

**МАГНИТОМЕТР СЛАБЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ
И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ НА РЕЗОНАНСНЫХ
МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ
С ТОНКИМИ МАГНИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ**

© 2016 г. А. Н. Бабицкий*, Б. А. Беляев*, **, ***, Н. М. Боев*, **, Г. В. Скоморохов*,
А. В. Изотов*, **, Р. Г. Галеев****

* Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, строение 38

** Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск

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

**** АО НПП “Радиосвязь”, Россия, Красноярск

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Поступила в редакцию 14.04.2015 г.

После доработки 20.07.2015 г.

Описан высокочувствительный магнитометр, измеряющий одновременно три компоненты вектора слабого как квазистационарного, так и высокочастотного магнитного поля. Преобразователями в магнитометре служат микрополосковые конструкции на нерегулярных резонаторах. В качестве чувствительного элемента последних используется анизотропная тонкопленочная структура, состоящая из двух магнитных пленок, разделенных прослойкой монооксида кремния и полученных магнетронным распылением пермаллоевой мишени состава $Ni_{75}Fe_{25}$. Показано, что максимальная чувствительность преобразователя достигается при ориентации оси легкого намагничивания пленочной структуры ортогонально направлению поляризации сверхвысокочастотного магнитного поля накачки в микрополосковом резонаторе, а также при оптимальной величине и оптимальном отклонении от параллельного поляризации поля накачки направления постоянного магнитного поля смещения, прикладываемого в плоскости структуры. Магнитометр имеет широкий динамический диапазон измеряемых магнитных полей, 10^{-10} – 10^{-4} Тл, и широкий частотный диапазон, 10^{-1} – 10^5 Гц.

DOI: 10.7868/S0032816216030174

ВВЕДЕНИЕ

Высокочувствительные магнитометры слабых квазистационарных магнитных полей предназначены для решения многих научно-технических задач, но в первую очередь – задач геомагнитометрии, связанных как с изучением геологического строения Земли и поиском полезных ископаемых [1–3], так и с археологическими исследованиями [4, 5]. Датчики слабых магнитных полей применяются в медицине [6], охранной сигнализации и специальной аппаратуре, используемой, в том числе, в космических технологиях [7]. Учитывая огромную потребность в таких устройствах, важно, чтобы они не только имели требуемую чувствительность, но и были просты в изготовлении, обладали приемлемыми массогабаритными и энергетическими характеристиками, а также высокой надежностью и относительно

но малой стоимостью при массовом производстве.

Как известно, СКВИД-магнитометры имеют наиболее низкий порог чувствительности, $\sim 10^{-15}$ Тл [6], однако они являются сложными, дорогостоящими, энергоемкими и громоздкими устройствами. Для обеспечения в них криогенных температур используется жидкий гелий, поэтому они малоприспособны для работы в полевых условиях. Перспективными в метрологии напряженности магнитного поля являются и другие методы квантовой магнитометрии, опирающиеся на высокую стабильность энергии эталонных переходов между долгоживущими состояниями атомов [8]. Эти методы также имеют рекордно высокую чувствительность, но приборы на их основе могут с успехом использоваться только при решении сравнительно узкого круга специальных задач.

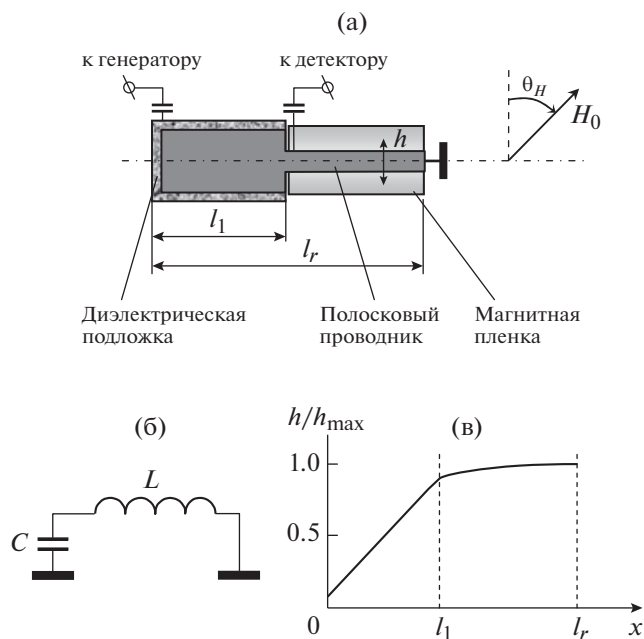


Рис. 1. Микрополосковый резонатор с тонкой магнитной пленкой (а), его эквивалентная схема (б) и распределение амплитуды высокочастотного тока по длине проводника резонатора (в).

Широкое распространение получили простые в обращении феррозондовые магнитометры [9], хотя их пороговая чувствительность значительно ниже и достигает $\sim 10^{-10}$ Тл. Важно отметить, что верхняя граница полосы рабочих частот феррозондов составляет всего несколько кГц, но в ряде применений, например в импульсной электроразведке с искусственным возбуждением среды, магнитометры должны иметь полосу рабочих частот десятков кГц. Поэтому разработка и исследование новых конструкций широкополосных высокочувствительных магнитометров являются важными и актуальными задачами. При этом особое внимание исследователи уделяют векторным магнитометрам, способным регистрировать не только величину, но и направление измеряемого поля.

Сравнительно узкая полоса рабочих частот как у феррозондовых магнитометров, так и у традиционных магнитометров на тонких магнитных пленках (т.м.п.) [10–12] обусловлена применением в них индуктивных чувствительных элементов — датчиков магнитного поля. В индуктивных датчиках высокочастотная накачка и съем сигнала осуществляются с помощью катушек, намотанных непосредственно на сердечник из магнитомягкого материала или на подложку с осажденной на ней т.м.п. Очевидно, что в таких конструкциях обмотки катушек экранируют внешние высокочастотные магнитные поля, поэтому существенно понижают верхнюю границу рабочих частот магнитометров.

Тонкопленочные датчики в микрополосковом исполнении лишены этих недостатков и, кроме того, более технологичны в изготовлении [13–15].

В настоящей работе представлены результаты исследования удовлетворяющего современным требованиям векторного магнитометра, построенного на микрополосковых резонансных структурах, содержащих тонкие магнитные пленки.

ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОПОЛОСКОВОМ РЕЗОНАТОРЕ С ТОНКОЙ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКОЙ

Рассмотрим конструкцию нерегулярного четвертьволнового микрополоскового резонатора (м.п.р.), состоящего из двух отрезков полосковых линий передачи, один из которых имеет низкое, а другой — высокое волновое сопротивление. При этом полосковый проводник резонатора длиной l_r состоит из двух регулярных участков (рис. 1а). Широкий проводник низкоомного отрезка длиной l_1 изготовлен на подложке с высокой относительной диэлектрической проницаемостью. Один его конец свободен, а другой соединен с узким проводником высокоомного отрезка воздушной несимметричной полосковой линии, замкнутого другим концом проводника на экран.

Эквивалентная схема резонатора представляет собой параллельный колебательный контур (рис. 1б), в котором в качестве емкости использован отрезок линии передачи с низким волновым сопротивлением, а в качестве индуктивности — отрезок с высоким волновым сопротивлением. Магнитная пленка, изготовленная на своей подложке, располагается под узким проводником м.п.р., в месте нахождения пучности сверхвысокочастотного (с.в.ч.) магнитного поля h , распределение амплитуды которого по длине всего проводника показано на рис. 1в.

Как известно, нерегулярные микрополосковые резонаторы широко используются не только в конструкциях полосно-пропускающих фильтров [16], но и в качестве измерительных ячеек для исследования диэлектрических характеристик материалов, например жидких кристаллов, на с.в.ч. [17]. Также они могут служить датчиками слабых квазистационарных или высокочастотных магнитных полей [18]. В этом случае резонатор, содержащий т.м.п., подключается посредством емкостной связи к входному и выходному портам (см. рис. 1а). Точки подключения портов к полосковому проводнику могут выбираться произвольно, так как согласование с подводными высокочастотными линиями передачи входа и выхода осуществляется подбором емкостей связи.

При этом чем ближе точка подключения любого порта к свободному концу широкого проводника м.п.р., где находится пучность высоко-

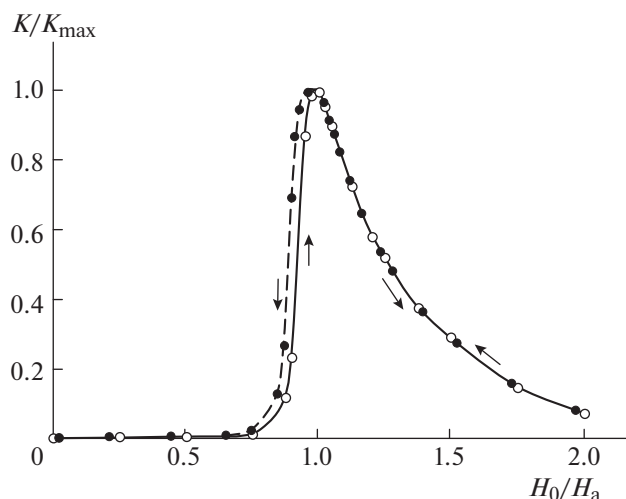


Рис. 2. Зависимости нормированного на максимальную величину коэффициента преобразования от смещающего магнитного поля, нормированного на поле одноосной магнитной анизотропии. Светлые точки — прямой ход развертки магнитного поля, темные — обратный ход.

частотного напряжения, тем меньше оптимальная величина соответствующей емкости связи. К входному порту подключается генератор накачки, работающий на резонансной частоте м.п.р., а к выходному — с.в.ч.-детектор, с которого снимается полезный сигнал. Сигнал формируется за счет сдвига резонансной частоты и изменения добротности резонатора при изменении магнитной проницаемости т.м.п. под действием измеряемого магнитного поля, т.е. так же, как и в традиционных феррозондовых магнитометрах на колебательных контурах с т.м.п. [10].

Важно отметить, что для повышения чувствительности в датчике лучше использовать многослойные магнитные структуры, причем обладающие одноосной магнитной анизотропией в плоскости, как и в пленочных магнитометрах на колебательных контурах с т.м.п. [10]. Как правило, такие структуры получают вакуумным напылением металлических магнитных пленок толщиной порядка скин-слоя, разделенных диэлектрическими прослойками, исключаящими электрический контакт т.м.п. друг с другом. Это необходимо для уменьшения потерь с.в.ч.-мощности, связанных с вихревыми токами.

В исследуемом датчике нами использовалась магнитная пленочная структура, состоящая всего из двух пермалловых т.м.п. толщиной по 0.15 мкм, разделенных слоем монооксида кремния толщиной 0.5 мкм. Для защиты от атмосферы пленочная структура сверху покрывалась также слоем монооксида кремния толщиной 0.5 мкм. Магнитные пленки получались магнетронным

распылением мишени состава $Ni_{75}Fe_{25}$ на ситалловые подложки СТ-50 стандартных размеров, 60×48 мм², и толщиной 0.5 мм, предварительно покрытые слоем монооксида кремния толщиной 0.5 мкм для “залечивания” неровностей поверхности подложки.

Одноосная магнитная анизотропия, характеризующаяся полем H_a , как правило, небольшой величины, 4–8 Э, наводилась в т.м.п. постоянным однородным магнитным полем ~ 200 Э, приложенным в плоскости подложки во время напыления. Очевидно, что ось легкого намагничивания (о.л.н.) полученной таким образом пленочной структуры располагается в ее плоскости и совпадает по направлению с магнитным полем, прикладываемым во время напыления т.м.п. Заметим, что магнитные моменты пленок в отсутствие внешних магнитных полей ориентируются в направлении о.л.н.

В исследуемом датчике отрезок низкоомной линии передачи с длиной проводника 5 мм и шириной 4 мм был изготовлен на подложке толщиной 0.5 мм из термостабильной высокочастотной керамики В-80, имеющей относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 80$. Под проводником отрезка воздушной высокоомной линии с шириной полоскового проводника 0.5 мм и длиной 6 мм располагалась магнитная пленочная структура площадью $\sim 5 \times 4$ мм², при этом резонансная частота полосковой конструкции составляла 0.46 ГГц.

Изготовленный датчик исследовался на стенде, в котором с помощью одной пары колец Гельмгольца в плоскости микрополосковой конструкции создавались синусоидальные пробные (измеряемые) магнитные поля заданной амплитуды и частоты, а с помощью второй пары колец Гельмгольца — в плоскости пленки регулируемое постоянное магнитное поле смещения H_0 . Поле H_0 ориентировалось под углом θ_H к направлению поляризации высокочастотного магнитного поля h (см. рис. 1а). В ходе экспериментов измерялся коэффициент преобразования K датчика, определяемый как отношение изменения напряжения на детекторе к величине пробного магнитного поля.

На рис. 2 показано изменение нормированного на максимальную величину коэффициента преобразования датчика K/K_{\max} в зависимости от величины смещающего постоянного магнитного поля H_0 , нормированного, в свою очередь, на поле одноосной магнитной анизотропии H_a . Зависимости измерены для $\theta_H = 5^\circ$ при ортогональной ориентации о.л.н. магнитной пленки относительно направления поляризации высокочастотного магнитного поля м.п.р., т.е. угол направления о.л.н. $\theta_a = 90^\circ$. Развертка постоянного магнитного

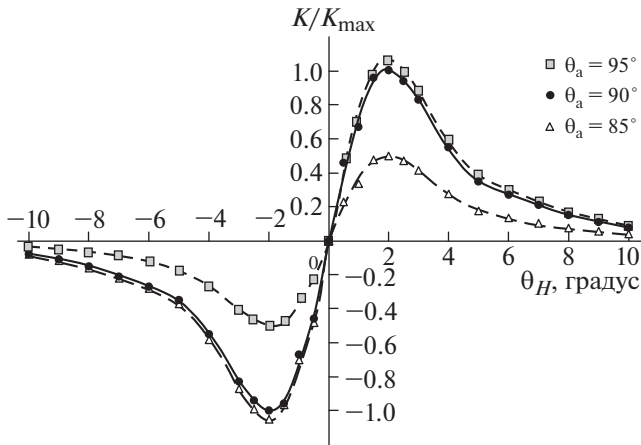


Рис. 3. Зависимости нормированного коэффициента преобразования микрополоскового датчика от угла направления смещающего магнитного поля для трех углов ориентации оси легкого намагничивания т.м.п. относительно поляризации высокочастотного поля.

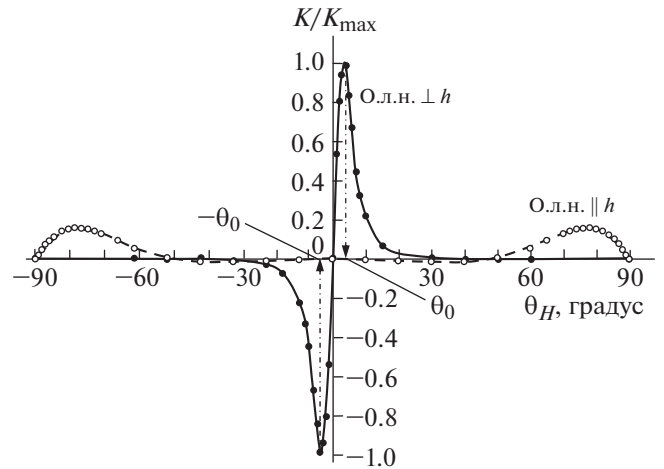


Рис. 4. Зависимости нормированного коэффициента преобразования микрополоскового резонаторного преобразователя от угла направления смещающего магнитного поля для двух ориентаций оси легкого намагничивания т.м.п. относительно поляризации высокочастотного поля.

поля проводилась как в прямом, так и в обратном направлении. Видно, что максимальная величина коэффициента преобразования наблюдается в поле, близком к полю анизотропии, а в области полей $H_0 < H_a$ хорошо проявляется гистерезис.

Как и следовало ожидать, коэффициент преобразования исследуемого датчика зависит не только от величины подмагничивающего поля H_0 , но и от его направления θ_H . На рис. 3 представлены угловые зависимости $K(\theta_H)/K_{\max}$, построенные при поле $H_0 = H_a$ для трех значений углов ориентации θ_a оси легкого намагничивания т.м.п. Результаты эксперимента нормировались на максимальную величину коэффициента преобразования, измеренную при $\theta_a = 90^\circ$. Видно, что K изменяет знак в точке $\theta_H = 0^\circ$, при этом зависимости $K(\theta_H)$ немонотонны, на них наблюдаются экстремумы вблизи углов $\theta_H \approx \pm 2^\circ$. Кроме того, величины экстремумов сильно зависят от угла ориентации θ_a о.л.н. Одинаковые по модулю значения K в минимуме и в максимуме наблюдаются только при $\theta_a = 90^\circ$, при этом с увеличением или уменьшением угла θ_a всего на 5° величина одного из экстремумов падает примерно в два раза, а другого незначительно возрастает.

Важно отметить, что в области гистерезиса при $H_0 \leq H_a$ (см. рис. 2) равновесное состояние магнитного момента т.м.п. нестабильно из-за существующих небольших неоднородностей величины и направления одноосной магнитной анизотропии, наблюдаемых на отдельных участках по всей площади пленки [19]. Нестабильность магнитного состояния т.м.п. проявляется на детекторе датчика сравнительно большим уровнем шума,

максимум которого имеет место при $H_0 \approx H_a$. Однако уровень этого шума очень быстро падает с увеличением поля, $H_0 > H_a$, и уже при $H_0 = 1.2H_a$ магнитные шумы от т.м.п. практически не регистрируются детектором датчика. Поэтому, несмотря на то что коэффициент преобразования датчика с увеличением подмагничивающего поля уменьшается, целесообразно использовать поле смещения $H_0 \geq 1.2H_a$.

На рис. 4 представлены зависимости $K(\theta_H)/K_{\max}$, снятые при $H_0 = 1.2H_a$ для ортогональной (темные точки) и параллельной (светлые точки) ориентаций оси легкого намагничивания т.м.п. по отношению к поляризации высокочастотного магнитного поля накачки. Важно отметить, что при увеличении подмагничивающего поля H_0 характер зависимости $K(\theta_H)$ для ортогональной ориентации оси легкого намагничивания т.м.п. и h практически не меняется, однако при этом монотонно увеличивается угол θ_0 , характеризующий положение экстремумов. В результате при $H_0 = 1.2H_a$ максимум K наблюдается при $\theta_0 \approx 5^\circ$, а минимум — при $\theta_H \approx -5^\circ$ ($-\theta_0$). Величины этих экстремумов, по крайней мере, в 5 раз превышают экстремумы, наблюдаемые в точках $\theta_H \approx \pm 80^\circ$, но при параллельной ориентации h и о.л.н. Поэтому в микрополосковом датчике слабых магнитных полей предпочтительнее использовать режим работы, когда ось легкого намагничивания т.м.п. ортогональна поляризации высокочастотного магнитного поля.

На рис. 5 представлены зависимости равновесного угла θ_M ориентации магнитного момента

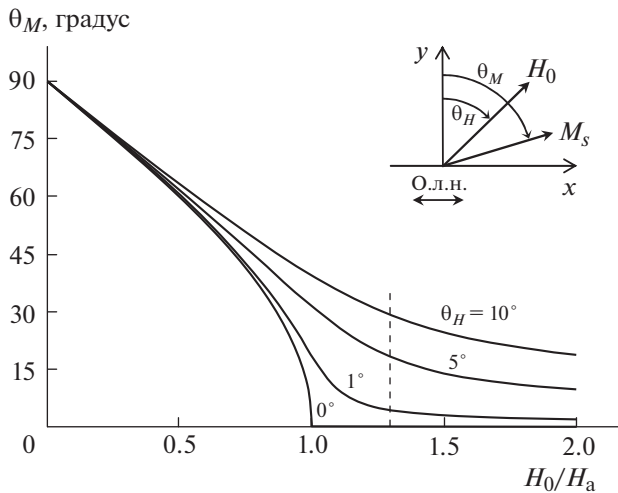


Рис. 5. Зависимости равновесного угла ориентации магнитного момента т.м.п. от величины смещающего магнитного поля, построенные для нескольких углов его направления (цифры у кривых).

пленки от величины магнитного поля смещения, которые объясняют природу существования экстремумов, наблюдаемых на зависимостях $K(\theta_H)/K_{\max}$ в случае направления о.л.н. ортогонально поляризации высокочастотного магнитного поля (см. рис. 4). Кривые построены на основе численного анализа феноменологической модели т.м.п. [20] для четырех углов θ_H ориентации поля смещения: 0° , 1° , 5° и 10° . В случае, когда пробное (измеряемое) поле направлено вдоль поля смещения, очевидно, что коэффициент преобразования пропорционален производной функции $\theta_M(H_0)$, вычисленной в точке, соответствующей приложенному подмагничивающему полю. Этот факт и объясняет зависимость коэффициента преобразования датчика от угла ориентации подмагничивающего поля. Действительно, из приведенных кривых хорошо видно, что в области $H_0 \geq H_a$ при $\theta_H = 0^\circ$ коэффициент преобразования равен нулю для любого смещающего поля $H_0 > H_a$. Однако для любой фиксированной величины этого поля, например $H_0 = 1.2H_a$, показанной на рис. 5 штриховой линией, существует оптимальный угол θ_H , обеспечивающий максимальную производную функции $\theta_M(H_0)$, а значит, и максимальный коэффициент преобразования датчика.

Важно отметить, что коэффициент преобразования увеличивается примерно в 4 раза, если пробное поле направлено ортогонально полю подмагничивания. При этом максимальная величина этого коэффициента наблюдается, если пробное поле ортогонально равновесной ориентации магнитного момента т.м.п. Однако в случае параллельного направления пробного поля к рав-

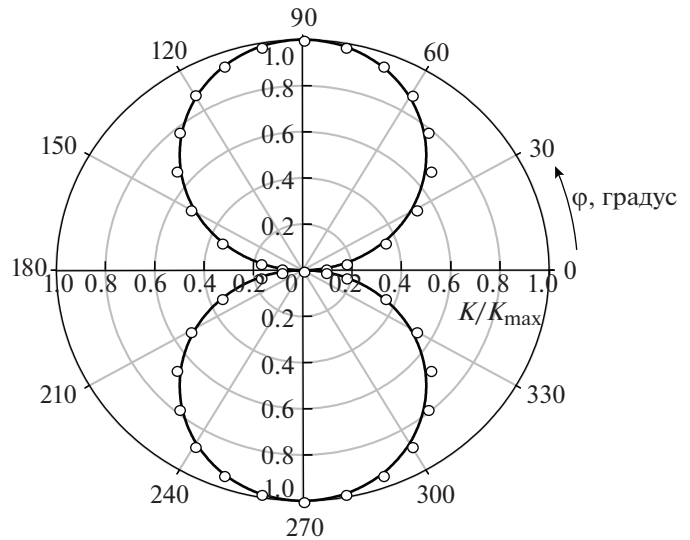


Рис. 6. Диаграмма направленности микрополоскового датчика слабых магнитных полей (точки – эксперимент, линия – расчет).

новесному направлению магнитного момента коэффициент преобразования равен нулю. Этот факт подтверждается диаграммой направленности исследуемого микрополоскового датчика (рис. 6), снятой в его плоскости. При этом угол направления пробного поля ϕ отсчитывался от равновесной ориентации магнитного момента пленки. Видно, что измеренные точки хорошо согласуются с теоретической зависимостью, показанной на рис. 6 сплошной линией и представляющей собой две окружности.

МАГНИТОМЕТР НА РЕЗОНАНСНЫХ ПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ТОНКИМИ МАГНИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ

Обнаруженные в исследуемом датчике на м.п.р. два ярко выраженных экстремума на зависимости коэффициента преобразования от угла ориентации постоянного магнитного поля смещения (см. рис. 4) указывают на возможность построения чувствительного элемента магнитометра (микрополоскового преобразователя) на основе двух идентичных микрополосковых датчиков, в которых узкие полосковые проводники “наклонены” к осям резонаторов под углами $\pm\theta_0$ (рис. 7). Это позволит после суммирования на операционном усилителе удвоить полезный сигнал [21].

В этом случае структурная схема магнитометра состоит из генератора накачки $\Gamma_{\text{свч}}$, питающего чувствительный элемент, состоящий из двух датчиков на м.п.р., сигналы с которых поступают на амплитудные детекторы, а затем на операционный усилитель. В такой структурной схеме при совпадении частоты с.в.ч.-генератора с резонанс-

ными частотами м.п.р. наблюдается значительная компенсация амплитудных шумов генератора накачки, так как напряжения с датчиков после детекторов на операционном усилителе вычитаются. Кроме того, уровень магнитных шумов чувствительного элемента, построенного на двух датчиках, также уменьшается, но, очевидно, в $\sqrt{2}$ раз.

Хорошо известно, что в магнитометре должна обеспечиваться высокая долговременная стабильность коэффициента преобразования, что существенно влияет на точность определения величины измеряемого магнитного поля. Это требование, как правило, обеспечивается компенсационным методом измерений с обратной связью, когда чувствительный элемент помещается в специальную катушку L_{oc} (рис. 7), 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_{oc} [1], которые, как видно на рис. 7, являются нагрузкой операционного усилителя.

В качестве компенсационной катушки использовались кольца Гельмгольца небольшого размера, позволяющие значительно уменьшить экранирование измеряемых высокочастотных магнитных полей, в отличие от обычно используемых для этих целей соленоидов. В результате удалось существенно расширить полосу рабочих частот магнитометра. Важно отметить, что и сама величина индуктивности L_{oc} также определяет частоту верхней границы рабочей полосы частот, когда реактивное сопротивление катушки становится неприемлемо высоким. Однако уменьшение индуктивности L_{oc} с целью дополнительного расширения рабочей полосы частот потребует соответствующего увеличения мощности по цепи компенсации.

Принимая во внимание диаграмму направленности микрополоскового преобразователя с т.м.п. (см. рис. 6), очевидно, что для построения векторного магнитометра можно использовать три одинаковых преобразователя с взаимно ортогональными осями максимальной чувствительности. Принципиальная электрическая схема векторного магнитометра представлена на рис. 8, номиналы резисторов и конденсаторов приведены здесь же в таблице. Генератор с.в.ч.-колебаний собран на полевом транзисторе с изолированным затвором T_1 (BF998), в качестве детекторов D_1 и D_2 использовались диоды КД922, а в качестве операционного усилителя M_1 — микросхема МАХ9943.

Как известно, широкое применение в датчиках слабых магнитных полей находят пермаллоевые пленки состава $\sim Ni_{80}Fe_{20}$, близкого к составу

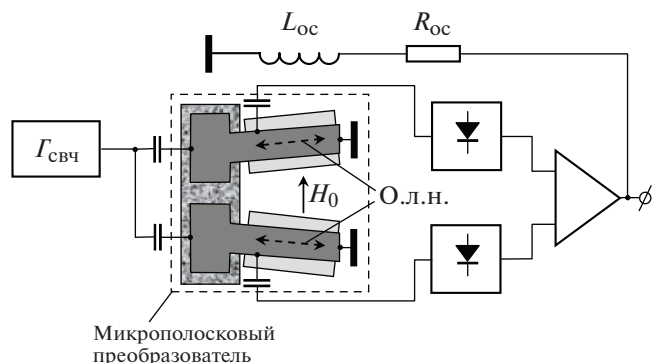
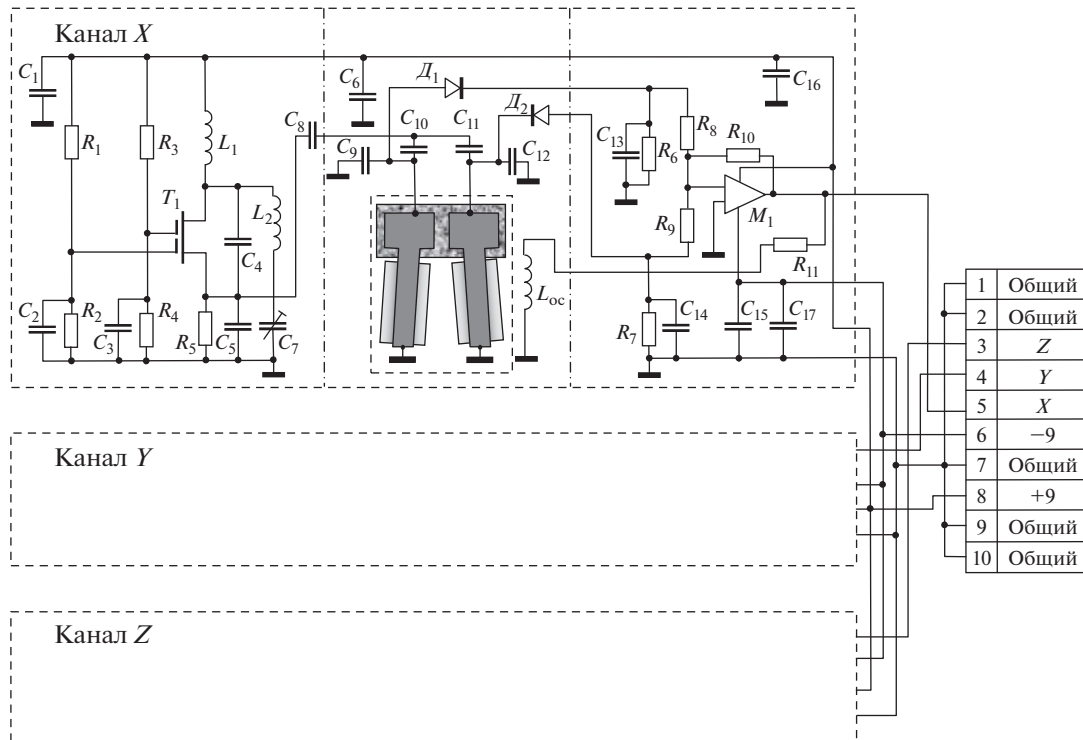


Рис. 7. Структурная схема магнитометра слабых полей.

с нулевой магнитоотрицательной. У таких пленок ширина линии ферромагнитного резонанса (ф.м.р.), измеренная на частоте 2.3 ГГц, составляет $\Delta H \approx 7$ Э, поле магнитной анизотропии небольшое, $H_a \approx 5$ Э, намагниченность насыщения также сравнительно невелика, $M_s \approx 860$ Гс. В таких пленках магнитная проницаемость на с.в.ч. невелика, зато в них малы параметры амплитудной δH_a и угловой $\delta \alpha_a$ дисперсий, что существенно понижает магнитные шумы. Высокой магнитной проницаемостью на с.в.ч. обладают химически осажденные нанокристаллические пленки кобальта [22], которые перспективны для использования в магнитных датчиках, но для них пока не решена проблема “старения”.

У изготовленных нами для микрополосковых датчиков пермаллоевых пленок состава $Ni_{75}Fe_{25}$ намагниченность насыщения составляет $M_s \approx 1100$ Гс, магнитная анизотропия $H_a \approx 8$ Э, ширина линии ф.м.р., измеренная на частоте 2.3 ГГц, $\Delta H \approx 5$ Э, что значительно лучше соответствующих характеристик пленок из пермаллоя состава $Ni_{80}Fe_{20}$. Важно также отметить, что в рассмотренной конструкции микрополоскового датчика наблюдается существенное снижение шумов от пленок, в отличие от датчиков на катушках индуктивностей. Этому способствует, во-первых, тот факт, что наиболее протяженные края т.м.п., являющиеся основным источником шума, не попадают в область высокочастотных магнитных полей м.п.р. (см. рис. 1а), поэтому эти участки не участвуют в формировании сигнала. Во-вторых, благодаря малым размерам с.в.ч.-датчиков ($\sim 11 \times 5$ мм) размеры пленок также малы (5×4 мм), а значит, и малы дисперсии характеристик одноосной магнитной анизотропии δH_a и $\delta \alpha_a$ [19, 22].

Кроме того, на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса [23] по всей площади (60×48 мм²) изготовленной тонкопленочной магнитной структуры измерялись с шагом 1 мм распределения намагниченности насыщения, ве-



Резисторы								
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6, R_7	R_8, R_9	R_{10}	R_{11}
6.8 к	470	6.2 к	4.3 к	100	91 к	18 к	1 М	200
Конденсаторы								
C_1, C_3	C_2, C_6, C_8	C_4	C_5	C_7	C_9, C_{12}	C_{10}, C_{11}	C_{13}, C_{14}	$C_{15}-C_{17}$
3.3 н	0.1	2.2 п	4.7 п	4–30 п	20 п	3.3 п	100 п	0.1

Рис. 8. Принципиальная электрическая схема векторного магнитометра слабых полей.

личины и направления поля одноосной магнитной анизотропии и ширины линии ф.м.р. Это позволило нам “выкраивать” участки магнитной структуры заданных размеров с наиболее однородными характеристиками и тем самым минимизировать магнитные шумы от т.м.п.

В результате установлено, что шумы разработанного магнитометра малы и обусловлены, главным образом, элементами схемы: генератором накачки, детекторами и операционным усилителем. Частота генератора накачки, совпадающая с резонансными частотами м.п.р., выбрана сравнительно низкой (~ 0.46 ГГц) для того, чтобы датчики при относительно небольшом смещающем поле H_0 могли работать в режиме, близком к ф.м.р.

Одной из самых важных характеристик магнитометров является порог чувствительности к измеряемому полю, который характеризуется амплитудой шума $V_{ш}$, как правило, измеряемого в частотной полосе шириной 1 Гц. На рис. 9 для каждого канала изготовленного магнитометра представлены экспериментальные зависимости $V_{ш}$ от частоты измеряемого сигнала f . Измерение шумов проводилось в лабораторных условиях, при этом магнитометр размещали внутри трехслойного магнитного экрана из пермаллоя с толщиной стенок 1.0 мм, позволяющего снизить лабораторные магнитные поля примерно на три порядка. Электропитание магнитометра осуществлялось от аккумуляторов, а выходной сигнал измерялся селективным нановольтметром. Видно, что амплитуда шумов каждого из трех каналов магнитометра

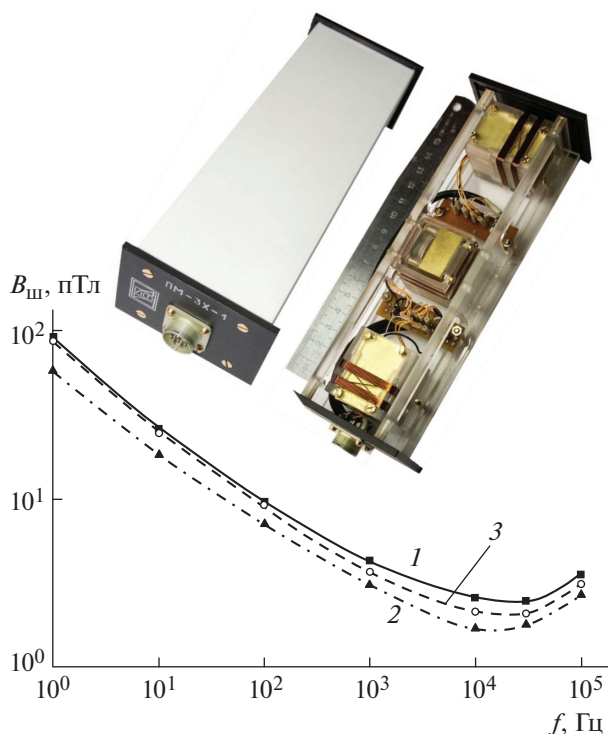


Рис. 9. Частотные зависимости амплитуды шума для X-канала (1), Y-канала (2) и Z-канала (3) векторного магнитометра на тонких магнитных пленках, измеренные в полосе 1 Гц. На вставке – фотографии магнитометра в сборе (слева) и со снятым защитным кожухом (справа).

достаточно мала, причем с ростом частоты она сначала падает, а затем начинает возрастать, при этом минимумы зависимостей $B_{ш}(f)$ попадают в диапазон $10^4–10^5$ Гц.

На рис. 9 представлены также фотографии изготовленного магнитометра в сборе и при снятом защитном корпусе. Платы с.в.ч.-генератора и выходного усилителя для качественного экранирования друг от друга расположены в отдельных отсеках латунных корпусов. Чувствительные элементы на основе двух микрополосковых резонаторов с т.м.п., детекторы и 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 $H_0 \approx 10$ Э, выполнена на основе постоянных миниатюрных магнитов и магнитопроводов из магнитомягкого железа.

Ниже приведены основные технические характеристики разработанного и изготовленного

опытного образца векторного магнитометра слабых магнитных полей:

Диапазон измеряемых магнитных полей, Тл	$10^{-10}–10^{-4}$
Диапазон рабочих частот, Гц	$10^{-1}–10^5$
Отклонение взаимно ортогональных осей каналов, градус, не хуже	1
Коэффициент преобразования, мВ/мкТл	60
Напряжение питания, В	± 9
Потребляемая мощность, Вт	0.5
Габариты, мм	$190 \times 66 \times 46$
Вес, г	385

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

По сравнению с традиционными феррозондовыми магнитометрами на тонких магнитных пленках верхняя граница рабочих частот увеличена почти на порядок благодаря использованию микрополосковых резонаторов вместо колебательных контуров на сосредоточенных емкостях и индуктивностях. Катушки индуктивности в магнитометрах на колебательных контурах, намотанные непосредственно на подложку с осажденной на ней т.м.п, экранируют внешние высокочастотные магнитные поля, а поэтому существенно понижают верхнюю границу рабочих частот. Тонкопленочные датчики в микрополосковом исполнении лишены этих недостатков. Это открывает возможность еще большего расширения полосы их рабочих частот, однако для этого потребуются в первую очередь уменьшить индуктивность колец Гельмгольца в цепи обратной связи используемой компенсационной схемы магнитометра.

Диаграмма направленности каждого из трех каналов изготовленного опытного образца векторного магнитометра имеет форму “восьмерки” в плоскости микрополосковой структуры, что дает возможность с высокой точностью измерять не

только величину, но и направление магнитного поля.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Шелкин А.П.* Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
2. *Erkan K., Jekeli C.* // Journal of Applied Geophysics. 2011. V. 74. P. 142; doi 10.1016/j.jappgeo.2011.03.006
3. *Ciudad D., Díaz-Michelena M., Pérez L., Aroca C.* // Sensors. 2010. V. 10. P. 1859; doi 10.3390/s100301859
4. *Gaffney C.* // Archaeometry. 2008. V. 50. № 2. P. 313; doi 10.1111/j.1475-4754.2008.00388.x
5. *Dalan R.A.* // Archaeological Prospection. 2008. V. 15. P. 1; doi 10.1002/arp.323
6. *Введенский В.Л., Ожогин В.И.* Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. М.: Наука, 1986.
7. *Díaz-Michelena M.* // Sensors. 2009. V. 9. P. 2271; doi 10.3390/s90402271
8. *Александров Е.Б., Вершовский А.К.* // УФН. 2009. Т. 179. Вып. 6. С. 605; doi 10.3367/UFNг.0179.200906f.0605
9. *Абрамзон Г.В., Обоишев Ю.П.* Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
10. *Бабицкий А.Н., Блинников Е.П., Владимиров А.Г., Гитарц Я.И., Поляков В.В., Фролов Г.И.* // Геофизическая аппаратура. 1991. Вып. 94. С. 21.
11. *Irons H.R., Schwee L.J.* // IEEE Trans. on Magnetic. Mag-8. 1972. P. 61.
12. *Bader C.J., DeRenzi C.S.* // IEEE Trans. on Magnetic. V MAG 10.3. 1974. P. 524.
13. *Беляев Б.А., Бутаков С.В., Лексиков А.А.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 3. С. 228.
14. *Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 271.
15. *Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Лексиков А.А.* // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 275.
16. *Беляев Б.А., Сержантов А.М.* // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 3. С. 300.
17. *Беляев Б.А., Дрокин Н.А., Шабанов В.Ф.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 111.
18. *Беляев Б.А., Бабицкий А.Н., Лексиков А.А.* Патент № 2536083 РФ // БИ. 2014. № 35.
19. *Беляев Б.А., Изотов А.В., Кипарисов С.Я.* // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. Вып. 4. С. 248.
20. *Беляев Б.А., Изотов А.В.* // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 9. С. 1651.
21. *Бабицкий А.Н., Беляев Б.А., Скоморохов Г.В., Изотов А.В., Галеев Р.Г.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 7. С. 36.
22. *Беляев Б.А., Изотов А.В., Кипарисов С.Я., Скоморохов Г.В.* // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 4. С. 650.
23. *Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A.* // IEEE Sensors Journal. 2005. V. 5. № 2. P. 260.