

УДК 621.315.592:[621.317.44+621.317.49]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ НЕДИАГОНАЛЬНОГО МАГНИТОИМПЕДАНСА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ТОКОВ

Л.В. Панина, Н.А. Юданов, А.Т. Морченко, В.Г. Костишин, Д.Г. Крутогин,
А.А. Рудёнок

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, Москва, Ленинский проспект, 4
kolyan2606@mail.ru*

Аннотация: На основе эффекта недиагонального магнитоимпеданса при импульсном и гармоническом возбуждении разработан миниатюрный линейный сенсор магнитного поля с чувствительностью около 70 мВ/Э.

Ключевые слова: *недиагональный магнитоимпеданс, сенсор магнитного поля, аморфный микропровод.*

1. Введение

Фундаментальные исследования в области современных некриогенных магнитометрических систем, таких как магниторезистивные, спин-туннельные, тонкопленочные, магнитомодуляционные, позволили достичь чувствительности порядка 0,1–1 нЭ, а в некоторых случаях и до 10 нЭ. Однако достижение столь высоких показателей в миниатюрных сенсорных системах с учетом частотных характеристик детектируемых сигналов и стабильности остается проблематичным. Модельные исследования, проведенные нами, показывают принципиальную возможность снижения уровня магнитных шумов и саморегулирования операционного режима при импульсном возбуждении однородно намагниченных импедансных элементов – тонких пленок (например, на основе сплавов $Fe-Co$) или аморфных микропроводов со спиральным или циркулярным типом магнитной анизотропии.

У миниатюрных магнитных датчиков довольно широкий спектр применения в таких направлениях, как системы безопасности, медицинская, геолого-разведывательная, навигационная техника, а с недавних пор – также в мобильных устройствах и приложениях. Все эти области требуют улучшения чувствительности, меньших размеров устройств, более быстрого отклика и совместимости с электронными системами [1,2]. В последнее время значительный интерес проявляется к созданию магнитоимпедансных (МИ) датчиков, что вызвано их потенциалом в удовлетворении упомянутых выше требований [3,4]. В таких датчиках используется эффект гигантского изменения полного сопротивления переменному току (с учетом его реактивной составляющей), которое может достигать 600%/Э в аморфных проводах

при управлении током возбуждения с частотой несколько $MГц$ [5], что может превышать возможности устройств, построенных на основе широко известного магниторезистивного эффекта. При этом размеры чувствительного элемента могут быть снижены до нескольких миллиметров в длину при диаметре 10–30 $мкм$ без ухудшения чувствительности, которая для обнаружения переменного магнитного поля находится в диапазоне 0,1–0,2 $мЭ$.

МИ эффект связан с зависимостью поверхностного импеданса от магнитной структуры проводника. Поверхностный импеданс определяется как коэффициент пропорциональности в соотношении между тангенциальными составляющими электрического и магнитного полей на поверхности проводника. Рассмотрение значительно упрощается в приближении сильного скин-эффекта, когда внутренняя структура проводника не имеет особого значения, так как электромагнитное поле и токи сконцентрированы вблизи его поверхности. Предполагается, что магнитодинамика такой системы обусловлена малыми вращениями вектора намагниченности относительно его стационарного положения. Таким образом, поверхностный импеданс зависит как от динамической магнитной проницаемости, так и от ориентации статической намагниченности, которая в особенности может обладать высокой чувствительностью к внешним факторам.

Благодаря зависимости импеданса от магнитного состояния системы при сильном скин-эффекте появляется возможность управления индуцированным сигналом за счет намагничивания проводника. Такое поведение можно использовать для разработки магнитных сенсоров.

2. Недиагональный импеданс в микропроводах и его использование в магнитометрии

Высокочастотный сигнал, индуцированный переменным током i и внешним магнитным полем h_{ex} в проводнике (см. рис. 1), может измеряться либо на его концах (а), либо при помощи катушки индуктивности (б). При определенных условиях, регистрируемый сигнал оказывается чувствительным к внешним статическим воздействиям (постоянное магнитное поле H_{ex} или постоянный ток, порождающий такое поле), что может служить основой для построения датчиков магнитных полей и токов.

Принцип работы магнитоимпедансного датчика заключается в следующем. МИ сенсор возбуждается переменным током, который может иметь как импульсную так и синусоидальную форму, а характеристические частоты должны находиться в определенном диапазоне, границы которого зависят от геометрии построения датчика.

Возбуждающий сигнал формируется программируемым кварцевым генератором [6,7]. В первом случае чувствительность значительно увеличивается при использовании дополнительного возбуждения постоянным током I_b , который намагничивает провод в циркулярном направлении, способствуя подавлению возможности образования доменной структуры. Импульсное возбуждение [8,9,10] имеет ряд преимуществ: относительно простая схема датчика, возможность использования гармоник как высокой, так и низкой частоты и применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) за счет подключения микроконтроллеров для выбора оптимального режима работы. Кроме того, эта схема не требует дополнительного подмагничивания провода, так как в случае недиагональной конфигурации низкочастотные компоненты импульсного возбуждения могут выполнять функцию автосмещения. В результате происходит увеличение сигнала на детектирующей катушке, и уменьшаются шумы, связанные с перемещением доменных границ при перемагничивании провода. В такой конфигурации с дифференциальной схемой регистрации среднеквадратичное значение уровня шума магнитопроволочного чувствительного элемента импульсного датчика может быть снижено до $30 \text{ нЭ/Гц}^{1/2}$ на частоте 1 Гц , что является достаточным уровнем для измерений биомагнитного поля, включая магнитную кардиографию [11]. Микрочипы на основе МИ эффекта в аморфном проводе с импульсным управлением и катушкой впервые запустила в массовое производство фирма Aichi Steel Corp. для применения в смартфонах и электронных компасах [12].

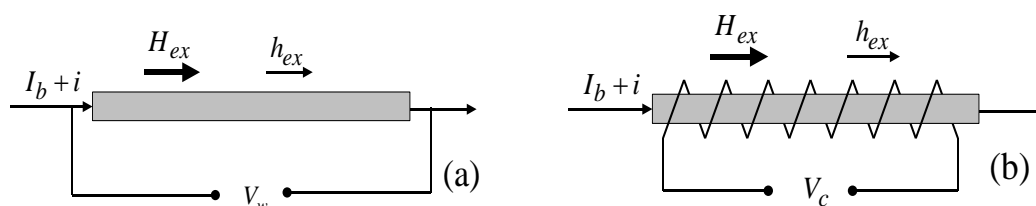


Рис. 1. Варианты включения магниточувствительного элемента и регистрации сигнала датчика.

Хотя чувствительность при импульсном возбуждении оказывается ниже, чем при гармоническом, именно этот вариант является более перспективным для создания интеллектуальных датчиков, поскольку упрощает управление и обработку информации с помощью современных устройств в интегральном исполнении. Импульсное возбуждение МИ датчика, как правило, реализуется с помощью стандартной логики интегральных схем. Однако в [10] было также предложено для этих целей использовать микроконтроллер. Именно такая концепция построения

управляемых и настраиваемых импульсным возбуждением сенсорных элементов получила дальнейшее развитие в настоящей работе.

Обычно магнитный импеданс в микропроводе понимается как отношение напряжения V_w , измеряемого на его концах, к величине протекающего через него переменного тока i в присутствии внешнего магнитного поля. В проводах с циркулярной анизотропией значение магнитного импеданса весьма чувствительно к напряженности магнитного поля H_{ex} , что обусловлено скин-эффектом и переменным током, способствующим намагничиванию провода в циркулярном направлении. В мегагерцовом диапазоне вещественная и мнимая части импеданса симметричны относительно H_{ex} , имея два пика при $H_{ex} \cong H_K$, где H_K – эффективное поле магнитной анизотропии.

В проводе с исходной спиральной (геликоидальной) анизотропией, вызывающей соответствующее статическое распределение намагниченности, переменный ток наводит напряжение V_c в обмотке, намотанной на провод детектирующей катушки, поскольку создаваемое им магнитное поле приводит к появлению переменной составляющей намагниченности в аксиальном направлении. Соотношение $Z_c = V_c / i$ может быть названо «недиагональным импедансом». В однодоменных проводах с круговой анизотропией, вещественная и мнимая части функции $Z_c(H_{ex})$ являются антисимметричными и обладают почти линейной характеристикой в окрестности нулевого значения поля [13]. Это особенность важна для достижения линейной характеристики сенсорного устройства.

3. Конструкция и исследование МИ датчика

В конструкции датчика в качестве магниточувствительного элемента мы использовали многопроволочное сенсорное устройство, возбуждение которого осуществляется сигналом, близким к положительному полупериоду гармонических колебаний, и магнитоиндуктивный способ регистрации измерительного сигнала. Материалом для построения сенсора послужил микропровод, представляющий собой металлическую жилу из магнитомягкого аморфного ферромагнетика номинального состава $Co_{66,94}Fe_{3,83}Ni_{1,44}B_{11,51}Si_{14,59}Mo_{1,69}$ диаметром 19,2 мкм в оболочке из кварцевого стекла наружным диаметром 22,8 мкм. Сенсор собирается на керамической подложке размером 3,2×1,6×0,5 мм. На поверхность подложки устанавливаются 3 МИ провода длиной 2,5 мм, подключенных параллельно; расстояние между ними не превышает 200 мкм. Детекторная катушка наматывается на подложку с МИ проводниками медным

проводом тип ПЭВ-1 и содержит 40 витков при диаметре 60 мкм, как показано на рис. 2.

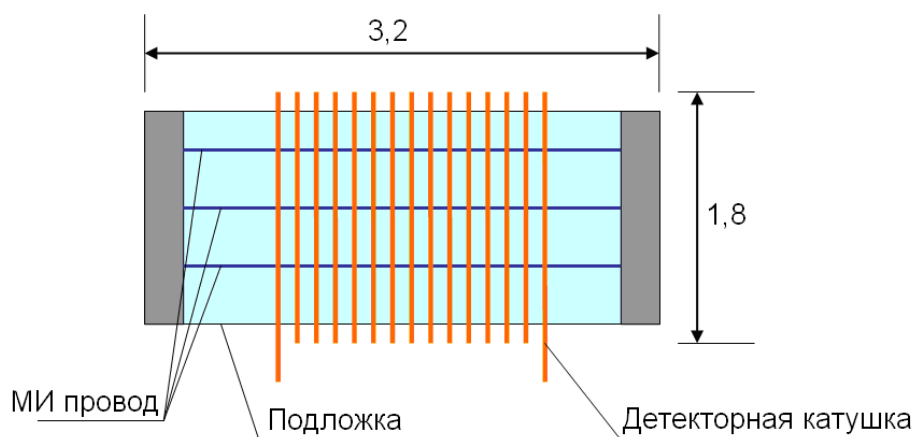


Рис 2. Схематичное изображение магниточувствительного элемента сенсора.

Для формирования переменного сигнала, использовался микроконтроллер. При проведении экспериментов контролировалась частота и форма импульсов. Форма импульса (фронт/спад) и средняя постоянная составляющая зависят от частоты и скважности сигнала. Оба параметра важны для работы датчика. Выбор длительности импульсов (60 нс) и периода их повторения (~120 нс) соответствовал характерной частоте 8 МГц, определяемой по гармоническим затухающим колебаниям резонансного контура МИ-сенсора. Результирующие импульсы не имеют прямоугольной формы и обладают затянутыми фронтами, напоминая синусоидальную форму, что обусловлено внутренней паразитной емкостью выходного каскада микроконтроллера и входа сенсора. При измерении статических или медленно меняющихся полей становится возможным максимально увеличить скважность (более 100), что приведет к значительному уменьшению потребления тока, и увеличит время изменения.

Принципиальная схема включения сенсора показана на рис. 3. Сигнал от микроконтроллера усиливается транзистором и поступает на МИ нить сенсора, этим же сигналом управляется электронный переключатель. Максимальное значение тока в импульсе составляет около 10 мА. Выходной сигнал от детектирующей катушки подается через развязывающий конденсатор и электронный переключатель на накопительный конденсатор. Использование диодного выпрямителя в данном случае невозможно из-за нелинейности его вольтамперной характеристики и относительно сильной температурной зависимости. Электронный переключатель управляется микроконтроллером:

переключатель замкнут в момент пикового сигнала на детектирующей катушке, в результате заряд перетекает к накопительному конденсатору. Величина заряда соответствует амплитуде выходного сигнала от детектирующей катушки, которая зависит от внешнего магнитного поля. Заряд, накопленный на конденсаторе, усиливается усилителем и оцифровывается микроконтроллером. Микроконтроллер может регулировать предел шкалы измерения сенсора путем изменения коэффициента усиления усилителя и изменения тока подкачки детекторной катушки через обратную связь.

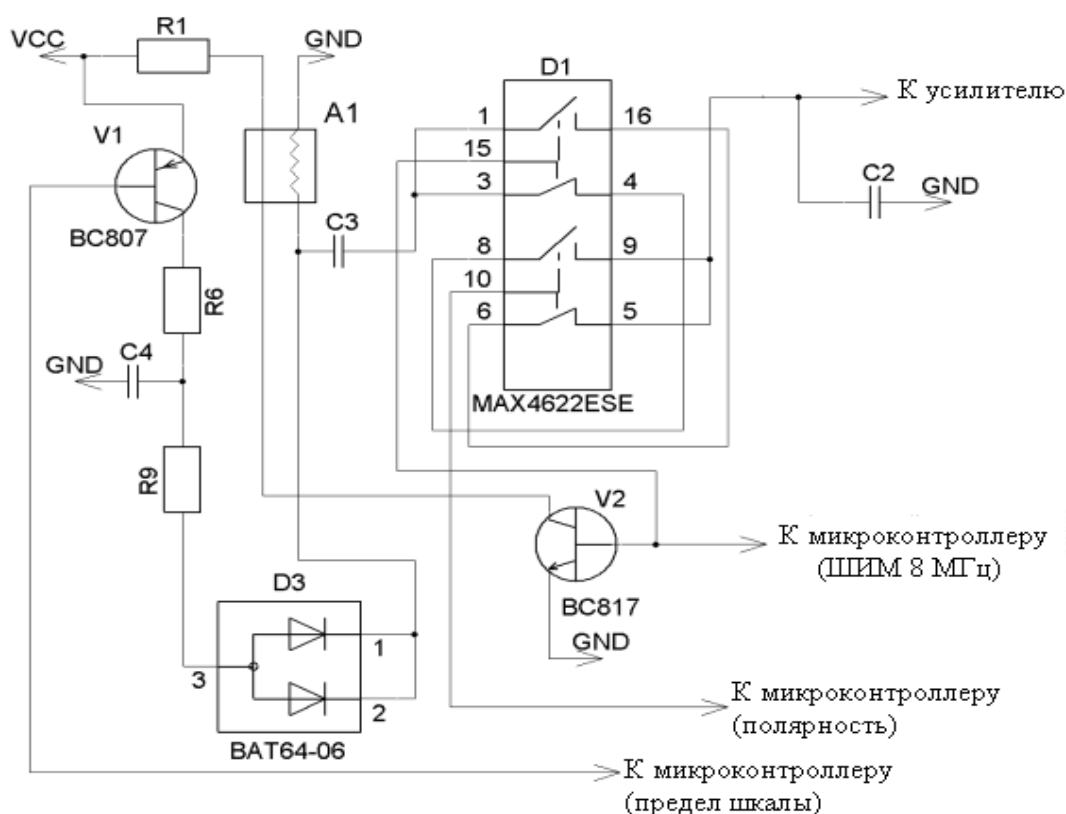


Рис. 3. Принципиальная схема включения сенсора.

4. Анализ результатов эксперимента

Принцип работы датчика основан на зависимости амплитуды выходного сигнала детектирующей катушки от внешнего магнитного поля. Сигнал, снимаемый с детектирующей катушки, при воздействии магнитного поля, показан на рис. 4. Видно, что амплитуда импульсов возрастает более чем в два раза при увеличении воздействующего магнитного поля.

Зависимость амплитуды выходного сигнала от внешнего магнитного поля показана на рис. 5. На линейном участке характеристики датчика (при

$H < 4 \text{ Э}$) его чувствительность составляет $\sim 70 \text{ мВ/Э}$. Напряженность 4 Э примерно соответствует сумме полей анизотропии и постоянного смещения.

В других описаниях недиагональных конструкций МИ датчика (см., например, [8-10]) используемый период следования импульсов был намного больше длительности импульса, что уменьшает потребление энергии и обеспечивает умеренный средний уровень автосмещения. Обычно считается, что использование высоких значений постоянного циркулярного подмагничивающего поля нежелательно, поскольку это увеличивает магнитную жесткость. Тем не менее, мы обнаружили, что усиление круговой компоненты намагниченности приводит к увеличению выходного сигнала и снижению шумов, обусловленных наличием замыкающих доменов вблизи поверхности, тем самым улучшая разрешение сенсора.

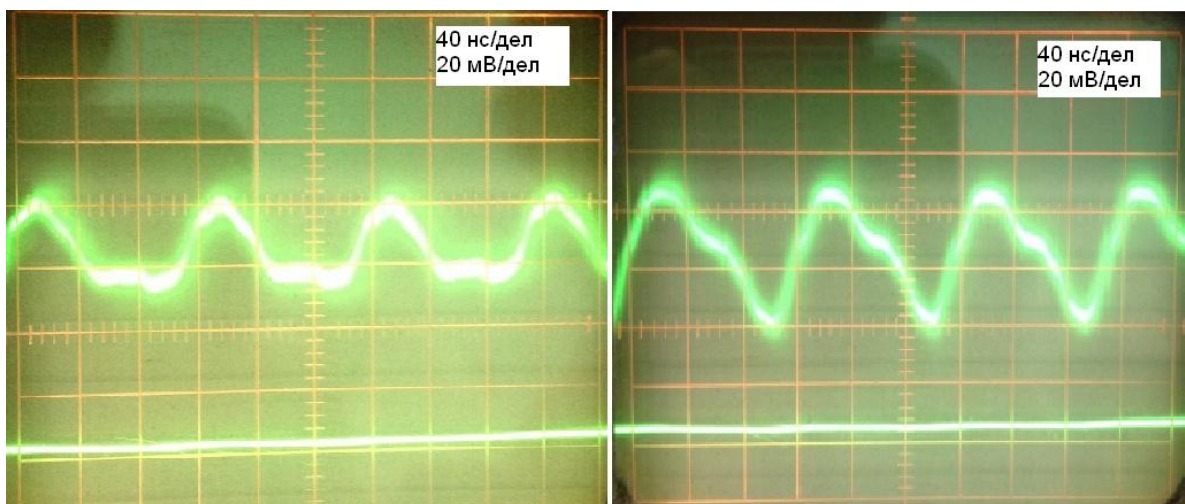


Рис. 4. Сигнал детектирующей катушки для двух значений внешнего магнитного поля: $0,5 \text{ Э}$ (слева) и 1 Э (справа).

Недостатком недиагональной конфигурации датчиков является снижение чувствительности из-за небольшой площади поперечного сечения. Многопроводочный вариант сборки может решить эту проблему. Такой же подход к улучшению чувствительности был использован в проектировании ортогональных индукционных магнитомодуляционных магнитометров (fluxgates) [14,15].

Интересно отметить, что увеличение чувствительности не является линейным относительно количества проводов, когда они находятся на малом расстоянии. Этот эффект можно было бы объяснить магнитным взаимодействием между МИ проводниками при воздействии ВЧ тока. Тем не менее, замена МИ проводников на другие, равно как добавление к ним

медных или магнитных проводников, не улучшает чувствительность. Это означает, что важное значение имеет также динамическое взаимодействие между МИ проводниками, природа которого является предметом дальнейших исследований.

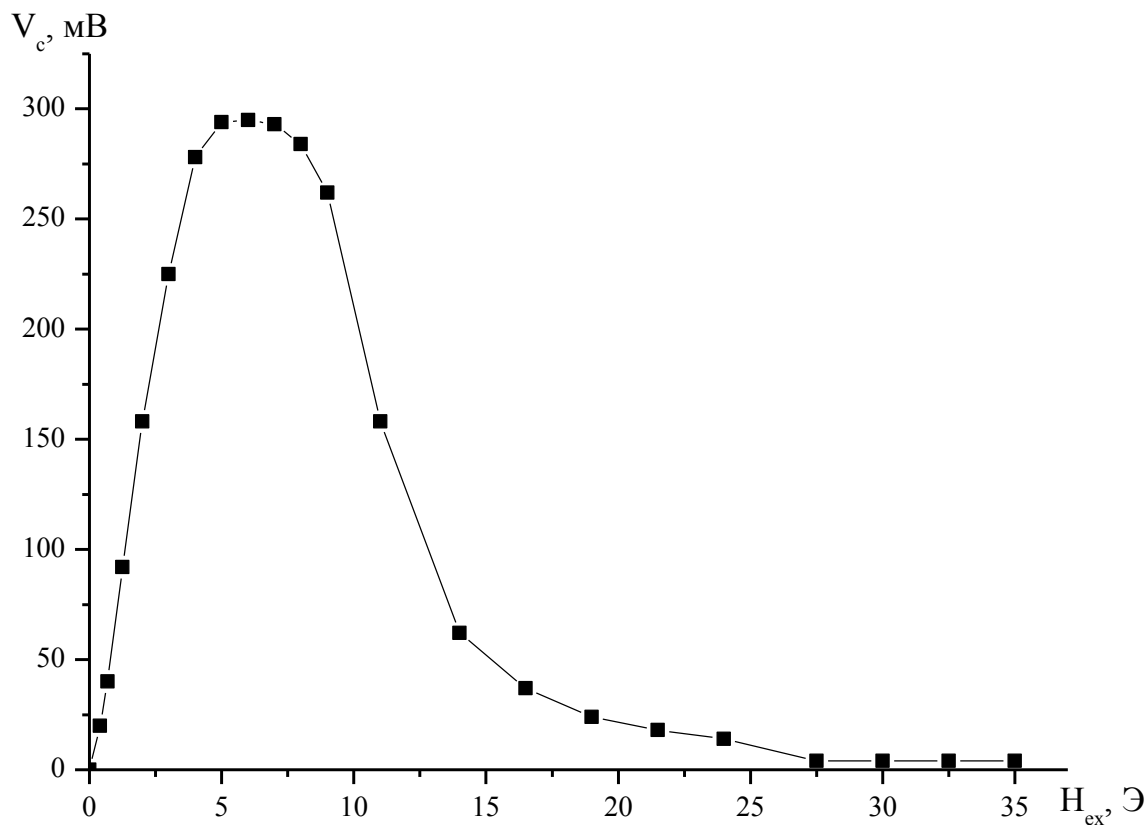


Рис. 5. Зависимость амплитуды выходного сигнала от внешнего магнитного поля.

5. Заключение

В работе продемонстрирована возможность разработки датчика магнитного поля на аморфных проводах с использованием недиагональной схемы возбуждения магнитоимпедансного элемента. Показано, что наиболее удобным вариантом возбуждения МИ сенсора является применение микроконтроллера как с точки зрения проведения экспериментов, так и с точки зрения технологии сборки. Сочетание МИ сенсора и микроконтроллера также обеспечивает дополнительные функциональные возможности интеллектуализации устройства. За счет оптимизации режима импульсного возбуждения была достигнута чувствительность около 70 мВ/Э при линейности характеристики в интервале полей ± 4 Э.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-08-01319).

Библиографический список:

1. **Robbes, D.** Highly sensitive uncooled magnetometers: State of the art. superconducting magnetic hybrid magnetometers, an alternative to SQUIDs? / D. Robbes, C. Dolabdjian, S. Saez, Y. Monfort, G. Kaiser, P. Ciureanu // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2001. – V. 11. – I. 1. – P. 629-634.
2. Magnetic sensors and magnetometer / Ed/ by P. Ripka. – Artech: Artech House Publishers, 2001. – 494 p.
3. **Mohri, K.** Super MI sensor: recent advances of amorphous wire and CMOS-IC magneto-impedance sensor / K. Mohri, Y. Honkura, L.V. Panina, T. Uchiyama // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – V.12. – No. 9. – P. 7491-7495.
4. **Uchiyama, T.** Recent advances of pico-Tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI Sensor / T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, L.V. Panina // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – V. 48. – I. 11. – P. 3833-3839.
5. **Zhukova, V.** Optimization of giant magneto-impedance in Co-rich amorphous microwires / V. Zhukova, A. Chizhik, A. Zhukov, A. Torcunov, V. Larin, J. Gonzalez // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – V. 38. – I. 5. – P. 3090-3092.
6. **Mawatari, H.** High-frequency-carrier type thin film magnetic field sensor for AC detection / H. Mawatari, H. Kikuchi, S. Yabukami, M. Yamaguchi, K.I. Arai // Journal of Magnetics Society of Japan. – 2003. – V. 27. – I. 4. – P. 414-418.
7. **Yabukami, S.** High-frequency carrier type thin-film sensor using low-noise crystal oscillator / S. Yabukami, H. Mawatari, Y. Murayama, T. Ozawa, K. Ishiyama, K.I. Arai // IEEE Transactions on Magnetics. – 2004. – V. 40. – I. 4. – P. 2670-2672.
8. **Mohri, K.** Amorphous wire MI micro sensor using C-MOS IC multivibrator / K. Mohri, T. Yagi, T. Uchiyama, L.P. Shen, T. Kanno // IEEE Transactions on Magnetics. – 1997. – V. 33. – I. 5. – P. 3353-3360.
9. **Kawajiri, N.** Highly stable MI micro sensor using C-MOS IC multivibrator with synchronous rectification / N. Kawajiri, M. Kakabayashi, C.M. Cai, K. Mohri, T. Uchiyama // IEEE Transactions on Magnetics. 1999. – V. 35. – I. 5. – P.3667-3669.
10. **Fisher, B.** High performance current sensor utilizing pulse magneto-impedance in Co-based amorphous wires / B. Fisher, L.V. Panina, D.J. Mapps, N. Fry // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – V. 49. – I. 1. – P. 89-92.
11. **Uchiyama, T.** Measurement of spontaneous oscillatory magnetic field of guinea-pig smooth muscle preparation using pico-Tesla resolution amorphous wire magneto-impedance sensor / T. Uchiyama, K. Mohri, and S. Nakayama // IEEE Transactions on Magnetics. – 2011. – V. 47. – I. 10. – P. 3066-3069.
12. **Mohri, K.** Amorphous wire and CMOS IC based magneto-impedance sensors – Origin, topics, and future / K. Mohri, Y. Honkura // Sensor Letters. – 2007. – V. 5. – No. 2. – P. 267-270.
13. **Makhnovskiy, D.P.** Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: Helical and circumferential / D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina, D.J. Mapps // Physical Review B. – 2001. – V. 63. – I. 14. – P. 144424-1-144424-17.
14. **Li, X.P.** Multi-core orthogonal fluxgate sensor / X.P. Li, J. Fan, J. Ding, X.B. Qian // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – V. 300. – I. 1. – P. e98-e103.
15. **Ripka, P.** Multiwire core fluxgate / P. Ripka, X.P. Li, J. Fan // Sensors and Actuators A: Physical. – 2009. – V. 156. – I. 1. – P. 265-268.