

Развитие технологий магнитополупроводниковых микросистем

*В.В. Амеличев^{1,2}, И.Е. Абанин¹, В.В. Аравин³, Д.В. Костюк^{1,2},
С.И. Касаткин⁴, А.А. Резнев³, А.Н. Сауров^{1,5}*

¹НПК «Технологический центр» (г. Москва)

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

³ФГКУ «Войсковая часть 68240» (г. Москва)

⁴Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (г. Москва)

⁵Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (г. Москва)

Development of Magneto-Semiconductor Microsystems Technology

*V.V.Amelichev^{1,2}, I.E.Abanin¹, V.V.Aravin³, D.V.Kostyuk^{1,2},
S.I.Kasatkin⁴, A.A.Reznev³, A.N.Saurov^{1,5}*

¹SMC «Technological centre», Moscow

²National Research University of Electronic Technology, Moscow

³FGSI «Мр 68240», Moscow

⁴V.A. Trapeznikov Institute of control sciences of Russian Academy
of Sciences, Moscow

⁵INME RAS, Moscow

Представлены результаты развития технологий магнитополупроводниковых микросистем на основе многослойных тонкопленочных магниторезистивных наноструктур. Дан краткий обзор основных достижений в области создания магнитометрических приборов на основе анизотропного и гигантского магниторезистивных эффектов.

Ключевые слова: анизотропный магниторезистивный эффект; гигантский магниторезистивный эффект; магниторезистивная наноструктура; магнитополупроводниковая микросистема; тонкопленочная технология.

The results of the development of technologies for magnetic semiconductor chips based on thin-film magnetoresistive multilayer nanostructures are presented. A brief overview of the main achievements in the field of magnetometric devices based on anisotropic and giant magnetoresistive effect is made.

Keywords: anisotropic magnetoresistive effect; giant magnetoresistive effect; magnetoresistive nanostructure; magneto-semiconductor microsystem; thin film technology.

Введение. Рынок магнитополупроводниковых микросистем – один из наиболее интенсивно развивающихся. Ведутся работы по созданию запоминающих устройств с произвольной выборкой, логических наноэлементов, датчиков и преобразователей магнитного поля и тока, считывающих головок, гальванических развязок, спиновых тран-

зисторов и биосенсорных устройств. Магнитополупроводниковые микросистемы появились в результате синтеза двух технологий – магниторезистивной, на основе тонких пленок, и полупроводниковой, на основе кремниевых интегральных структур. К уникальным характеристикам элементов на основе магниторезистивных наноструктур следует отнести неограниченное число циклов перезаписи для запоминающих элементов, широкий температурный диапазон работы, радиационную стойкость, высокие чувствительность и быстродействие [1].

Наиболее распространен анизотропный магниторезистивный (АМР) эффект, который проявляется в зависимости величины сопротивления ферромагнитной пленки от угла между вектором ее намагниченности и направлением тока через нее. Основными применениями наноструктур с АМР эффектом являются преобразования слабого магнитного поля, тока и угла поворота.

С открытием нескольких типов гигантского магниторезистивного (ГМР) эффекта, многократно превышающего АМР эффект, в настоящее время интенсивно развиваются новые технологии для новых магнитополупроводниковых приборов и устройств с более широкими функциональными возможностями. Наибольший практический интерес представляют две разновидности ГМР эффекта: спин-вентильный магниторезистивный (СВМР) и спин-туннельный магниторезистивный (СТМР) эффекты. Коэффициент СВМР эффекта достигает нескольких десятков процентов, а для СТМР эффекта известны значения до нескольких сотен процентов [2, 3].

Анизотропные магниторезистивные микросистемы преобразования. В НПК «Технологический центр» в период с 2001 по 2007 гг. разработаны и изготовлены различные конструкции тонкопленочных магниторезистивных преобразователей магнитного поля (ПМП) на основе наноструктур с АМР эффектом. Данные конструкции имеют чувствительность к внешнему магнитному полю на уровне 0,4–1,0 мВ/(В·Э) и четный или нечетный вид вольт-эрстедной характеристики (ВЭХ) [4].

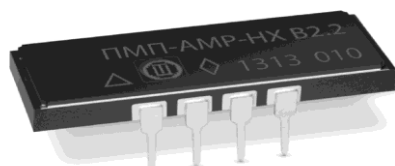


Рис. 1. Внешний вид микросистемы ПМП-АМР-НХ

В период с 2008 по 2013 гг. разработаны и освоены в производстве НПК «Технологический центр» новые конструктивные решения с использованием технологий микросистемной техники, позволяющие улучшить характеристики ПМП на АМР эффекте. Новые магнитополупроводниковые микросистемы в герметичном немагнитном корпусе CDIP8 имеют чувствительность до 6 мВ/(В·Э). Их

основу составляют четыре тонкопленочных магниторезистора с АМР эффектом, соединенных в мостовую схему, интегральные катушки подмагничивания и интегрированные в кристалл концентраторы магнитного поля [5]. Внешний вид микросистемы преобразования магнитного поля на основе АМР эффекта с нечетной характеристикой выходного сигнала (ПМП-АМР-НХ) показан на рис. 1.

Магнитополупроводниковая микросистема ПМП-АМР-НХ имеет два типовых номинала сопротивлений и чувствительности:

	ПМП-АМР-НХ-В2.1	ПМП-АМР-НХ-В2.2
Сопротивление моста, кОм.....	0,6–1,2	1,5–2,5
Чувствительность		
к магнитному полю, мВ/(В·Э)	3,5–6,0	2,5–3,5
Диапазон магнитного поля, мТл	±0,1	±0,2

На рис.2 показаны ВЭХ микросистем ПМП-АМР-НХ-В2.1 и ПМП-АМР-НХ-В2.2.

Разработанные магнитополупроводниковые микросистемы на основе АМР эффекта могут применяться в приборах и устройствах радиоэлектронной аппаратуры как гражданского, так и специального назначения. В рамках выполненных ОКР 2010–2013 гг. опытные образцы успешно прошли испытания надежности, безотказности и стойкости к внешним воздействующим и специальным факторам.

Многослойные наноструктуры с ГМР эффектом. Магниточувствительные элементы с ГМР эффектом формируются на основе наноструктурированных многослойных тонких пленок. Технологический процесс формирования таких многослойных пленок проводится на установке магнетронного напыления с пятью мишенями. Особенностью данной технологии является прецизионное формирование разделительных слоев толщиной 2–3 нм. Величина СВМР эффекта зависит от качества разделительного слоя меди между двумя ферромагнитными пленками [6]. При определенной оптимизации данного технологического процесса можно добиться получения многослойных наноструктур с ГМР эффектом до 25%.

Особенностью преобразователей магнитного поля на основе СВМР эффекта является четная ВЭХ. При этом в конструкции спин-вентильных магниторезистивных ПМП применяются толстопленочные концентраторы магнитного поля, полученные электрохимическим осаждением. Чувствительность ПМП на СВМР эффекте зависит от зазора между концентраторами и составляет от 3 до 18 мВ/(В·Э) [6].

Изготовленные в НПК «Технологический центр» наноструктуры обладают СВМР эффектом на уровне 5–15 %. На рис.3 показана зависимость изменения сопротивления спин-вентильной магниторезистивной наноструктуры Ta/CoFeNi/CoFe/Cu/CoFe/CoFeNi/FeMn/Ta от внешнего магнитного поля. Перемагничивание магниточувствительного слоя такой наноструктуры происходит в магнитных полях с напряженностью 7–10 Э. Фиксированный слой формируется из того же сплава, что и магниточувствительный, его фиксация обеспечивается за счет антиферромагнитного слоя из сплава FeMn, а его перемагничивание происходит в полях с напряженностью 200–300 Э.

Контроль параметров анизотропных и спин-вентильных магниторезистивных наноструктур (поверхностное сопротивление пленки, коэрцитивность, поле магнитной анизотропии, магниторезистивный эффект) в составе пластин диаметром 100 и 200 мм проводится с помощью магнитной измерительной системы MESA-200 (рис.4).

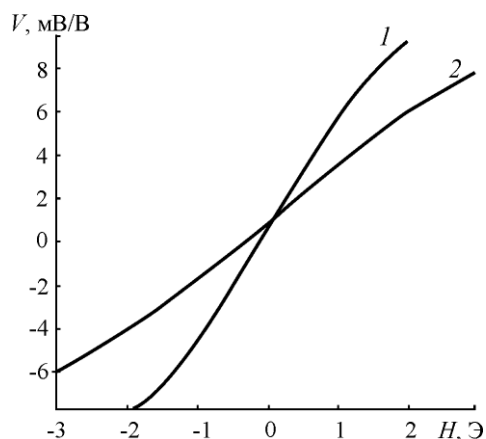


Рис.2. ВЭХ микросистем анализа слабых магнитных полей микросистем ПМП-АМР-НХ-В2.1 (кривая 1) и ПМП-АМР-НХ-В2.2 (кривая 2)

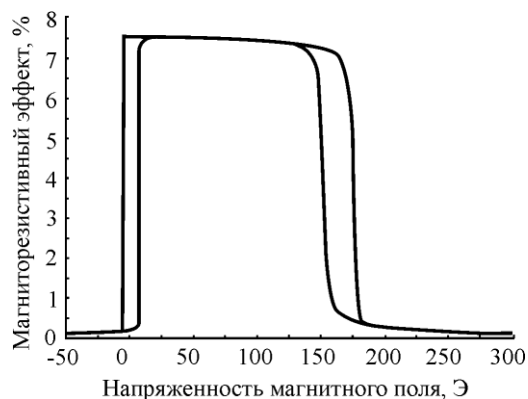


Рис.3. Зависимость магниторезистивного эффекта наноструктуры типа Ta/CoFeNi/CoFe/Cu/CoFe/CoFeNi/FeMn/Ta на основе СВМР эффекта от напряженности магнитного поля



Рис. 4. Рабочее место с магнитной измерительной системой MESA-200

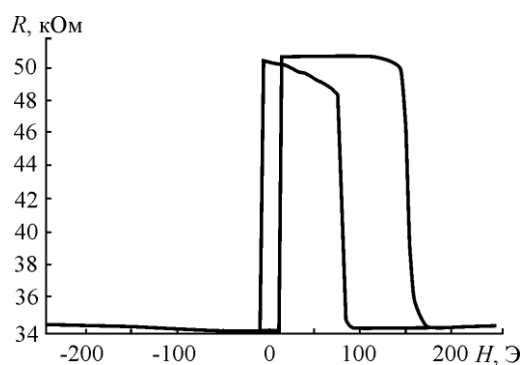


Рис. 5. Изменение сопротивления тестовой наноструктуры на основе СВМР эффекта от магнитного поля

условиях опытного производства НПК «Технологический центр». На рис.5 приведена зависимость изменения сопротивления тестового элемента на основе СТМР эффекта от магнитного поля.

Заключение. За последнее десятилетие в НПК «Технологический центр» созданы высокочувствительные магнитополупроводниковые микросистемы для приборов контроля слабого магнитного поля и тока. Накоплен большой практический опыт создания преобразователей на основе АМР эффекта с четной и нечетной передаточной характеристикой. Успешно ведутся работы по созданию спинтронных приборов, работающих на ГМР (СВМР и СТМР) эффектах.

Разработка отечественных магнитополупроводниковых изделий на сегодняшний день актуальна и востребована в ряде областей, где требуется отечественная электронная компонентная база с высоким коэффициентом преобразования магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание по проекту № 3576) с использованием измерительных приборов ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».

В 2014 г. изготовлены экспериментальные образцы ПМП на основе СВМР эффекта с чувствительностью 3,0 мВ/(В·Э). Данные ПМП имеют гистерезис до 15% и в основном применяются в цифровой технике [7, 8].

В НПК «Технологический центр» также ведутся разработки технологий ПМП на основе СТМР эффекта для создания более эффективных датчиков и преобразователей магнитного поля, запоминающих и логических элементов. Особенностью СТМР преобразователей являются более высокая чувствительность к магнитному полю, малые габариты магниточувствительного элемента и малая потребляемая мощность.

Конструкция ПМП на основе СТМР эффекта в общем случае похожа на конструкцию ПМП на основе СВМР эффекта. Отличие заключается в том, что между ферромагнитными пленками находится тонкий слой диэлектрика (оксид алюминия или магния). СТМР элемент работает при вертикальных туннельных токах, протекающих через структуру сверху вниз, преодолевая тонкий диэлектрический слой.

В настоящее время после проведения ряда экспериментальных работ и исследования тестовых наноструктур разработан технологический процесс изготовления ПМП на основе СТМР эффекта, достигающего 50% в

Литература

1. **Касаткин С.И., Муравьев А.М.** Тонкопленочные магниторезистивные датчики // Электронные компоненты. – 2003. – № 3. – С.1–4.
2. **Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М.** Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. – М.: Электронинформ, 2005. – 168с.
3. Микроэлектронная магниторезистивная технология / **В.В. Амеличев, А.И. Галушков, В.В. Дягилев и др.** // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 3. – С. 22–26.
4. **Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М.** Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности токов // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 4. – С. 359–368.
5. Беспроводная магниторезистивная микросистема измерения магнитного поля / **В.В. Аравин, В.В. Амеличев, А.А. Демин и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2012. – №6(98). – С. 57–63.
6. Сайт фирмы NVE URL: www.nve.com (дата обращения: 27.04.2015).
7. Перспективы применения тонкопленочных магниторезистивных наноструктур в многокристалльных беспроводных МЭМС / **В.В. Аравин, В.В. Амеличев, В.Д. Вернер и др.** // Материалы IX науч.-техн. конф. «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – Звенигород, 2010. – С. 152–153.
8. <http://powerelectronics.com/passive-components/microtransformer-isolation-benefits-digital-control> (дата обращения: 27.04.2015).

Статья поступила
30 апреля 2015 г.

Амеличев Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник отдела микросистемной техники НПК «Технологический центр» (г. Москва), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории интегральных технологий МИЭТ. *Область научных интересов:* датчики и преобразователи физических величин, дискретные и матричные устройства МЭМС, интегральные технологии микросистем. **E-mail:** V.Amelichev@tcen.ru

Абанин Иван Евгеньевич – заместитель директора по специальной технике НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* микроэлектроника, микросистемная техника, преобразователи и датчики физических величин и микросистемы на их основе, наноэлектроника, нанотехнология, электронная компонентная база.

Аравин Владислав Владимирович – руководитель ФГКУ «Войсковая часть 35533». *Область научных интересов:* радиосистемы, радиосвязь, микросистемы, МЭМС, датчики и преобразователи физических величин.

Костюк Дмитрий Валентинович – начальник научно-исследовательской лаборатории магнитополупроводниковых нано- и микросистем НПК «Технологический центр» (г. Москва), аспирант базовой кафедры микроэлектроники и микросистем НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* датчики и преобразователи физических величин, интегральные технологии микросистем.

Касаткин Сергей Иванович – доктор технических наук, заведующий лабораторией ферромагнитных элементов Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* физика магнитных явлений, гигантское магнетосопротивление, магниторезистивные тонкопленочные наноземента.

Резнев Алексей Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя ФГКУ «Войсковая часть 68240». *Область научных интересов:* разработка теоретических положений СВЧ-радиосистем, высокоэффективные микро- и нанoeлектронные устройства.

Сауров Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор НПК «Технологический центр» (г. Москва), директор Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка и применение конструктивно-технологических методов и приемов самоформирования в микро- и нанoeлектронике и микро- и наносистемной технике.

**Информация для читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

С тематическими указателями статей за 1996 - 2014 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru>