

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

УДК 53.082.743

Преобразователи магнитного поля на основе анизотропных магниторезистивных тонкопленочных структур для работы в широком диапазоне температур

Н.А. Дюжев¹, Н.С. Мазуркин¹, В.С. Поздняков², А.С. Юров¹, М.Ю. Чиненков^{1,3}

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²ОАО «Автоэлектроника» (г. Калуга)

³ООО «СПИНТЕК» (г. Москва)

Magnetic Field Sensors Based on Anisotropic Magnetoresistive Thin-Film Structures for Work in a Wide Temperature Range

N.A. Djuzhev¹, N.S. Mazurkin¹, V.S. Pozdnyakov², A.S. Iurov¹, M.Y. Chinenkov^{1,3}

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow

²JSC Avtoelektronika

³«SPINTEK» LLC, Moscow

Представлены результаты работ по созданию и оптимизации геометрии преобразователей магнитного поля на основе анизотропных магниторезистивных тонкопленочных структур. Получены преобразователи магнитного поля с нечетной характеристикой с чувствительностью до 23,7 (мВ/В)/(кА/м) и 180-градусный преобразователь угла поворота с амплитудой сигнала 15 мВ/В. На основе проведенных термических испытаний показана возможность эксплуатации разработанных преобразователей в жестких внешних условиях в диапазоне температур от -60 до $+150$ °С, температурный коэффициент чувствительности при этом составляет $-0,35$ %/°С. Полученные преобразователи апробированы в датчиках угла поворота, оборотов и фазы в автомобильной промышленности. Характеристики разработанных преобразователей показали соответствие аналогам ведущих мировых фирм.

Ключевые слова: анизотропный магниторезистивный эффект; сенсор магнитного поля; магнитные пленки; датчик углового положения; датчик угла поворота; датчик оборотов; датчик фазы.

The results of the work on creation of the design and geometry optimization of the magnetic field sensors based on anisotropic magnetoresistive thin-film structures have been presented. The magnetic field sensors with an odd linear response with the sensitivity up to 23.7 (mV/V)(kA/m) and 180 degree rotation sensor with the signal amplitude 15 mV/C have been obtained. The possibility of the developed

© Н.А. Дюжев, Н.С. Мазуркин, В.С. Поздняков, А.С. Юров, М.Ю. Чиненков, 2015

sensors functionality in hard environments in the temperature range from minus 60 up to +150 °C based on the thermal tests results has been demonstrated. The temperature coefficient of sensitivity was minus 0.35% °C. The sensors have been tested in the angle, speed and phase sensors in the automotive industry. The characteristics of the developed sensors have shown that they match the characteristics of the sensors produced by the leading world firms.

Keywords: anisotropic magnetoresistive effect, AMR, magnetic field sensor, magnetic thin film, angular position sensor, rotation sensor, phase sensor.

Введение. Создание устройств измерения магнитного поля на основе тонких магнитных пленок представляет значительный интерес. Эффект изменения сопротивления металлов, в частности железа и никеля, в магнитном поле открыт достаточно давно, однако длительное время это явление практически не использовалось в технике. Развитие технологии получения тонких металлических пленок и обнаружение эффекта магнитосопротивления в пленках сплавов железо – никель, никель – кобальт открыли возможность создания на основе этих пленок эффективных устройств измерения магнитного поля. Высокая чувствительность к магнитному полю стимулировала интерес к ним сначала как к детекторам цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) в устройствах памяти, затем как к основе построения головок считывания информации с магнитных носителей. Первое направление не получило развития в связи с прекращением работ по созданию ЦМД-устройств, второе развивалось в основном по пути использования гигантского магниторезистивного эффекта (ГМР-эффект) [1].

Существует разновидность магниторезистивного эффекта, называемая анизотропным магниторезистивным эффектом (АМР-эффект), который в настоящее время используется в качестве основы для построения высокоэффективных устройств измерения магнитного поля. Этот эффект наблюдается в анизотропных магнитных пленках, при этом величина изменения сопротивления составляет от 1,5 до 3,9 % в зависимости от материала тонкой магнитной пленки [2–4]. Преобразователи на основе АМР-эффекта представляют собой один слой резистивного материала, тогда как преобразователи на основе ГМР-эффекта предполагают наличие нескольких магнитных слоев с различными свойствами [5]. В последнее время появились сообщения о создании новых преобразователей, состоящих из периодически чередующихся nanoостровковых слоев магниторезисторов, в частности $(\text{FeNi-Co})_N$, где N – количество парных слоев, которые при том же значении магнитосопротивления 2–3% способны регистрировать сверхмалые магнитные поля $\sim 10^{-6}$ Э [6, 7]. Все это свидетельствует о больших потенциальных возможностях подобных преобразователей [8].

Характеристики тонких пленок пермаллоя. В Научно-технологическом центре «Нано- и микросистемная техника» МИЭТ получены тонкие пленки пермаллоя (сплав 80% Ni 20% Fe), обладающего магниторезистивным эффектом $\sim 2,2$ % [9, 10]. Коэрцитивная сила пленок составляет ~ 80 А/м, а поле анизотропии ~ 400 А/м. Пленки пермаллоя получены магнетронным распылением и после напыления их магниторезистивный эффект составлял $\sim 1,0$ %. Отжиг в вакууме в магнитном поле 12 кА/м в течение 3 ч позволил уменьшить удельное сопротивление пленки и увеличить магниторезистивный эффект до 2,2 %, не оказав существенного влияния на магнитные параметры пленки.

На основе полученных пленок разработаны преобразователи магнитного поля с четной и нечетной передаточной характеристикой. Структуры представляют собой четыре магниторезистора, соединенных в мостовую схему. Такое расположение магниторезисторов позволяет получить выходной сигнал, составляющий десятки милливольт

на фоне напряжения питания порядка нескольких вольт, а также минимизировать отрицательное воздействие изменения температуры окружающей среды.

Преобразователи с четной передаточной характеристикой. Преобразователь с четной передаточной характеристикой представляет собой четыре магниторезистора в виде полоски тонкой магнитной пленки толщиной 0,03 мкм с контактными площадками из алюминия толщиной ~ 0,6 мкм. Магниторезисторы в разных плечах моста повернуты друг относительно друга на 90°, в результате чего обеспечивается изменение сопротивления всех резисторов при воздействии планарного магнитного поля. Передаточная характеристика такого преобразователя приведена на рис.1. Характерная особенность данного преобразователя состоит в практически полном отсутствии линейных участков. Преобразователи обладают высоким выходным сигналом (~ 20 мВ/В), однако их характеристика нелинейна, что создает серьезные трудности при измерении магнитных полей, и не позволяет определять полярность магнитного поля.

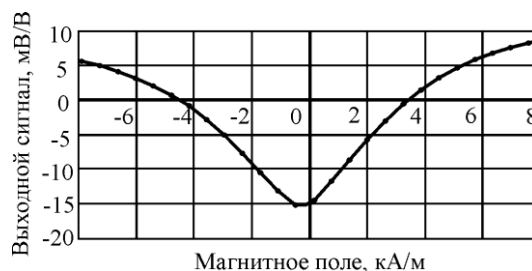
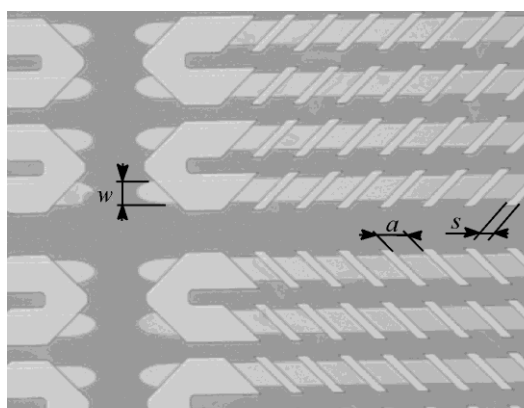
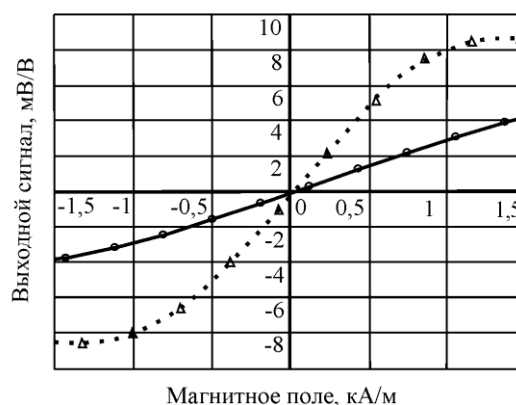


Рис.1. Четная передаточная характеристика преобразователя

Преобразователи с нечетной передаточной характеристикой. Более широкие возможности имеют преобразователи магнитного поля с нечетной передаточной характеристикой, общий вид такого преобразователя показан на рис.2,а. Структура представляет собой полоску магнитной пленки толщиной 0,03 мкм, на которой под углом 45° к оси магнитной пленки расположены тонкие полоски материала (алюминия) с высокой проводимостью. Это позволяет линеаризовать характеристику и сделать ее нечетной (рис.2,б). В силу этих обстоятельств преобразователи с нечетной передаточной характеристикой получили более широкое распространение по сравнению с традиционными датчиками Холла.



а



б

Рис.2. Фрагмент топологии преобразователя с нечетной передаточной характеристикой (а) и его передаточная характеристика (б): — чувствительность 3,4 (мВ/В)/(кА/м) ($w = 10$ мкм, $a = 15$ мкм, $s = 6$ мкм); \cdots чувствительность 9,7 (мВ/В)/(кА/м) ($w = 40$ мкм, $a = 6$ мкм, $s = 6$ мкм)

Разработанные преобразователи имеют различную геометрию, в частности разные ширину магнитного слоя, размеры полосок и расстояния между ними. В результате проведенных исследований установлена однозначная связь геометрии структуры и ее

чувствительности. Чувствительность преобразователя определяется как отношение величины выходного сигнала (напряжения разбаланса моста при воздействии магнитного поля) к величине магнитного поля, при котором проводились измерения, на линейном участке характеристики. Величина выходного сигнала обычно берется как отношение к напряжению питания структуры. Исследованные структуры имеют широкий спектр значений чувствительности – от 3,4 до 9,7 (мВ/В)/(кА/м). Установлено, что преобразователи с шириной магнитной полосы (пермаллоя) 30 и 40 мкм и расстоянием между полосками алюминия 6 и 10 мкм имеют наибольшие значения чувствительности (рис.2,б). Графики на рис.2,б сняты при поле подмагничивания (вдоль полосы пермаллоя), равном 1 кА/м, что необходимо для подавления явления гистерезиса передаточной характеристики. Однако приложение такого поля оказывает и негативное влияние: приводит к уменьшению чувствительности.

Проведены измерения при различных значениях поля подмагничивания, результаты которых показаны на рис.3. Из рисунка видно, что на одном и том же преобразователе, изначально имеющем чувствительность 9,7 (мВ/В)/(кА/м) в поле подмагничивания 1 кА/м, может быть достигнута чувствительность 23,7 (мВ/В)/(кА/м) при уменьшении поля подмагничивания до 0,1 кА/м. Иными словами, чувствительность структуры с одной и той же геометрией может быть изменена в достаточно широких пределах с помощью поля подмагничивания. Важным обстоятельством является то, что при поле смещения всего 0,3 кА/м, гистерезис не превышает значения 1%. Преобразователи с такими значениями чувствительности могут быть использованы в самых различных областях, начиная с регистрации магнитных полей до построения на их основе различных датчиков, таких как датчики тока, оборотов, линейного и углового перемещения и др. Преобразователи с высоким значением чувствительности (23,7 (мВ/В)/(кА/м)) пригодны для построения на их основе магнитометрических датчиков, способных измерять магнитное поле Земли, и по характеристикам (таблица) соответствуют аналогичным преобразователям ведущих мировых фирм [11–15].

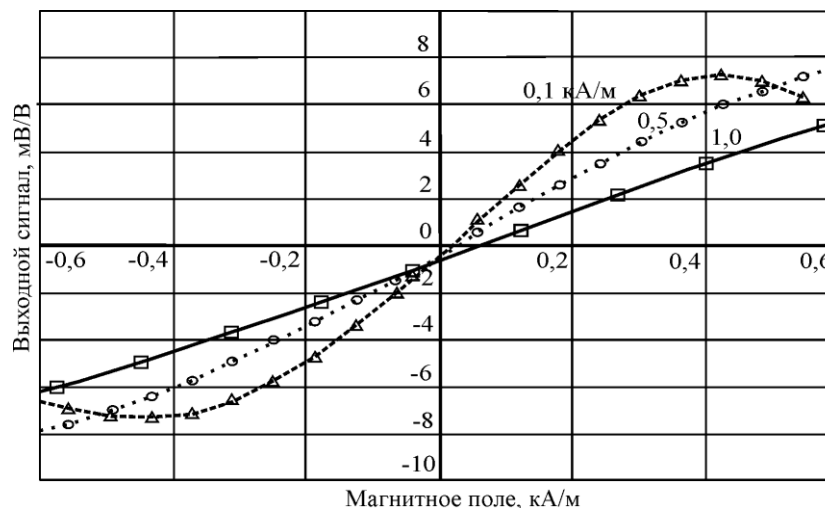


Рис.3. Передаточная характеристика в зависимости от поля подмагничивания:
 — чувствительность 9,7 (мВ/В)/(кА/м); ····· чувствительность 15,0 (мВ/В)/(кА/м);
 - - - чувствительность 23,7 (мВ/В)/(кА/м)

Сравнение разработанного преобразователя магнитного поля с нечетной характеристикой с зарубежными и отечественными аналогами

Преобразователь	Чувствительность, (мВ/В)/(кА/м)	Рабочее поле, кА/м	Литературный источник
МРС10Н (разработанный)	23,7	$\pm 0,10$	–
НМС1001 (Honeywell)	40	$\pm 0,16$	[12]
КМЗ10А1 (Philips)	22,0	$\pm 0,05$	[13]
МРЧЭ237 (ОАО «НПО ИТ» (г. Королёв)	6,3	$\pm 1,6$	[14]
АМРП на основе FeNi (НПК «Технологический центр», г. Москва)	8,8	$\pm 0,25$	[15]

Преобразователи угла поворота. На основе анизотропных магниторезистивных структур разработан преобразователь угла поворота. Следует отметить, что в качестве такого преобразователя может использоваться и описанная структура. Однако такая структура может обеспечить измерение угла только в диапазоне $0-90^\circ$ ($\pm 45^\circ$), что в большинстве случаев недостаточно. Поэтому разработан преобразователь, представляющий собой два магниторезистивных моста, повернутых друг относительно друга на 45° (рис.4,а). Передаточная характеристика этого преобразователя представляет собой два синусоидальных сигнала, сдвинутых на 45° (рис.4,б). Дальнейшая обработка этих сигналов микропроцессором позволяет получить линейную функцию зависимости выходного сигнала преобразователя от угла поворота магнитного поля.

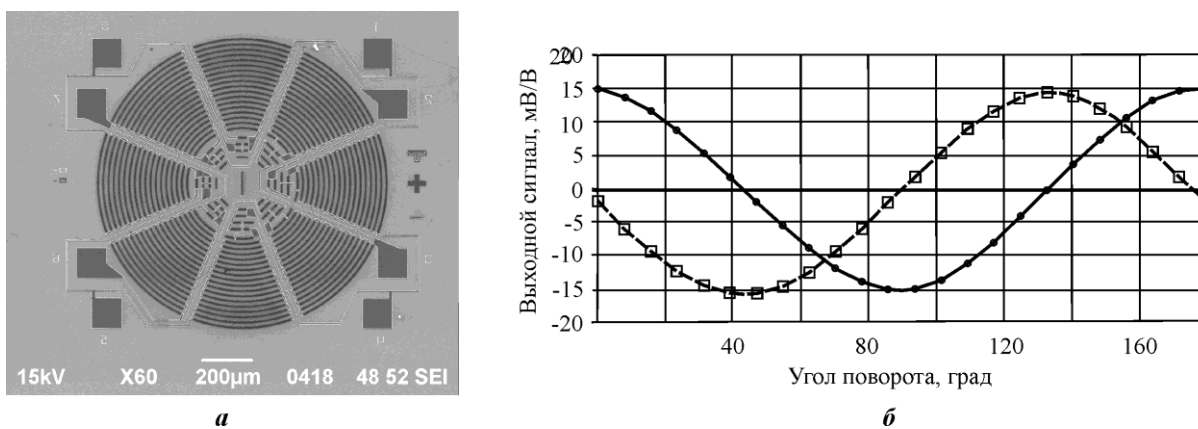


Рис.4. Общий вид преобразователя угла поворота (а) и его передаточная характеристика (б)

Значительный интерес представляет исследование работы анизотропных магниторезистивных преобразователей в широком диапазоне температур и в жестких условиях эксплуатации. Проведены измерения передаточной характеристики анизотропных преобразователей с нечетной передаточной характеристикой в диапазоне температур от -40 до $+150^\circ\text{C}$. Результаты измерений приведены на рис.5. При увеличении температуры происходит уменьшение чувствительности преобразователя, тогда как при понижении – увеличение. Изменение чувствительности составляет $-0,35\% / ^\circ\text{C}$, что позволяет сделать вывод о возможности использования структур в самых жестких условиях эксплуатации как в автомобильной электронике, так и в системах специального назначения. Возможно расширение диапазона рабочих температур до $+170^\circ\text{C}$, что, однако, ограничено материалом корпуса структур.

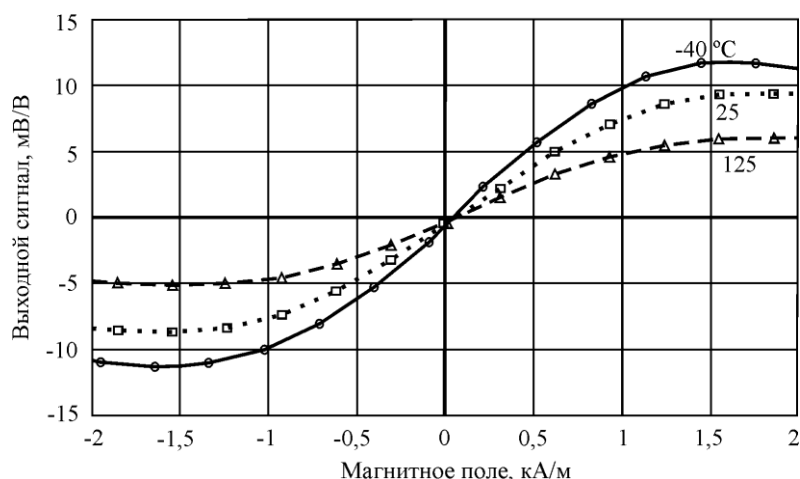


Рис. 5. Передаточная характеристика преобразователя с нечетной передаточной характеристикой в зависимости от температуры

Заключение. Результаты, приведенные в настоящей работе (см. таблицу), дают основания считать, что разработанные магниторезистивные преобразователи могут использоваться в качестве датчиков магнитного поля для самых различных областей применения, включая автомобильную электронику и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России с использованием оборудования ЦКП МСТ и ЭКБ (ГК № 14.578.21.0007, уникальный идентификатор соглашения RF MEF157814X0007).

Литература

1. Перенос спинов и микроволновые автоколебания в магнитных гетероструктурах с гигантским магнитосопротивлением / В.И. Корнеев, А.Ф. Попков, Г.Д. Демин и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2011. – № 5 (91). – С. 5–17.
2. *Dibbern U.* Magnetoresistive sensors // Sensors. A comprehensive survey / Ed. W.G Gopel, J. Hesse, J.N. Zemel. – N. Y.: VCH, 1989. – P. 341–380.
3. *Mapps D.J.* Magnetoresistive sensor // Sensors and Actuators A: Physical. – 1997. – Vol. 59. – P. 9–19.
4. *Hauser H., Stangl G., Janiba M., Giouroudi I.* Measurements, technology and layout of sensitive anisotropic magnetoresistive sensors // J. of Electrical Engineering. – 2006. – Vol. 57. – No. 8/s. – P. 171–174.
5. *B. Dieny* Giant magnetoresistance in spin-valve multilayers // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 1994. – Vol. 136, N. 3. – P. 335–359.
6. *Болтаев А.П., Пудонин Ф.А., Шерстнев И.А.* Особенности магнитосопротивления многослойных систем магнитных наностроек в слабых магнитных полях // ФТТ. – 2011. – Т. 53. – № 5. – С. 892–898.
7. *Boltaev A.P., Pudonin F.A., Sherstnev I.A.* Conductance of island and granular metal films // Solid State Communications. – 2014. – Vol. 180. – P. 39–43.
8. *Тимошенков С.П., Кульчицкий А.П.* Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Изв. вузов. Электроника. – 2012. – № 6 (98). – С. 51–74.
9. Магниторезистивные структуры в устройствах наноэлектроники и микросистемной техники / В.А. Беспалов, Н.А. Дюжнев, А.Ф. Попков и др. // Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. – М.: Техносфера, 2013. – С. 531–591.
10. Особенности применения магниторезистивных наноструктур в датчиках автомобильных электронных систем / В.А. Беспалов, Н.А. Дюжнев, А.С. Юров и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 11. – С. 48–54.
11. www.nxp.com (дата обращения: 26.07.2014)
12. www.honeywell.com/magneticsensors (дата обращения: 26.07.2014)
13. Magnetic field sensors data sheet. – URL: www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17838/PHILIPS/KMZ10A1.html (дата обращения: 26.07.2014)

14. http://www.npoit.ru/products?view=item&item_id=134 (дата обращения: 26.07.2014)

15. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе магниторезистивных наноструктур с различным содержанием кобальта / *А.А. Резнев, В.В. Амеличев, С.И. Касаткин и др.* // Нано- и микросистемная техника. – 2010. – Т. 115. – №. 2. – С. 22–24.

Статья поступила
1 августа 2014 г.

Дюжев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, директор Научно-технологического центра «Нано- и микросистемная техника» МИЭТ (НТЦ «НМСТ»). *Область научных интересов:* нано- и мембранная технологии, вакуумная и плазменная электроника, СВЧ-электроника, нано- и микроструктуры.

Мазуркин Никита Сергеевич – инженер НТЦ «НМСТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* спиновый транспорт, магнетизм. **E-mail:** edenlab@mail.ru

Поздняков Вячеслав Сергеевич – главный конструктор СКБ ОАО «Автоэлектроника» (г. Калуга). *Область научных интересов:* разработка датчиков для автоэлектроники.

Юров Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории НТЦ «НМСТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* физика магнитных пленок, магнитные сенсоры, датчики на основе магнитных сенсоров.

Чиненков Максим Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НТЦ «НМСТ» МИЭТ, генеральный директор ООО «СПИНТЕК» (г. Москва). *Область научных интересов:* магнетизм, спинтроника, магнитные гетероструктуры, компьютерное моделирование физических явлений.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2015 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 1000 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05. E-mail: magazine@miee.ru

<http://www.miet.ru/structure/s/894/e/12152/191>