic inhomogeneities can be very diverse [8, 9]. Various types of magnetic domains may appear in the sample, separated by domain boundaries [10], which may contain subdomain structures (Bloch lines, points) [11]. The magnetization reversal mechanism of such structures under the action of an external magnetic field is complicated for theoretical presentation.

The research team, within the framework of the mathematical package for micromagnetic

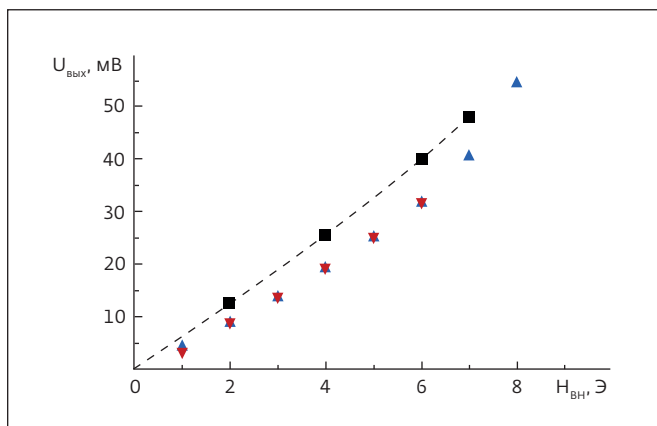


Рис.4. ВЭХ АМРП на основе FeNiCo_6 . Пунктирной линией показан эксперимент, $\blacktriangle$ – МОИ, $\blacktriangledown$ – расчет при помощи ООММФ

Fig.4. VAC of AMRT based on FeNiCo_6 . Dash line – experimental data, $\blacktriangle$ – MODH, $\blacktriangledown$ – calculations using OOMMF software

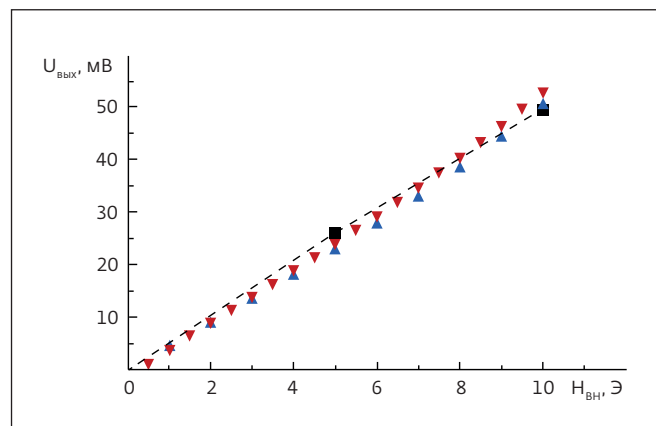


Рис.5. ВЭХ АМРП на основе FeNiCo_{20} . Пунктирной линией показан эксперимент, $\blacktriangle$ – МОИ, $\blacktriangledown$ – расчет при помощи ООММФ

Fig.5. VAC of AMRT based on FeNiCo_{20} . Dash line – experimental data, $\blacktriangle$ – MODH, $\blacktriangledown$ – calculations using OOMMF software

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования АМРП магнитного поля с линейной нечетной ВЭХ и различным содержанием кобальта в наклонных полосках показывают, что преобразователь обладает техническими характеристиками на современном

уровне. Разработанная теория одномерной неоднородности согласуется с экспериментальными данными и приводит к хорошему совпадению расчетной и экспериментальной кривых ВЭХ. Описанная теория распределения векторов намагниченности будет справедлива и для



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА



17-19

СЕНТЯБРЯ
2020

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

ВЕДУЩЕЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА

+7 812 320 9032 | bolgova@restec.ru | ptfair.ru



случая наноструктур с гигантским МР-эффектом, разработка которых активно ведется в настоящее время.

Исследование параметров АМРП осуществлялось с помощью специализированного оборудования ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр".

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Касаткин С.И., Жуков Д.А., Крикунов А.И., Амеличев В.В., Костюк Д.В., Васильев Д.В. Наноструктуры с магнитострикционным и магниторезистивным эффектом для устройств магнитной стрейнтроники // Датчики и Системы. 2019. № 3 (234). С. 3–7.
2. Амеличев В.В., Гамарц И.А., Касаткин С.И., Муравьев А.М. и др. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 22–24.
3. Heinrich B., Cochran J.F. Ultrathin metallic magnetic films: magnetic anisotropies and exchange interactions // Advances in Physics. 1993. V. 42. No. 5. P. 523–639.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Т. 8. – М., 1982.
5. Engel-Herbert R., Hesjedal T. Calculation of the magnetic stray field of a uniaxial magnetic domain // Journal of Applied Physics. 2005. V. 97. Iss. 7. P. 074504.
6. Вагин Д.В., Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Точное аналитическое выражение для индукции магнитного поля образца прямоугольной формы // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2008. № 6. С. 54–56.
7. Tang D., Lee Y. Magnetoresistance effects. Magnetic Memory: Fundamentals and Technology. Cambridge University Press, 2010.
8. Дубовик М.Н., Филиппов Б.Н. Доменная структура и кривые намагничивания пленок с перпендикулярной анизотропией // Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 11. С. 1083–1092.
9. Urbaniak M., Stobiecki F., Szymanski B. Magnetic and magnetoresistive properties of NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy of Co layers // Journal of Applied Physics. 2007. V. 101. Iss. 1. P. 013905.
10. Middelhoek S. Domain Walls in Thin Ni-Fe Films // Journal of Applied Physics. 1963. V. 34. Iss. 4. P. 013905.
11. Дубовик М.Н., Зверев В.В., Филиппов Б.Н. Нелинейная перестройка структуры доменных границ в тонкой пленке с одноосной плоскостной анизотропией // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 11. С. 1226–1244.
12. Материалы сайта National Institute of Standards and Technology (Math, Statistics, and Computational Science) (<https://math.nist.gov/oommf>) (дата обращения – 18.03.2020).

simulation OOMMF [12] for the structures described above and comparison with experimental data, revealed the following regularity. In the central part of the strip, complex two-dimensional micromagnetic structures and domains are not observed (see Fig.3), and inhomogeneities at the edges practically do not affect the resulting magnetoresistance, since the length of the strip is an order of magnitude greater than its width. It can also be noted that the heterogeneity of the distribution of magnetization in the central part is one-dimensional, which allows us to use the MODH developed by us and described above.

Figures 4–5 show comparisons of the experiment with theoretical calculations using the OOMMF software package, and with use of the MODN. The linear nature of the experimental dependences of the output voltage on the magnitude of the external magnetic field additionally indicates the absence of complex magnetic structures in the sample.

CONCLUSIONS

An experimental study of AMRT of a magnetic field with a linear odd VOC and various cobalt content in inclined stripes shows that the converter has state-of-the-art technical

characteristics. The developed theory of one-dimensional inhomogeneity is consistent with experimental data and leads to good agreement between the calculated and experimental curves of the VOC. The described theory of the distribution of magnetization vectors will also be valid for the case of nanostructures with a giant MR effect, which are being actively developed at present.

The study of AMRT parameters was carried out using specialized equipment of the central control center "Functional control and diagnostics of micro- and nanosystem equipment" on the basis of SMC "Technological Centre". ■

**НОВЫЕ
ДАТЫ**

25–26.08

SEMIEXPO RUSSIA

SEMIEXPO Russia объединяет международную специализированную выставку с двухдневной деловой программой, где ежегодно принимают участие руководители, эксперты, топ-менеджеры крупнейших компаний по микроэлектронике, представители органов государственной власти, научно-исследовательских институтов и международных ассоциаций.

Программные мероприятия на SEMIEXPO Russia 2020

SEMI Member Forum 2020

Международный MEMS Forum

Новый этап конкурса
«Инновационная радиоэлектроника»

Обзор карьерных возможностей
и ежегодный День Талантов

Экспортные перспективы.
Открытый диалог с зарубежными
рынками

Экспозиция кластеров из Европы и
Азии

МОСКВА

ЭКСПОЦЕНТР

25 – 26 АВГУСТА 2020

ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ, МАТЕРИАЛАМ, СТАНДАРТАМ И ОБОРУДОВАНИЮ В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Больше информации на официальном сайте

www.semiexpo.ru

 **@semiexporussia**



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphera.ru



Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru