

15

Магнитометр слабых полей на резонаторном микрополосковом преобразователе с тонкими магнитными пленками

© А.Н. Бабицкий¹, Б.А. Беляев¹⁻³, Г.В. Скоморохов¹,
А.В. Изотов^{1,2}, Р.Г. Галеев⁴

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М.Ф. Решетнева, Красноярск

⁴ ОАО «НПП „Радиосвязь“», Красноярск

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 15 июля 2014 г.

Разработан и исследован высокочувствительный магнитометр слабых квазистационарных магнитных полей, преобразователем в котором служит резонансная микрополосковая структура, содержащая в качестве активной среды тонкие магнитные пленки, полученные магнетронным распылением пермаллоевой мишени состава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$. Показано, что максимальная чувствительность преобразователя наблюдается не только при оптимальной величине постоянного подмагничивающего поля, но и при оптимальном отклонении его направления от направления поляризации высокочастотного поля накачки. Магнитометр имеет широкий динамический диапазон измеряемых магнитных полей $10^{-4} - 10^2 \mu\text{T}$ и широкий частотный диапазон $10^{-1} - 10^5 \text{ Hz}$.

Высокочувствительные магнитометры слабых магнитных полей необходимы для решения многих научно-технических задач и в первую очередь задач геомагнитометрии при исследовании геологического строения Земли и поиске полезных ископаемых [1]. Они используются также в охранной сигнализации, медицине и специальной аппаратуре [2]. Как известно, СКВИД-магнитометры имеют наиболее низкий порог чувствительности $\sim 10^{-15} \text{ T}$, [2], однако они являются сложными, дорогостоящими, энергоемкими и громоздкими устройствами. Для обеспечения в них криогенных температур используется жидкий гелий, поэтому они малоприспособлены для работы в полевых условиях. Перспек-

тивными в метрологии напряженности магнитного поля являются и другие методы квантовой магнитометрии [3], отличающиеся рекордно высокими чувствительностями, но приборы на их основе могут с успехом использоваться при решении только специальных задач. Широкое распространение получили простые в обращении феррозондовые магнитометры [4], хотя их пороговая чувствительность значительно меньше $\sim 10^{-10}$ Т. Важно отметить, что верхняя граница полосы рабочих частот феррозондов составляет всего несколько килогерц, но в ряде применений, например в импульсной электроразведке с искусственным возбуждением среды, магнитометры должны обладать полосой рабочих частот в десятки килогерц [5]. Поэтому разработка и исследование широкополосных высокочувствительных магнитометров — важная и актуальная задача.

Узкая полоса рабочих частот как у феррозондовых магнитометров, так и у магнитометров на тонких магнитных пленках (ТМП) [5–7] обусловлена применением в них индуктивных датчиков магнитного поля. В индуктивных датчиках высокочастотная накачка и съём сигнала осуществляются с помощью катушек, намотанных непосредственно на сердечник из магнитомягкого материала или на подложку ТМП. Очевидно, что обмотки катушек экранируют внешние высокочастотные магнитные поля, поэтому существенно понижают верхнюю границу рабочих частот магнитометров. Тонкопленочные датчики в микрополосковом исполнении лишены этих недостатков, а кроме того, они значительно технологичнее в изготовлении [8–10].

Предлагаемый датчик магнитного поля (рис. 1, *a*) представляет собой нерегулярный четвертьволновый микрополосковый резонатор (МПР), полосковый проводник которого состоит из двух регулярных участков. Широкий полосковый проводник изготовлен на подложке с высокой диэлектрической проницаемостью, один его конец свободен, а другой соединен с узким проводником, замкнутым на экран. Магнитная пленка, изготовленная на своей подложке, располагается под узким проводником, где находится пучность сверхвысокочастотного (СВЧ) магнитного поля h . Датчик имеет два порта с емкостной связью для согласования, на один из которых подключается СВЧ-генератор накачки, а с другого снимается полезный сигнал. Наиболее высокие характеристики показывают датчики, в которых используются многослойные магнитные структуры, обладающие одноосной анизотропией, полученные путем напыления металлических магнитных пленок толщиной порядка скин-слоя, разделенных диэлектрическими прослойками,

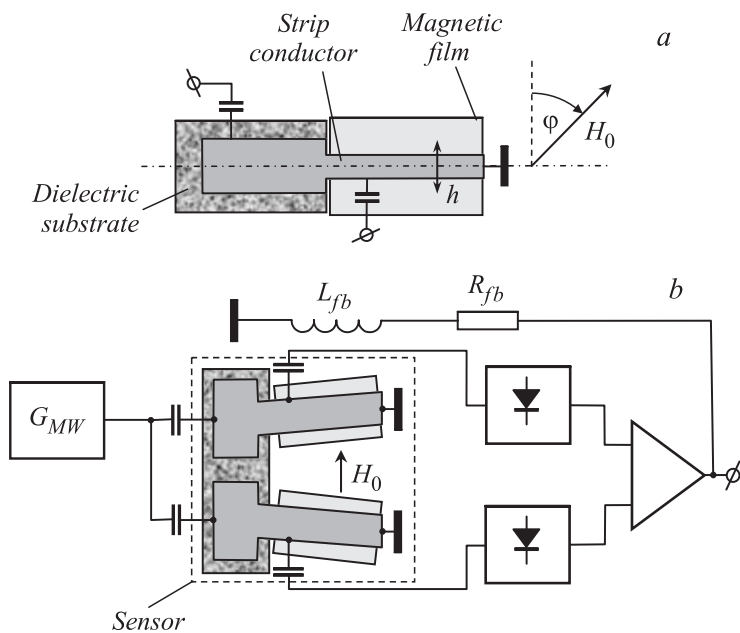


Рис. 1. Микрополосковый резонатор с тонкой магнитной пленкой (а) и структурная схема магнитометра (b).

исключающими электрический контакт пленок друг с другом, для уменьшения вихревых токов.

В рассматриваемом датчике в качестве активной среды использовались магнитные пленочные структуры, состоящие из двух пермаллоевых слоев толщиной по 150 нм, разделенных слоем монооксида кремния толщиной 500 нм. Магнитные пленки получались магнетронным распылением мишени состава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ на ситалловые подложки СТ-50 стандартных размеров 60×48 мм, предварительно покрытые слоем монооксида кремния также толщиной 500 нм. Одноосная магнитная анизотропия H_k наводилась постоянным однородным магнитным полем, приложенным в плоскости подложек во время напыления. В результате в плоскости пленочной структуры формировалась ось легкого намагничивания (ОЛН), совпадающая по направлению с магнитным полем, приложенным во время напыления ТМП. Вдоль этой оси

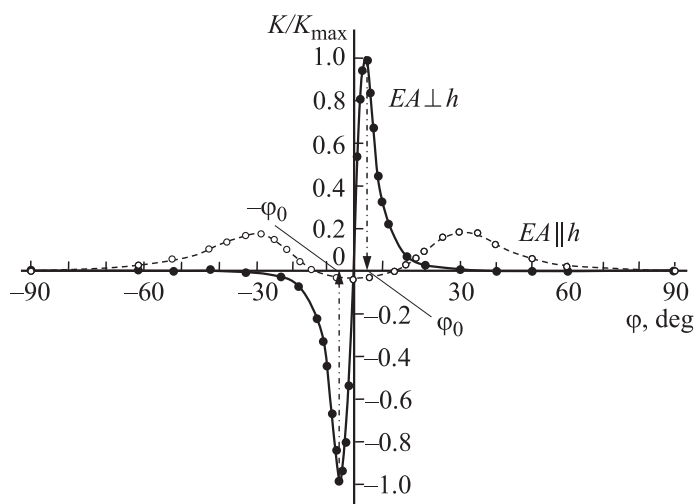


Рис. 2. Зависимости коэффициента преобразования микрополоскового резонаторного преобразователя от угла направления смещающего магнитного поля для двух ориентаций оси легкого намагничивания ТМП относительно поляризации высокочастотного поля.

ориентируются магнитные моменты пленок после их напыления в отсутствие внешнего магнитного поля.

Исследуемый датчик располагался в постоянном магнитном поле H_0 , ориентированном в плоскости под углом φ к направлению поляризации высокочастотного магнитного поля h (рис. 1, *a*). Исследования показали, что коэффициент преобразования K , характеризующий отношение полезного сигнала с выхода датчика к измеряемому магнитному полю, зависит как от величины смещающего магнитного поля, так и от его направления. На рис. 2 представлены зависимости $K(\varphi)/K_{\max}$, построенные для ортогональной (черные точки) и параллельной (белые точки) ориентации оси легкого намагничивания ТМП. Видно, что для ортогональной ориентации ОЛН коэффициент преобразования имеет максимум при $\varphi_0 \approx 5^\circ$. Этот максимум почти в 5 раз превышает другие максимумы, наблюдаемые в точках $\varphi \approx \pm 30^\circ$ при параллельной ориентации. Заметим, что максимальный коэффициент преобразования в датчике достигается при постоянном магнитном поле $H_0 = H_k$, но

использовалось поле больше поля анизотропии ($H_0 \approx 1.3 H_k$). При этом смещающее поле такой величины позволяет еще и существенно уменьшить магнитные шумы ТМП, которые, как известно, имеют ярко выраженный максимум в магнитном поле $H_0 = H_k$.

Важно отметить, что при $\varphi_0 \approx -5^\circ$ коэффициент преобразования имеет минимум такой же величины, как и максимум с отрицательным знаком. Поэтому использование двух микрополосковых датчиков в чувствительном элементе магнитометра, узкие полосковые проводники которых „наклонены“ к осям резонаторов под углами $\pm\varphi_0$ (рис. 1, *b*), позволяет после суммирования на операционном усилителе удвоить полезный сигнал. В этом случае структурная схема магнитометра состоит из генератора накачки G_{MW} , питающего чувствительный элемент, состоящий из двух датчиков на микрополосковых резонаторах. Сигналы с МПР поступают на амплитудные детекторы, а затем на операционный усилитель, суммирующий и усиливающий эти сигналы. В такой структурной схеме при совпадении частоты СВЧ-генератора с резонансными частотами МПР наблюдается значительная компенсация амплитудных шумов генератора накачки, так как напряжения с датчиков после детекторов на операционном усилителе вычитаются. В такой схеме, очевидно, уровень магнитных шумов от ТМП также уменьшается, но в $\sqrt{2}$ раз.

Долговременная стабильность коэффициента преобразования K обеспечивается компенсационным методом. Для этого чувствительный элемент помещается в катушку обратной связи L_{fb} (рис. 1, *b*), с высокой точностью компенсирующую своим магнитным полем величину измеряемого поля. В результате стабильность K определяется в основном стабильностью постоянной этой компенсационной катушки и стабильностью резистора в обратной связи R_{fb} [1], которые, как видно на рис. 1, *b*, являются нагрузкой операционного усилителя. Компенсационной катушкой служат кольца Гельмгольца, позволяющие значительно уменьшить экранирование высокочастотных магнитных полей и тем самым расширить полосу рабочих частот магнитометра. Заметим, что и сама величина индуктивности L_{fb} также определяет частоту верхней границы полосы пропускания, когда реактивное сопротивление катушки становится неприемлемо высоким. Однако уменьшение индуктивности L_{fb} , с целью дополнительного расширения рабочей полосы частот, потребует соответствующего увеличения мощности по цепи компенсации.

Известно, что основными магнитными параметрами ТМП, определяющими характеристики СВЧ-датчиков, являются магнитная проницаемость, которая зависит от намагниченности насыщения M_s , поля анизотропии H_k и ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР) ΔH , а также величины амплитудной δH_k и угловой $\delta \alpha_k$ дисперсии одноосной анизотропии, от которых зависят магнитные шумы. Обычно в датчиках используются пермаллоевые пленки $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, близкого к составу с нулевой магнитострикцией, ширина линии ФМР, измеренная на частоте 2.3 GHz, $\Delta H \approx 7$ Oe, $H_k \approx 5$ Oe, $M_s \approx 860$ Gs. У таких ТМП малы параметры δH_k и $\delta \alpha_k$, что существенно понижает магнитные шумы. Высокой магнитной проницаемостью на СВЧ обладают химически осажденные пленки кобальта [11], которые перспективны для использования в магнитных датчиках, но в них пока не решена проблема „старения“.

У изготовленных нами пермаллоевых пленок состава $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ намагниченность насыщения $M_s \approx 1100$ Gs, магнитная анизотропия $H_k \approx 8$ Oe, ширина линии ФМР, измеренная на частоте 2.3 GHz, $\Delta H \approx 5$ Oe, что значительно лучше всех соответствующих характеристик пленок из пермаллоя состава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Существенному уменьшению шумов от пленок в рассматриваемом датчике способствует, во-первых, тот факт, что наиболее протяженные края ТМП, являющиеся основным источником шума, не попадают в область высокочастотных магнитных полей МПР (рис. 1, *a*), поэтому не участвуют в формировании сигнала. Во-вторых, благодаря малым размерам СВЧ-датчиков (15×5 mm), размеры пленок также малы (10×5 mm), а значит и малы δH_k и $\delta \alpha_k$ [11]. Кроме того, на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса [12] по всей площади (60×48 mm²) изготовленной тонкопленочной магнитной структуры измерялись распределения M_s , величины H_k и направления ОЛН, а также и ширины линии ФМР. Это позволило нам „выкраивать“ участки магнитной структуры заданных размеров с наиболее однородными характеристиками по площади и, тем самым минимизировать магнитные шумы от ТМП. В результате установлено, что шумы разработанного магнитометра малы и обусловлены, главным образом, элементами схемы: генератором накачки, детекторами и операционным усилителем. Частота генератора накачки выбрана сравнительно низкой (~ 0.5 GHz) для того, чтобы датчики при сравнительно небольшом смещающем поле H_0 могли работать в режиме, близком к ФМР.

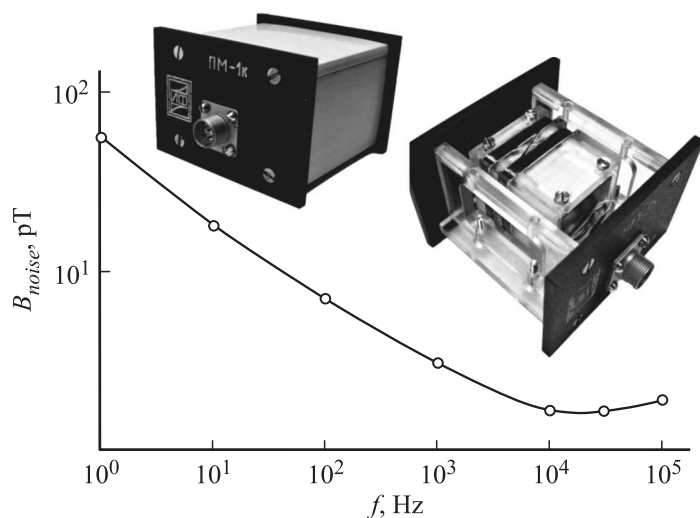


Рис. 3. Частотная зависимость амплитуды шума, измеренного в полосе 1 Hz, и фотографии магнитометра в корпусе и со снятым защитным кожухом.

Одной из самых важных характеристик магнитометров является порог чувствительности к измеряемому полю, который характеризуется амплитудой шума B_{noise} , как правило, измеряемого в частотной полосе шириной 1 Hz. На рис. 3 для изготовленного магнитометра представлена экспериментальная зависимость B_{noise} от частоты измеряемого сигнала f . Измерение шумов проводилось в лабораторных условиях, при этом магнитометр помещался внутри трехслойного магнитного экрана с толщиной стенок 1.0 mm, изготовленного из пермаллоя. Электропитание магнитометра осуществлялось от аккумуляторов, а выходной сигнал измерялся селективным нановольтметром. Видно, что амплитуда шумов достаточно мала, причем с ростом частоты она сначала падает, а затем начинает подрастать, при этом минимум зависимости $B_{noise}(f)$ попадает в диапазон 10^4 – 10^5 Hz.

На рис. 3 представлена фотография изготовленного магнитометра в сборе и при снятом защитном корпусе. Платы СВЧ-генератора, изготовленного на полевом транзисторе с изолированным затвором BF998, и выходного усилителя, изготовленного на микросхеме MAX9943, для

качественного экранирования друг от друга расположены в отдельных отсеках латунных корпусов. Чувствительный элемент на двух микрополосковых резонаторах с ТМП, детекторы и оригинальная магнитная система для создания смещающего поля H_0 расположены на специальной платформе, которая размещена в центре компенсационных колец Гельмгольца. Магнитная система, создающая поле смещения величиной $H_0 \approx 10$ Ое, выполнена на основе постоянных миниатюрных магнитов и магнитопроводов из магнитомягкого железа.

Приведем основные технические характеристики разработанного и изготовленного опытного образца магнитометра слабых магнитных полей: диапазон измеряемых магнитных полей $10^{-4} - 10^2$ μ T; диапазон рабочих частот $10^{-1} - 10^5$ Hz; коэффициент преобразования 60 mV/ μ T; напряжение питания ± 9 V; потребляемая мощность 0.24 W; габариты $66 \times 61 \times 46$ mm; вес 140 g.

Таким образом, разработана оригинальная конструкция магнитометра на микрополосковых резонансных структурах с тонкими магнитными пленками, которая отличается от известных решений простотой, технологичностью в изготовлении, широкой полосой рабочих частот и достаточно высокой пороговой чувствительностью. Магнитометр может использоваться для исследования геологического строения Земли и поиска полезных ископаемых, в том числе в импульсной электроразведке с искусственным возбуждением среды. Благодаря миниатюрности и малому весу, его можно размещать на легких беспилотных летательных аппаратах.

Важно отметить, что диаграмма направленности магнитометра имеет форму „восьмерки“, как и у других магнитометров, например феррозондовых или конструкций на магнитных пленках. Поэтому три идентичных магнитометра, направления максимальной чувствительности которых ортогональны, способны измерять не только величину, но и направление магнитного поля. Разработанная конструкция позволяет при необходимости существенно увеличить ширину полосы рабочих частот, для этого необходимо повысить частоту СВЧ-генератора накачки и уменьшить индуктивность колец Гельмгольца, включенных в цепь обратной связи.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ Сибирскому федеральному университету на выполнение НИР в 2014 году (задание № 3.528.2014К).

Список литературы

- [1] *Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н.* и др. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979. 320 с.
- [2] *Введенский В.Л., Ожогин В.И.* Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. М.: Наука, 1986. 199 с.
- [3] *Александров Е.Б., Вершовский А.К.* // УФН. 2009. Т. 179. В. 6. С. 605–637.
- [4] *Абрамзон Г.В., Обошнев Ю.П.* Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 117 с.
- [5] *Бабицкий А.Н., Блинников Е.П., Владимиров А.Г.* и др. // Геофизическая аппаратура. 1991. В. 94. С. 21–29.
- [6] *Irons H.R., Schwee L.J.* // IEEE Trans. on Magnetic. Mag-8. 1972. P. 61–65.
- [7] *Bader C.J., DeRenzi C.S.* // IEEE Trans. on Magnetic. V MAG 10.3. 1974. P. 524–527.
- [8] *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лексиков А.А.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 3. С. 228–237.
- [9] *Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. В. 8/2. С. 271–274.
- [10] *Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. В. 8/2. С. 275–278.
- [11] *Беляев Б.А., Изотов А.В., Кипарисов С.Я., Скоморохов Г.В.* // ФТТ. 2008. Т. 50. В. 4. С. 650–656.
- [12] *Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A.* // IEEE Sensors Journal. 2005. V. 5. N 2. P. 260–267.