

На правах рукописи



Боев Никита Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО
МАГНИТОМЕТРА СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО РЕЗОНАТОРА
С ТОНКОЙ МАГНИТНОЙ ПЛЕНКОЙ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2019

Работа выполнена в Институте физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Научный руководитель: Беляев Борис Афанасьевич, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Малютин Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), главный научный сотрудник НИИ систем электрической связи (НИИ СЭС) ТУСУР, г. Томск.

Журавлев Виктор Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Радиоэлектроники Радиофизического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск.

Защита состоится:

«26» апреля 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 003.075.02 на базе федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, ИФ СО РАН) по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, ст. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН

и на сайтах <http://ksc.krasn.ru>, <http://kirensky.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.075.02

доктор физико-математических наук



Втюрин Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационного исследования. Высокочувствительные датчики слабых магнитных полей и магнитометры на их основе находят широкое применение при решении многих научно-технических задач [1–5]. В зависимости от сферы применения к современным магнитометрам предъявляется ряд требований, например: к линейности и долговременной стабильности параметров; к большому динамическому диапазону и низкому уровню собственных шумов; к широкому частотному диапазону; к простоте конструкции, надежности при малой стоимости; к стойкости к внешним воздействующим факторам; к габаритам и массе и др. Создание универсального магнитометрического устройства, одновременно удовлетворяющего предельным требованиям по каждому параметру – задача практически нереализуемая. Поэтому на сегодняшний день для решения конкретных узкоспециализированных задач разработаны десятки типов магнитоизмерительных преобразователей, работающих на различных физических принципах.

Для решения ряда задач требуются магнитометры, работающие в широкой полосе частот (от десятков миллигерц до сотен килогерц), обладающие при этом высокой чувствительностью. Например, при поиске и разведке рудных месторождений, прогнозировании месторождений углеводородов, а также при решении различных задач инженерной геологии, гидрогеологии и археологии используется один из высокоинформативных методов электромагнитной разведки – метод переходных процессов [6]. При использовании данного метода производят измерение динамики неустановившегося электромагнитного поля, являющегося откликом на искусственно созданное импульсное электромагнитное воздействие. Для повышения информативности метода требуется измерение вектора магнитного поля во многих точках исследуемой области. Поэтому магнитометр для таких исследований должен быть компактным, обладать малым энергопотреблением и быть сравнительно дешевым.

Таким образом, актуальной является задача создания магнитометра, способного работать в широкой полосе частот с низким уровнем собственных шумов, малыми габаритами и массой, низким энергопотреблением и невысокой стоимостью. В полной мере указанным требованиям удовлетворяет разработанный и исследованный в настоящей работе широкополосный магнитометр слабых магнитных полей и векторный магнитометр на его основе, чувствительным датчиком в которых является микрополосковый резонатор (МПР) с тонкой магнитной пленкой (ТМП).

Перспективным направлением разработки систем связи специального назначения является проектирование ближнепольных магнитных систем связи [7]. В этих системах для передачи цифровой информации используется переменное магнитное поле с частотами от единиц до сотен килогерц, что позволяет обеспечить связь с подземными и подводными объектами в случаях, когда традиционные системы связи на основе электромагнитных волн не эффективны. Приемной антенной ближнепольной системы связи является магнитометр, причем в простейшем случае может использоваться магнитная рамочная антенна – индукционный магнитометр. Однако эффективная работа ближнепольных систем связи возможна только на низких частотах, что затрудняет создание высокочувствительных широкополосных индукционных магнитометров с приемлемыми габаритами и массой. Кроме этого, магнитные рамочные антенны чувствительны к электрической составляющей электромагнитного поля, что отрицательно сказывается на помехоустойчивости систем связи, особенно при работе в условиях городского электромагнитного шума и промышленных помех. Разработанный и исследованный в данной работе векторный магнитометр хорошо подходит в качестве приемной антенны для решения задач ближнепольной магнитной связи.

Помимо перечисленных выше и подробно рассмотренных в тексте диссертационной работы областей применения магнитометров существует множество других задач, при решении которых они также могут быть эффективны [8]. В частности, бесконтактное измерение тока; магнитные системы локации и навигационно-измерительные системы; геофизические

измерения; биомагнитные измерения; системы связи (использование в качестве магнитной антенны); различные системы безопасности; магнитные измерительные решетки для визуализации структуры магнитных полей рассеяния и др. Таким образом, актуальность работы определяется также необходимостью создания и исследования новых специализированных конструкций высокочувствительных магнитометров для самых различных применений.

Чувствительным элементом разработанного датчика является тонкая магнитная пленка, от параметров которой зависят характеристики магнитометра. В частности, от неоднородностей магнитных характеристик и характера их распределения по площади тонкопленочных образцов [9], связанных с несовершенством технологии изготовления ТМП. Одним из самых информативных методов для измерения основных магнитных параметров ТМП, в том числе необходимых при отработке технологии их получения, является метод ферромагнитного резонанса (ФМР), реализованный в сканирующем спектрометре ФМР [10]. Точность измерения магнитных параметров пленок в этом спектрометре определяется характеристиками сверхвысокочастотной (СВЧ) головки, поэтому задача увеличения ее чувствительности является актуальной, как и задача создания автоматизированного комплекса для измерения интегральных магнитных характеристик тонкопленочных образцов при исследовании разрабатываемых магнитометров.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование новой конструкции широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Анализ существующих средств измерений параметров магнитного поля, в том числе использующих в конструкциях датчиков тонкие магнитные пленки в качестве чувствительного элемента.

2. Разработка новой конструкции широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, удовлетворяющего следующим требованиям: полоса рабочих частот от 10^{-2} до 10^6 Гц; уровень собственных шумов не более 10^{-11} Тл/Гц^{1/2} на частоте 1 Гц, менее $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2} на частотах более 10^4 Гц.

3. Создание автоматизированного комплекса и разработка экспериментальных методик для измерения интегральных магнитных характеристик ТМП, используемых в датчиках, а также создание автоматизированного комплекса для измерения характеристик разрабатываемых магнитометров.

4. Разработка новой конструкции высокочувствительной измерительной СВЧ-головки сканирующего спектрометра ФМР, используемого для измерения распределения неоднородностей магнитных параметров по площади тонкопленочных образцов.

5. Проведение лабораторных и полевых испытаний магнитометров на основе разработанной конструкции датчика слабых магнитных полей в задачах геофизики и ближнепольной магнитной связи.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Разработана и исследована новая конструкция магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, обладающей одноосной магнитной анизотропией, содержащего СВЧ-генератор, амплитудный детектор и систему формирования постоянного магнитного поля смещения. Конструкция отличается от известных решений ориентацией магнитных полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) магнитной пленки, а постоянное поле смещения направлено под небольшим оптимальным углом к ОТН, при этом направление максимума чувствительности датчика к измеряемому полю примерно совпадает с осью легкого намагничивания (ОЛН) ТМП.

2. Создан автоматизированный измерительный комплекс и разработаны методики, позволяющие проводить измерение интегральных характеристик ТМП, а также характеристик датчиков на их основе. Разработанный комплекс отличается возможностью формирования произвольной ориентации постоянных и переменных магнитных полей и позволяет в автоматическом режиме измерять с необходимой точностью как характеристики ТМП, так и характеристики датчиков слабых магнитных полей. В автоматизированном комплексе реализованы резонансные и нерезонансные методики измерений с использованием СВЧ-генератора для создания поля возбуждения и измерения частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи (S -параметров).

3. Разработана новая конструкция СВЧ-головки сканирующего спектрометра ФМР, которая состоит из чувствительного элемента, выполненного в виде миниатюрного резонатора с измерительным отверстием и подключенного к СВЧ-генератору, а также амплитудного детектора, размещенных в немагнитном корпусе с разъемом. Отличительной особенностью конструкции является резонатор, образованный нерегулярными отрезками полосковых линий, расположенными на одной печатной плате с элементами генератора и амплитудного детектора. Отрезок полосковой линии с измерительным отверстием в экране располагается в профрезерованном пазу или на внутреннем слое многослойной печатной платы.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Разработанный датчик является универсальным магнитометрическим устройством и может использоваться при решении широкого круга научно-технических и исследовательских задач, например, при реализации различных методов электромагнитных геофизических исследований, в системах магнитной связи в качестве широкополосной антенны, в военных целях, в медицине и в охранной сигнализации. Разработанный датчик имеет малые массу и габариты, является простым и сравнительно дешевым при серийном производстве, при этом он обладает чувствительностью, превышающей более чем на порядок чувствительность известных конструкций датчиков на ТМП. Уровень собственных шумов датчика на частоте 1 Гц составляет 10^{-11} Тл/Гц^{1/2}; на частотах более 10^2 Гц чувствительность датчика превышает чувствительность лучших феррозондовых преобразователей, а на частотах выше 10^4 Гц, вплоть до частоты до 10^6 Гц, уровень шумов снижается до 10^{-13} Тл/Гц^{1/2}.

2. Разработанный автоматизированный измерительный комплекс позволяет значительно ускорить процесс проведения измерений характеристик ТМП и характеристик чувствительных элементов датчиков. С использованием комплекса удается проводить исследования с большим числом измерений порядка 10^8 , что практически невозможно в режиме ручных измерений.

3. Чувствительность разработанной конструкции СВЧ-головки для сканирующего спектрометра ФМР увеличена на 20 дБ, что дает возможность проводить измерения без накопления сигнала на локальных участках ТМП толщиной менее 100 Å, значительно сокращая время проведения измерений. Конструкция головки проста в изготовлении и настройке, что позволило изготовить более 100 СВЧ-головок, перекрывающих с малым шагом широкий диапазон частот от 0,1 до 6,0 ГГц.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная конструкция магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой, работающего в диапазоне частот 10^2 – 10^6 Гц и в диапазоне полей 10^{-13} – 10^{-4} Тл. Уровень собственных шумов магнитометрического преобразователя на частоте 1 Гц составляет 10^{-11} Тл/Гц^{1/2}, а на частотах от 10^4 до 10^6 Гц не превышает $2 \cdot 10^{-13}$ Тл/Гц^{1/2}.

2. Автоматизированный измерительный комплекс, предназначенный для измерений основных магнитных характеристик (эффективная намагниченность насыщения, величина и направление поля одноосной магнитной анизотропии) тонкопленочных образцов,

используемых в чувствительных элементах датчиков, а также для измерения характеристик датчиков слабых магнитных полей.

3. Резонансная и нерезонансная методики измерения интегральных магнитных характеристик ТМП с использованием новой конструкции микрополоскового преобразователя. Разработанные методики дают возможность измерения магнитных характеристик тонкопленочных образцов и коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика.

4. СВЧ-головка новой конструкции для локального спектрометра ФМР, которая обладает чувствительностью, позволяющей измерять магнитные параметры локальных участков площадью $0,8 \text{ мм}^2$ тонкопленочного образца толщиной 100 \AA без накопления сигнала. Разработанная конструкция головки перекрывает частотный диапазон от 0,1 до 6,0 ГГц.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

– Проект по теме «Разработка радиофизических методов диагностики тонкопленочных магнитных материалов – активных сред электрически управляемых устройств СВЧ-электроники». Государственное задание №3.528.2014К (2014–2016 гг.).

– Прикладные научные исследования по теме «Разработка и изготовление широкополосной активной магнитной антенны для систем ближнепольной магнитной связи». Уникальный идентификатор работ RFMEFI60417X0179 (2017–2019 гг.).

– Проект по теме «Исследование возможности создания систем ближнепольной магнитной связи с использованием приемников на микрополосковых структурах с тонкими магнитными пленками». Государственное задание №3.1031.2017/ПЧ (2017–2019 гг.).

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и обсуждались на конференциях: Третья всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», Россия, г. Красноярск, 2016 г. Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления», Россия, п. Домбай, 2017 г. Четвертая всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», Россия, г. Красноярск, 2017 г. Тринадцатая международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Россия, г. Томск, 2017 г. Международная конференция «IEEE Sensors-2017», Великобритания, г. Глазго, 2017 г. Двенадцатая международная конференция «European Magnetic Sensors and Actuators», Греция, г. Афины, 2018 г.

Публикации по теме работы. Всего по теме работы опубликовано 28 работ, из них: опубликовано в журналах из перечня ВАК, индексируются базами WoS, Scopus – 7 статей; получено патентов РФ – 5 шт.; зарегистрировано программ ЭВМ – 6 шт.

Личный вклад автора. Все представленные в работе результаты получены лично автором или при непосредственном его участии: автор разработал и исследовал новую конструкцию широкополосного магнитометра слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с тонкой магнитной пленкой; разработал автоматизированный измерительный комплекс, методики измерений интегральных характеристик ТМП и чувствительных элементов датчиков; разработал новую конструкцию СВЧ-головки для сканирующего спектрометра ФМР; исследовал различные варианты применения разработанного магнитометра, в частности, разработал аппаратуру ближнепольной магнитной связи и провел ее испытания в воздушной среде, в пресном водоеме, в морской воде, провел испытания разработанного для геофизических исследований магнитометра.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием сертифицированного и поверенного оборудования, воспроизводимостью результатов

измерений при использовании различных приборов и методов измерений, а также совпадением экспериментальных результатов с результатами теоретических расчетов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 12 приложений. Общий объем диссертации – 143 страницы, включая 81 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

Первая глава диссертационной работы представляет собой обзор датчиков магнитных полей, построенных на основе различных физических явлений и эффектов. Задачей главы является классификация различных магнитометрических преобразователей с целью определения места в классификации для разработанных и исследованных в данной работе магнитометров на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Кратко приводятся сравнительные характеристики основных магнитометрических преобразователей (классических: магнитомеханических, индукционных, гальваномангнитных, магнитооптических; квантовых: электронно-, ядерно-, атомно-прецессионных, на эффекте Джозефсона, SERF-магнитометров), указываются ближайшие функциональные аналоги исследуемых в данной работе магнитометров. Отдельно рассматриваются различные типы датчиков на магнитных пленках, указываются отличительные особенности разработанных магнитометров, приводятся сравнительные характеристики. Описываются существенные отличия исследуемого в диссертационной работе магнитометра от известных образцов. Предельные характеристики разработанного магнитометра определяются характеристиками тонких магнитных пленок, поэтому в первой главе рассматриваются методы измерения их магнитных характеристик.

Вторая глава посвящена описанию разработанных и исследованных конструкций магнитометров и градиентометров, а также описанию вариантов их практического применения. Описывается конструкция нового магнитометра на основе микрополоскового резонатора с ТМП, отличительной особенностью которого является ориентация магнитных полей чувствительного элемента: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль ОТН; постоянное поле смещения направлено под небольшим оптимальным углом к ОТН; максимум чувствительности направлен примерно вдоль ОЛН (рисунок 1).

Рассмотрим принципы работы данной конструкции. Направление постоянного поля смещения $H_{см}$ определяет рабочую точку и режим работы датчика. В случае, когда постоянное поле смещение $H_{см}$ больше поля анизотропии пленки H_k , а также направлено вдоль ОТН и поля $H_{вч}$, условия для возникновения ФМР в ТМП отсутствуют.

Воздействие низкочастотного измеряемого поля $H_{изм}$, направленного вдоль ОЛН, приводит к отклонению результирующего вектора магнитного поля и отклонению равновесного положения магнитного момента M . С изменением равновесного направления намагниченности ТМП происходят изменения компонент тензора магнитной восприимчивости

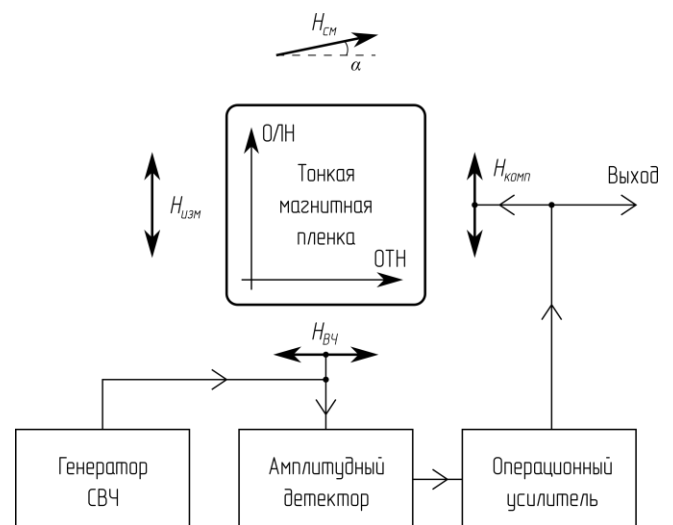


Рисунок 1 – Структурная схема датчика магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП:
 $H_{см}$ – поле смещения; $H_{изм}$ – измеряемое поле;
 $H_{вч}$ – высокочастотное поле возбуждения;
 $H_{комп}$ – компенсационное поле

и, как следствие, энергии СВЧ-поглощения E_n (рисунок 2, а). Таким образом, воздействие внешнего поля $H_{изм}$ приводит к изменению вносимых в колебательных контур потерь и изменению его добротности, что влияет на амплитуду колебаний на контуре и регистрируется амплитудным детектором (АД). В случае, когда угол α между ОН и $H_{см}$ равен нулю, на АД регистрируется сигнал удвоенной частоты поля $H_{изм}$ (рисунок 2, а).

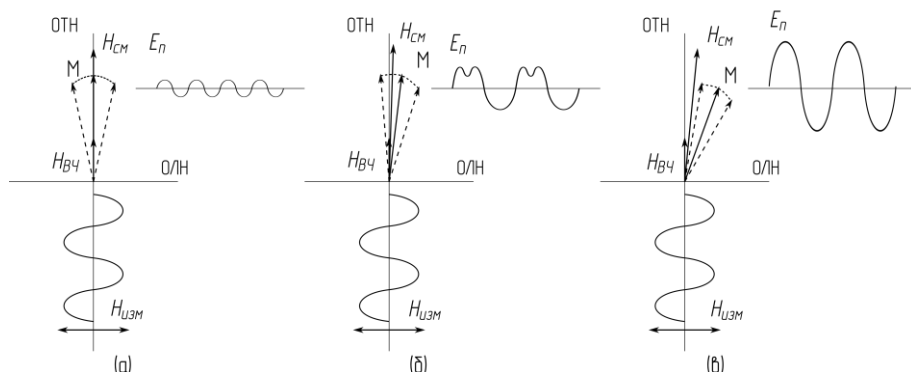


Рисунок 2 – Режимы работы датчика при различных углах α между ОН и $H_{см}$: а – режим удвоения частоты; б – переходный режим; в – линейный режим

Для линейного режима характерно наличие в спектре только составляющей с частотой $H_{изм}$. Существует некоторый оптимальный угол α , при котором коэффициент преобразования датчика максимален и последующее увеличение угла приводит к снижению чувствительности.

На рисунке 3 (а) показана экспериментально полученная зависимость значения коэффициента преобразования $K_{пр}$, нормированного на максимальное значение $K_{пр макс}$, от значения поля смещения, нормированного на величину поля анизотропии H_k . Максимальное значение $K_{пр}$ соответствует смещающему полю, равному H_k , однако работе датчика в этих условиях соответствует большой уровень магнитных шумов ТМП и явление гистерезиса. На практике рабочее значение $H_{см}$ выбирается около $(1,1-1,2) \cdot H_k$, что позволяет значительно снизить шумы ТМП при приемлемом уменьшении $K_{пр}$. На рисунке 3 (б) показана зависимость значения коэффициента преобразования $K_{пр}$ от угла между направлением постоянного поля смещения $H_{см}$ и ОН. Максимум $K_{пр}$ наблюдается для двух значений угла α .

Для уменьшения шумов измерительного преобразователя и повышения чувствительности датчика разработана и исследована конструкция датчика с двумя резонаторами и двумя ТМП (рисунок 4).

Постоянное поле смещения $H_{см}$ в такой конструкции направлено строго вдоль ОН. Для установки рабочей точки датчика в линейный режим полоски резонатора фиксируют под углом α в противоположных направлениях. Однополупериодный выпрямитель одного из АД настраивается на работу на положительной полувольтне, второго АД – на отрицательной.

Увеличение угла α приводит к искажению выходного сигнала датчика: амплитуда второй гармоники $H_{изм}$ убывает, в спектре появляется составляющая с частотой изменения поля $H_{изм}$ (рисунок 2, б). При дальнейшем увеличении угла α коэффициент преобразования растет, в работе датчика устанавливается линейный режим (рисунок 2, в).

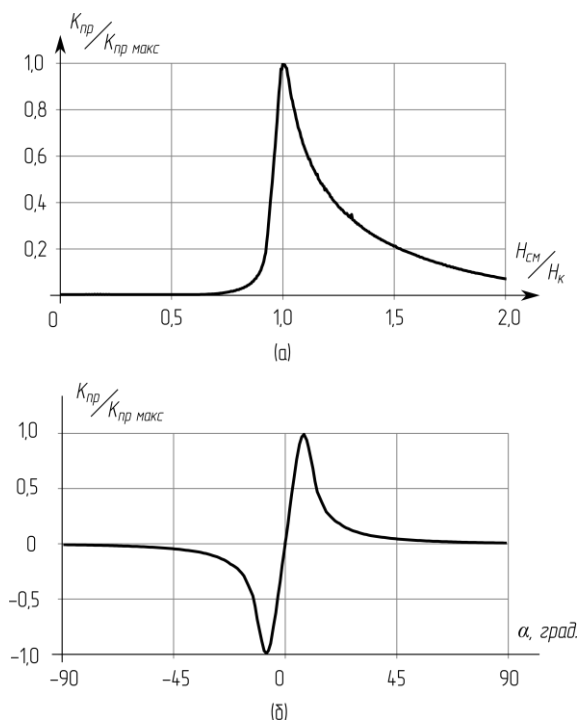


Рисунок 3 – Экспериментально измеренные зависимости коэффициента преобразования от величины (а) и угла (б) поля смещения $H_{см}$

Постоянные составляющие на выходах АД равны по модулю и противоположны по знаку, переменные составляющие равны по модулю и синфазны в силу поворота полосков резонаторов в противоположные стороны. Суммирование сигналов на входе операционного усилителя (ОУ) позволяет избавиться от постоянных составляющих на выходах АД и удвоить уровень полезного сигнала. Амплитудные шумы СВЧ-генератора частично компенсируются на ОУ, что дополнительно повышает чувствительность данной конструкции.

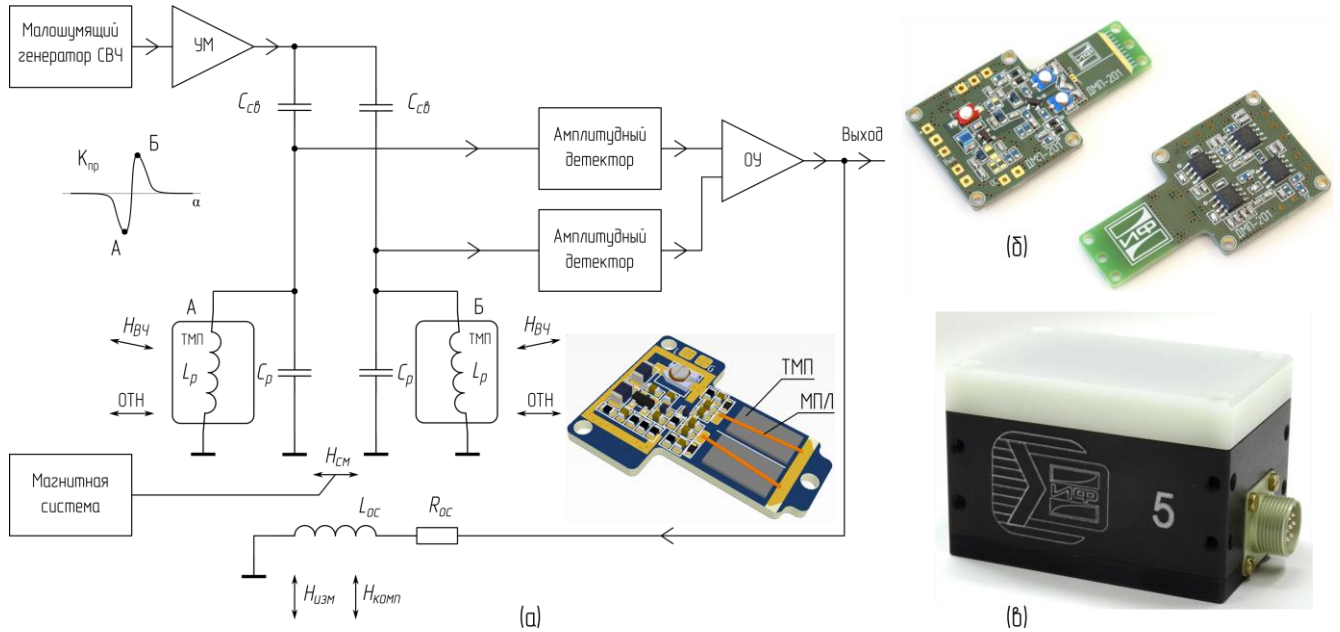


Рисунок 4 – Функциональная схема датчика слабых магнитных полей на основе двух микрополосковых резонаторов с ТМП – а; печатная плата магнитометра с установленными электрорадиоизделиями – б; внешний вид магнитометра – в

Разработана одномерная модель миниатюрного датчика слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП [11, 12], которая позволила в квазистатическом приближении получить необходимые формулы для численного расчета рассмотренной конструкции (рисунок 5).

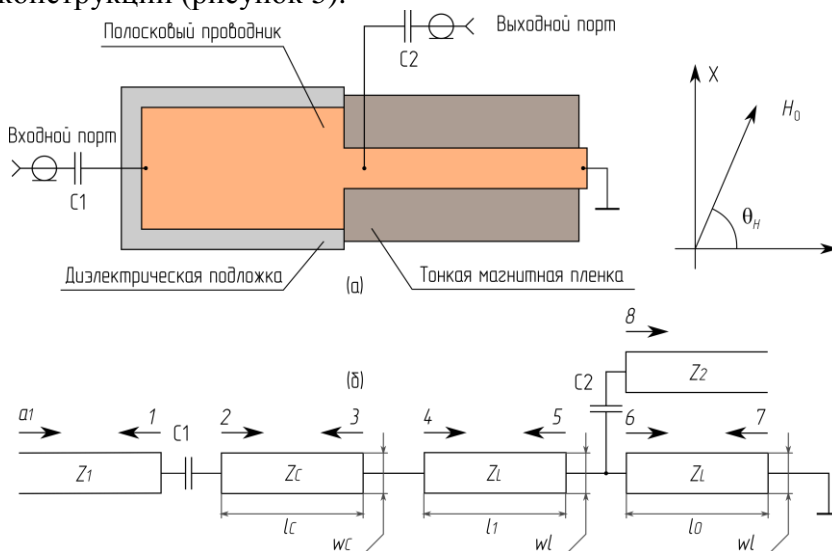


Рисунок 5 – Конструкция датчика на нерегулярном четвертьволновом полосковом резонаторе с тонкой магнитной пленкой – а и его одномерная модель – б

Расчет позволяет проводить теоретически исследование влияния различных конструктивных параметров датчика, в том числе и параметров магнитной пленки, на характеристики устройства. Учитывая большое количество параметров микрополосковой структуры и магнитной пленки, влияющих на характеристики датчика, такие исследования необходимы для оптимизации его конструкции с целью достижения предельно высоких характеристик.

Теоретический расчет позволил исследовать влияние угловой и амплитудной дисперсии одноосной магнитной анизотропии ТМП, характеризуемой нормальным законом распределения, на характеристики датчика. Показано, что с ростом амплитудной и угловой дисперсии поля анизотропии коэффициент преобразования датчика монотонно уменьшается, причем угловая дисперсия оказывает более сильное влияние на K . Увеличение угловой дисперсии анизотропии $\delta\theta_k$ от 0° до 1° уменьшает максимальное значение коэффициента преобразования более чем в два раза (рисунок 6), а при $\delta\theta_k = 5^\circ$ коэффициент преобразования уменьшается более чем в пять раз. Амплитудная дисперсия одноосной магнитной анизотропии сравнительно большой величины $\delta H_k = 2 \text{ Э}$ приводит к уменьшению коэффициента преобразования меньше, чем на 20%.

В таблице 1 приведены характеристики разработанного однокомпонентного магнитометра на основе микрополоскового резонатора с ТМП. Для сравнения приводятся характеристики одного из лучших феррозондовых магнитометров Bartington Mag-13MCL100 [13].

Таблица 1 – Характеристики разработанного магнитометра на основе микрополоскового преобразователя с ТМП

Характеристика	Магнитометр на ТМП (однокомпонентный)	Феррозонд Mag-13MCL100 (трехкомпонентный)
Диапазон полей – нижняя граница – верхняя граница	10^{-13} Тл 10^{-4} Тл	10^{-12} Тл 10^{-4} Тл
Частотный диапазон – нижняя частота – верхняя частота	10^{-2} Гц 10^6 Гц	0 Гц 10^3 Гц
Собственные шумы на частотах – 10^0 Гц – 10^1 Гц – 10^2 Гц – 10^4 Гц и выше	10^{-11} Тл/Гц $^{1/2}$ $3 \cdot 10^{-12}$ Тл/Гц $^{1/2}$ 10^{-12} Тл/Гц $^{1/2}$ 10^{-13} Тл/Гц $^{1/2}$	$6 \cdot 10^{-12}$ Тл/Гц $^{1/2}$
Рабочий диапазон температур	от минус 40 до 70 °С	от минус 40 до 70 °С
Напряжение питания	$\pm 12 \text{ В} \pm 10\%$	от $\pm 12 \text{ В}$ до $\pm 17 \text{ В}$
Энергопотребление	менее 1 Вт	менее 1,5 Вт
Габариты	60x40x40 мм	Ø 25x225 мм
Масса	менее 100 г	83 г

На рисунке 7 показаны результаты измерений шумов разработанного магнитометра. Для сравнения приведены шумы трехкомпонентного малошумящего феррозондового магнитометра Bartington Mag-13MCL100. На частоте 1 Гц феррозондовый преобразователь имеет примерно вдвое меньшие шумы (около 5 пТл/Гц $^{1/2}$); на частотах выше 10^2 Гц чувствительность разработанного магнитометра превышает чувствительность феррозонда. Верхняя граница диапазона частот феррозондового преобразователя – 3 кГц, на этой частоте шумы тонкопленочного магнитометра примерно на порядок меньше.

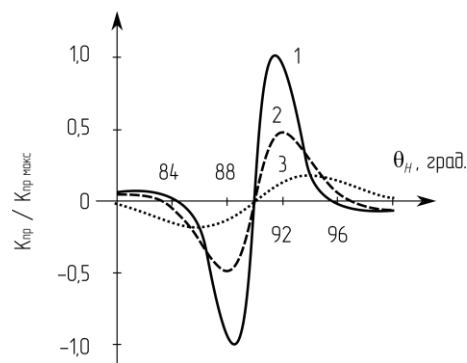


Рисунок 6 – Зависимости нормированных коэффициентов преобразования датчика от угла направления поля подмагничивания, построенные при $H_{см} = 10 \text{ Э}$ для различных значений угловой дисперсии одноосной магнитной анизотропии $\delta\theta_k$: 1 – $\delta\theta_k = 0^\circ$, 2 – 2° , 3 – 5°

Датчики слабых магнитных полей на основе микрополоскового резонатора с ТМП являются универсальными магнитометрическими устройствами, которые могут использоваться при решении самых разнообразных научно-технических задач как в лабораторных, так и в полевых условиях.

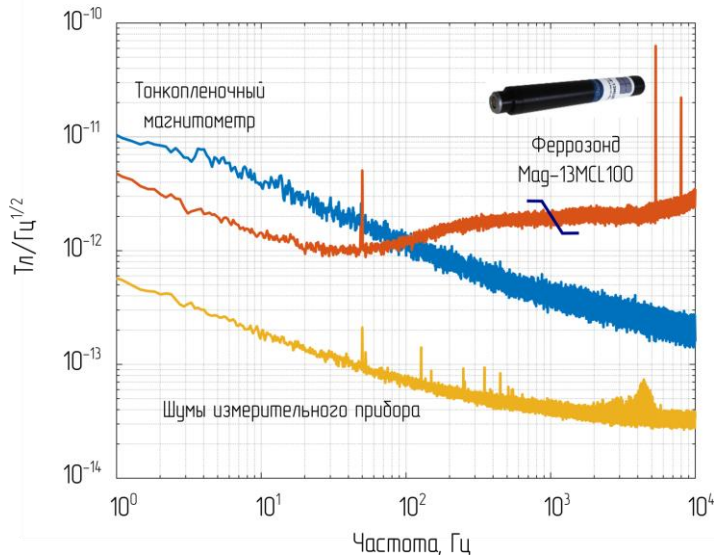


Рисунок 7 – Результаты экспериментальных измерений собственных шумов разработанного магнитометра

Возможность измерения высокочастотных магнитных полей и широкополосных сигналов, а также линейная АЧХ датчиков на ТМП позволяют использовать их в качестве малогабаритных высокочувствительных приемных устройств систем магнитной передачи информации.

Третья глава содержит описание разработанного автоматизированного измерительного комплекса, предназначенного для измерений интегральных магнитных характеристик ТМП и характеристик чувствительных элементов магнитометров.

В измерительном комплексе реализованы различные методы измерений (рисунок 8): резонансный и нерезонансный методы; с использованием СВЧ-генератора для возбуждения чувствительного элемента и с использованием измерителя S-параметров. Отличительной особенностью комплекса является возможность формирования произвольной ориентации полей, например, соответствующей рабочей в датчиках: поле возбуждения $H_{ВЧ}$ направлено вдоль ОНН; направление постоянного поля смещения $H_{см}$ изменяется в широких пределах для поиска оптимального угла α по критерию максимума коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика.

Высокая чувствительность датчиков дает возможность использования их в задачах геомагнитометрии при изучении геологического строения Земли и для поиска полезных ископаемых. Широкая полоса пропускания датчиков позволяет регистрировать широкополосные отклики на ступенчатые воздействия при реализации индуктивных методов электроразведки, например, различных модификаций метода переходных процессов. Малые габариты и масса, а также низкая стоимость позволяют устанавливать внутри магнитной петли большое количество трехкомпонентных датчиков и одновременно снимать показания, что значительно повышает качество измерений.



Рисунок 8 – Методы измерения интегральных магнитных характеристик ТМП

При резонансном методе измерений ТМП помещается внутрь СВЧ-резонатора (рисунок 9, а). Существенным преимуществом резонансного метода измерений является высокий уровень выходного сигнала и, как следствие, высокое отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе измерительной системы, чувствительность которой прямо пропорциональна добротности Q колебательного контура. В большинстве случаев возможна прямая работа измерительной системы – без синхронного детектирования полезного сигнала, что значительно упрощает конструкцию измерительной установки. Нерезонансный метод подразумевает размещение образца ТМП в нерезонансной системе, т. е. в системе, резонансные частоты которой на порядок и более выше области интересующих частот (рисунок 9, б). В качестве индуктивного элемента измерительной системы используется микрополосковая линия или проволочная индуктивность.

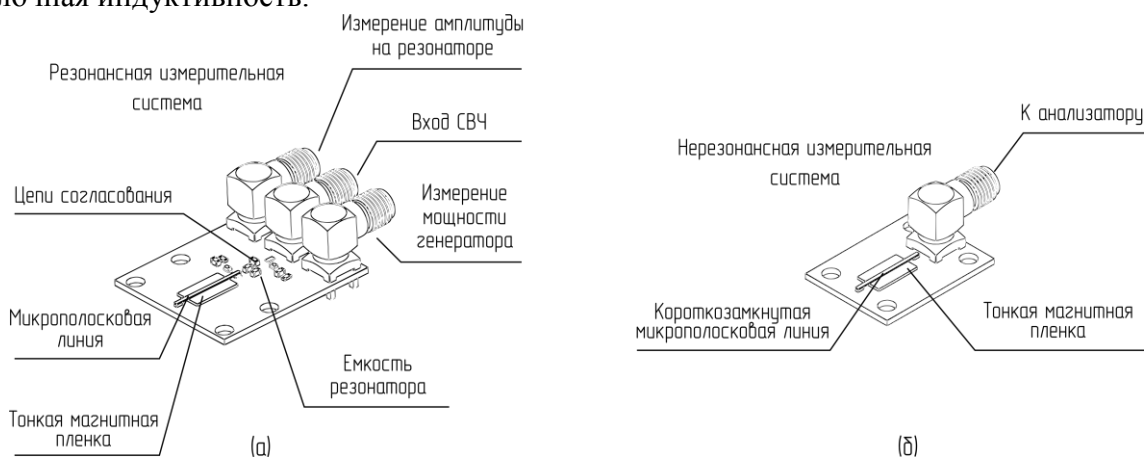


Рисунок 9 – Разработанные конструкции резонансной измерительной системы (а) и нерезонансной (б)

Основным преимуществом нерезонансного метода измерения параметров ТМП является возможность перестройки генератора СВЧ в широком диапазоне частот: от единиц мегагерц до единиц гигагерц. Использование схемы синхронного детектирования дает возможность измерения коэффициента преобразования чувствительных элементов разрабатываемых датчиков.

При серийном изготовлении ТМП для чувствительных элементов датчиков отбор наиболее подходящих образцов основывается на зависимости коэффициента преобразования $K_{пр}$ чувствительного элемента от частоты поля возбуждения $H_{ВЧ}$ и величины постоянного поля смещения $H_{см}$. На рисунке 10 показан пример такой зависимости для образца ТМП состава $Ni_{80}Fe_{20}$, состоящего из 5 слоев по 1500 \AA , $H_k \sim 7 \text{ Э}$, $M_s = 1100 \text{ Гс}$. Каждому значению $K_{пр}$ на графике соответствует некоторый оптимальный угол α .

Проведены измерения более 100 тонкопленочных образцов, что позволило отработать технологию их получения и повысить чувствительность разработанных магнитометров.

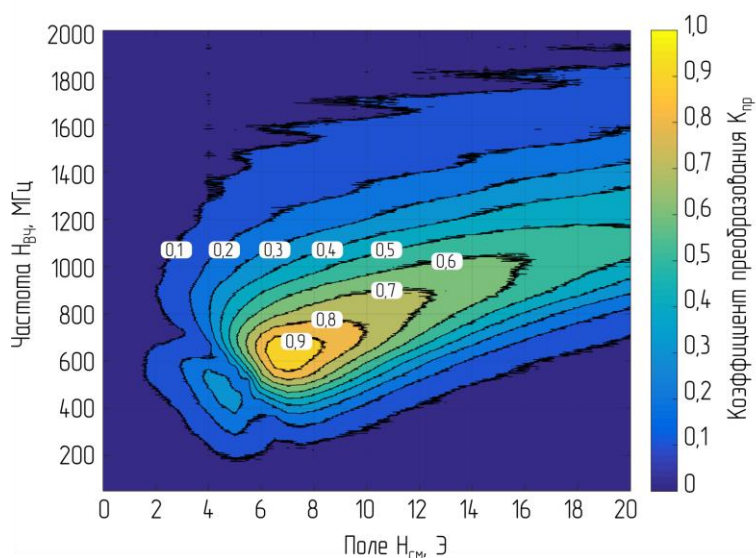


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента преобразования чувствительного элемента датчика от частоты поля возбуждения $H_{ВЧ}$ и величины постоянного поля смещения $H_{см}$

Четвертая глава содержит описание новой конструкции СВЧ-головки локального спектрометра ФМР. На рисунке 11 показана электрическая принципиальная схема СВЧ-головки на диапазон частот 1–3 ГГц и внешний вид одного из вариантов печатной платы.

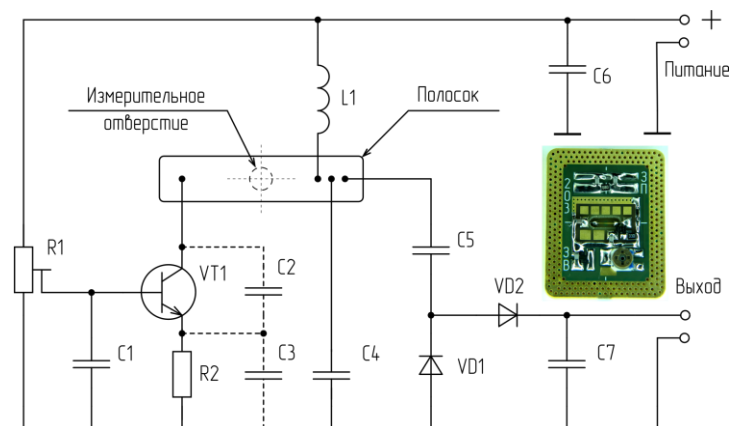


Рисунок 11 – Электрическая принципиальная схема разработанной СВЧ-головки, печатная плата с установленными компонентами

Разработанная конструкция включает чувствительный элемент, выполненный на основе печатной платы, СВЧ-генератор с детектором мощности и немагнитный корпус с разъемом. Чувствительность новой СВЧ-головки увеличена более чем на 20 дБ, что было достигнуто увеличением отношения Q_0/V путем уменьшения эффективного объема резонансной полости V при незначительном снижении добротности ненагруженного резонатора Q_0 . СВЧ-генератор с детектором, полосок резонатора и измерительное отверстие выполняются на одной общей плате, что значительно упрощает серийное изготовление и настройку устройства.

Для исследования различных режимов работы СВЧ-головок спектрометра ФМР разработана автоматизированная измерительная установка, с помощью которой удалось настроить режим работы СВЧ-головки путем подбора оптимального режима работы СВЧ-генератора по отношению сигнал/шум (ОСШ). На рисунке 12 показаны результаты измерения спектров ФМР для образца ТМП толщиной 500 Å и результаты измерения собственных шумов СВЧ-головки.

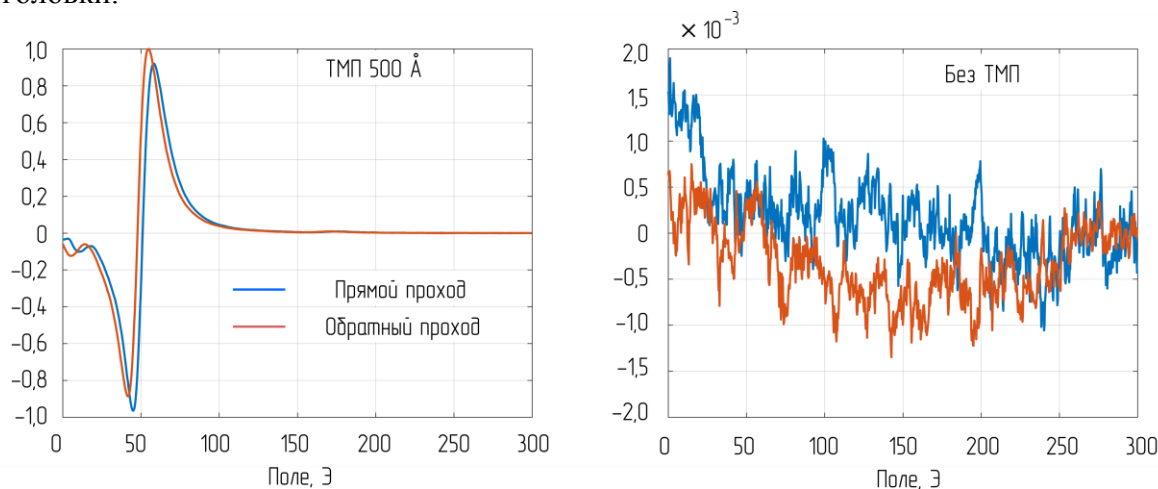


Рисунок 12 – Результаты измерения спектров ФМР ТМП толщиной 500 Å при прямом (ОСШ ~ 638) и обратном (ОСШ ~ 900) проходах по полю (левый рисунок); на правом рисунке показаны собственные шумы измерительной головки при проходе по полю без образца ТМП

Использование новой конструкции головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса для измерения распределений магнитных характеристик тонкопленочных образцов позволило на практике оценить степень влияния неоднородностей величины и направления поля анизотропии ТМП на коэффициент преобразования чувствительного элемента датчика слабых магнитных полей. На рисунке 13 отображены распределения величины и направления поля одноосной магнитной анизотропии тонкопленочного образца, применяемого в качестве чувствительного элемента разработанного магнитометра.

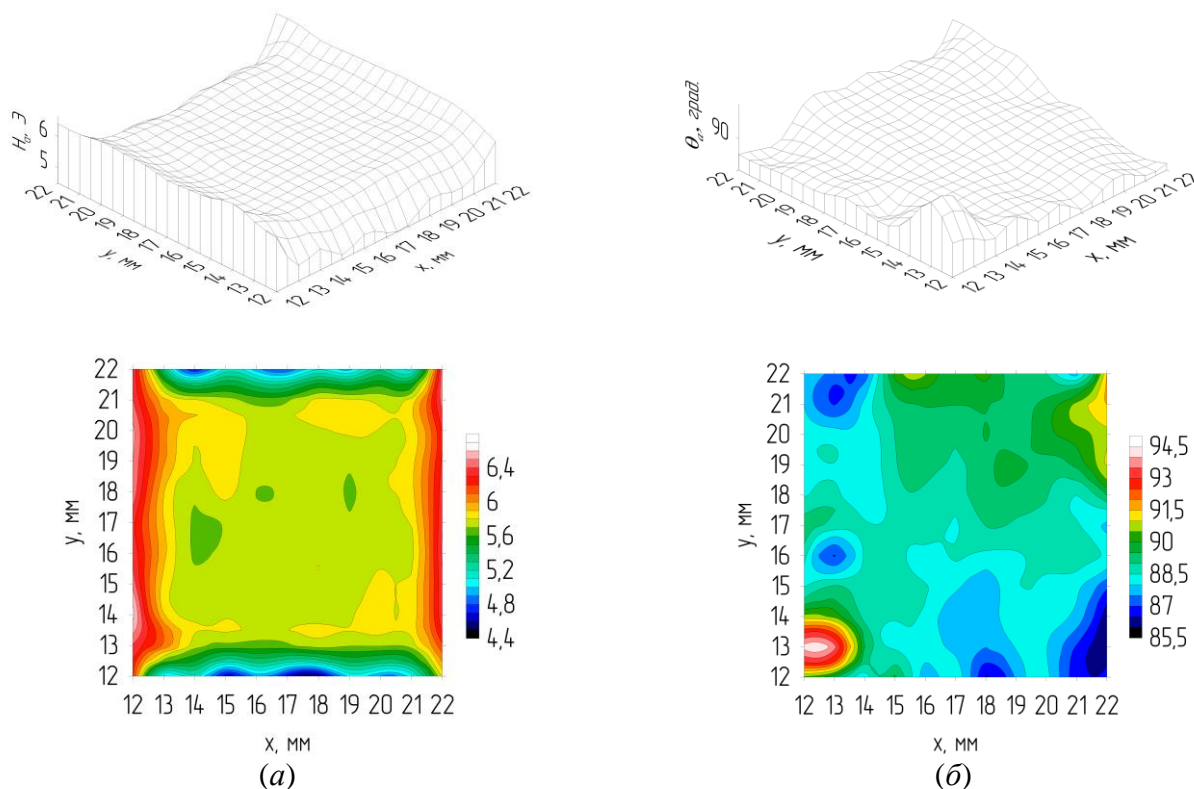


Рисунок 13 – Пример измерения распределений величины (а) и направления (б) поля одноосной магнитной анизотропии ТМП

Для сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса изготовлено более 100 СВЧ-головок (рисунок 14). Конструкция СВЧ-головки оптимизирована с точки зрения упрощения серийного изготовления и настройки.

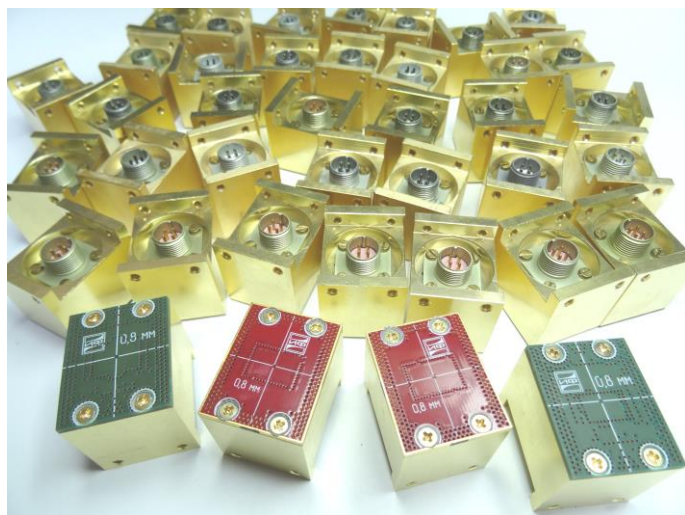


Рисунок 14 – Разработанные СВЧ-головки локального спектрометра ФМР

Существенным отличием разработанной конструкции СВЧ-головки спектрометра ФМР является более чем на 20 дБ высокое ОСШ, что позволяет использовать ее при измерениях параметров особо тонких пленок с толщиной менее 100 Å. Разработанные СВЧ-головки покрывают с малым шагом широкий диапазон частот от 0,1 до 6,0 ГГц, что позволило провести измерение распределений магнитных характеристик более 100 тонкопленочных образцов, отработать технологию их получения и отобрать лучшие образцы для создания чувствительных элементов датчиков слабых магнитных полей с высокими характеристиками.

В приложениях А–В и приложениях Д–Н диссертационной работы приведены результаты измерений параметров чувствительных элементов разработанных датчиков с использованием разработанного автоматизированного измерительного комплекса. В приложении Г отражены результаты испытаний системы ближнепольной магнитной связи с использованием разработанного магнитометра.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана и исследована новая конструкция широкополосного магнитометра слабых магнитных полей, чувствительным элементом в котором является тонкая магнитная пленка, обладающая одноосной магнитной анизотропией, размещенная в микрополосковом резонаторе. Магнитометр содержит также малошумящий СВЧ-генератор с усилителем мощности и магнитную систему для создания постоянного поля смещения. Отличием новой конструкции является ориентация магнитных полей: высокочастотное поле возбуждения направлено вдоль оси трудного намагничивания ТМП; постоянное поле смещение направлено под небольшим оптимальным углом к ОН; направление максимальной чувствительности магнитометра примерно совпадает с ОЛН. В основе работы датчика лежит явление ферромагнитного резонанса – под воздействием внешнего измеряемого поля происходит изменение условий возникновения ФМР в магнитной пленке и, как следствие, изменение потерь, вносимых пленкой в резонатор, что изменяет его добротность и фиксируется амплитудным детектором. Разработаны модификации этой конструкции: датчик, включающий два резонатора с пленками, отличительной особенностью которого является компенсация амплитудных шумов генератора и удвоение полезного сигнала на суммирующем элементе; модуляционный датчик, включающий схему модуляции и схему синхронного детектирования, предназначенный для измерения сигналов с постоянной составляющей. На основе новой конструкции датчика разработаны конструкции градиентометров, обладающие всеми преимуществами датчиков. Собственные шумы магнитометров снижены более чем на порядок – до уровня 10^{-11} Тл/Гц^{1/2} на частоте 1 Гц, что позволяет использовать их для реализации различных методов электромагнитной геофизической разведки. На частотах выше 10^2 Гц чувствительность разработанного датчика превышает чувствительность лучших доступных коммерческих феррозондовых преобразователей. Уровень шума датчиков на высоких частотах – около 10^{-13} Тл/Гц^{1/2}, что дает возможность использования их в качестве компактных широкополосных высокочувствительных магнитных антенн с постоянным коэффициентом преобразования во всем частотном диапазоне.

2. Разработан автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий проводить измерения характеристик ТМП и чувствительных элементов магнитометров различными методами. Отличительной особенностью комплекса является возможность формирования произвольной ориентации магнитных полей, что позволяет измерять как интегральные характеристики ТМП, так и характеристики разрабатываемых магнитометров. Разработанный комплекс полностью автоматизирован и состоит из широко используемых измерительных приборов и источников сигналов. Алгоритм работы комплекса определяется на программном уровне, что позволяет в короткие сроки перепрограммировать его для решения новых задач. С применением автоматизированного комплекса налажен непрерывный процесс измерения характеристик ТМП с целью отработки технологии их получения. Использование комплекса позволило отобрать наиболее подходящие образцы ТМП для повышения чувствительности датчиков.

3. Разработана новая конструкция СВЧ-головки локального спектрометра ФМР, содержащая чувствительный элемент, выполненный на основе печатной платы, СВЧ-генератор с амплитудным детектором и немагнитный корпус с разъемом. Чувствительность новой конструкции увеличена более чем на порядок, что позволяет использовать ее для измерения образцов ТМП толщиной менее 100 Å без накопления сигнала. Существенное увеличение чувствительности дает возможность увеличения локальности измерений. Конструкция СВЧ-головки является простой в серийном изготовлении и настройке. Разработано более 100 СВЧ-головок, работающих на различных частотах – от 0,1 МГц до 6 ГГц, в том числе на диапазон частот возбуждения чувствительного элемента датчика на ТМП. Это дало возможность отработать технологию производства ТМП и, как следствие, поднять чувствительность разработанных датчиков.

Список публикаций по теме работы

Статьи в журналах из перечня ВАК, индексируемые базами WoS, Scopus:

А1. Бабицкий, А. Н. Магнитометр слабых квазистационарных и высокочастотных полей на резонансных микрополосковых преобразователях с тонкими магнитными пленками / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, Г. В. Скоморохов, А. В. Изотов, Р. Г. Галеев // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №3. – С. 96–104.

А2. Беляев, Б. А. Исследование датчика слабых магнитных полей на резонансной микрополосковой структуре с тонкой ферромагнитной пленкой / Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, А. В. Изотов, П. Н. Соловьев, В. В. Тюрнев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №8. – С. 3–10.

А3. Babitskii, A. N. Low Noise Wideband Thin-Film Magnetometer / Alexander N. Babitskii, Boris A. Belyaev, **Nikita M. Boev**, Andrey V. Izotov // IEEE Sensors-2017. – 2017. – P. 316–318.

А4. Беляев, Б. А. Исследование особенностей спектра СВЧ-поглощения нанокристаллических тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, А. В. Изотов, П. Н. Соловьев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №10. – С. 50–56.

А5. Izotov, A. V. Numerical calculation of high frequency magnetic susceptibility in thin nanocrystalline magnetic films / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, P. N. Solovev, **N. M. Boev** // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2018. – Vol. 556. – P. 42–47.

А6. Изотов, А. В. Особенности двухмагнетонных процессов релаксации в нанокристаллических тонких магнитных пленках / А. В. Изотов, Б. А. Беляев, П. Н. Соловьев, **Н. М. Боев** // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2018. – Т. 61, №12. – С. 153–159.

А7. Бабицкий, А. Н. Передатчики ближнепольных магнитных систем связи / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, Р. Г. Галеев // Успехи современной радиоэлектроники, – 2017. – №19. – С. 111–115.

Патенты РФ:

А8. Малогабаритный тонкопленочный градиентометр: пат. 183446 Российская Федерация: МПК⁷ G01R 33/05, G01R 33/022 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**, Изотов А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017137672; заявл. 27.10.2017; опубл. 24.09.2018, Бюл. №27.

А9. Малогабаритный высокочастотный магнитометр: пат. 163174 Российская Федерация: МПК⁷ G01R 33/05 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**, Изотов А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2015144929/28; заявл. 19.10.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.

А10. Антенна системы ближнепольной магнитной связи: пат. 175975 Российская Федерация: МПК⁷ H01Q 7/00, H04B 5/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**, Изотов А. В., Сушков А. А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017129194; заявл. 15.08.2017; опубл. 25.12.2017, Бюл. №36.

А11. Передающая антенна с обратной связью для системы ближнепольной магнитной передачи информации: пат. 182537 Российская Федерация: МПК⁷ H01Q 7/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**, Изотов А. В., Клешина С. А.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – № 2018118261; заявл. 17.05.2018; опубл. 22.08.2018, Бюл. №24.

А12. Передающая антенна для системы ближнепольной магнитной связи: пат. 182538 Российская Федерация: МПК⁷ H01Q 7/00 / Бабицкий А. Н., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**, Изотов А. В., Бурмитских А. В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018118262; заявл. 17.05.2018; опубл. 22.08.2018, Бюл. № 24.

Программы ЭВМ:

A13. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с датчика слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок: прог. для ЭВМ 2018615170 Российская Федерация / **Боев. Н. М.**, Беляев Б. А., Батулин Т. Н.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018612241; заявл. 12.03.2018; опубл. 27.04.2018, Бюл. №5.

A14. Программа расчета параметров антенн ближнепольных магнитных систем связи с непосредственной связью усилителя мощности с антенной и со связью через трансформатор: прог. для ЭВМ 2017663501 Российская Федерация / **Боев Н. М.**, Беляев Б. А., Сушков А. А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660339; заявл. 16.10.2017; опубл. 06.12.2017.

A15. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с комбинированного электроизмерительного прибора для автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2017663470 Российская Федерация / **Боев Н. М.**, Беляев Б. А., Батулин Т. Н.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660349; заявл. 16.10.2017; опубл. 05.12.2017.

A16. Программа приема, обработки, визуализации и сохранения данных с векторного анализатора цепей для автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2017663874 Российская Федерация / **Боев Н. М.**, Беляев Б. А., Клешина С. А.; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2017660350; заявл. 16.10.2017; опубл. 13.12.2017.

A17. Программа визуализации данных, получаемых от трехосевого датчика магнитного поля: прог. для ЭВМ 2018615769 Российская Федерация / Бурмитских А. В., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – №2018612956; заявл. 28.03.2018; опубл. 16.05.2018, Бюл. №5.

A18. Программа управления программируемым источником питания постоянного тока, входящего в состав автоматизированного измерительного стенда: прог. для ЭВМ 2018615168 Российская Федерация / Бурмитских А. В., Беляев Б. А., **Боев Н. М.**; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – №2018612239; заявл. 12.03.2018; опубл. 27.04.2018, Бюл. №5.

Другие публикации:

A19. Беляев, Б. А. Малогабаритный датчик слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, А. Н. Бабицкий, **Н. М. Боев**, Р. Г. Галеев // Известия высших учебных заведений: Физика. – 2016. – Т. 58, №8/2. – С. 75–77.

A20. Бабицкий, А. Н. Датчики слабых магнитных полей на основе тонких магнитных пленок / А. Н. Бабицкий, Т. Н. Батулин, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, Р. Г. Галеев, А. В. Изотов, А. А. Сушков // Сборник трудов конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2017. – С. 411–421.

A21. Babitskii, A. N. Thin magnetic film magnetometer / A. N. Babitskii, B. A. Belyaev, **N. M. Bоеv**, A. V. Izotov, S. A. Kleshnina // 12-th European Magnetic Sensors and Actuators Conference – EMSA 2018, Abstract book. – 2018. – P. 93.

A22. Babitskii, A. N. Wideband thin-film gradiometer / A. N. Babitskii, B. A. Belyaev, **N. M. Bоеv**, A. V. Izotov, An. A. Leksikov, A. V. Burmitskikh // 12-th European Magnetic Sensors and Actuators Conference – EMSA 2018, Abstract book. – 2018. – P. 94.

A23. Изотов, А. В. Способ измерения структурной константы тонких магнитных пленок из спектра СВЧ-поглощения / А. В. Изотов, Б. А. Беляев, П. Н. Соловьев, **Н. М. Боев** // Сборник трудов XXIII международной конференции НМММ, Москва. – 2018. – С. 332–334.

A24. Izotov, A. V. Micromagnetic modeling and correlation analysis of magnetic microstructure in nanocrystalline thin films / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, P. N. Solovev, **N. M. Bоеv** // 9-th Joint European Magnetic Symposia, Mainz, Germany. – 2018. – P. 239.

A25. Бабицкий, А. Н. Цифровые системы ближнепольной магнитной связи / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, Р. Г. Галеев // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь». – 2016. – С. 403–406.

A26. Бабицкий, А. Н. Ближнепольные системы передачи цифровой информации / А. Н. Бабицкий, Т. Н. Батулин, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, Р. Г. Галеев, А. В. Изотов, А. А. Сушков // Сборник трудов конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2017. – С. 476–488.

A27. Бабицкий, А. Н. Системы ближнепольной магнитной передачи информации / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, **Н. М. Боев**, А. А. Сушков, С. А. Клешнина, Е. В. Королев, Р. Г. Галеев // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь». – 2017. – С. 270–273.

A28. Беляев, Б. А. Проектирование малогабаритного нелинейного усилителя мощности портативного приемопередатчика системы ближнепольной магнитной связи / Б. А. Беляев, А. Н. Бабицкий, **Н. М. Боев**, А. А. Сушков // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, – 2017. – С. 46–49.

Список цитируемой литературы

1. Grosz, A. High sensitivity magnetometers / Asaf Grosz, Michael J, Haji-Sheikh, Subhas C. Mukhopadhyay. Smart sensors, measurement and instrumentation series. – Springer, 2017. – 576 p.

2. Tumanski, S. Handbook of magnetic measurements / S. Tumanski. – CRC Press, 2011. – 398 p.

3. Ripka, P. Magnetic sensors and magnetometers / P. Ripka. – Artech House, 2001. – 511 p.

4. Webster, J. G. Measurement, instrumentation, and sensors handbook / John G. Webster and others. – CRC Press, 1999. – 2618 p.

5. Афанасьев, Ю. В. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.

6. Каменецкий, Ф. М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов / Ф. М. Каменецкий. – М.: ГЕОС, 1997. – 159 с.

7. Sharma, A. K. Magnetic Induction-Based Non-Conventional Media Communications: A Review / A. K. Sharma, S. Yadav, S. N. Dandu, V. Kumar, J. Sengupta, S. B. Dhok, S. Kumar // IEEE Sensors Journal. – 2017. – Vol. 17. – P. 926–940.

8. Lenz, J. E. Magnetic sensors and their applications / J. E. Lenz, A. S. Edelstein // IEEE Sensors J. – 2006. – Vol. 6. – P. 631–649.

9. Беляев, Б. А. Сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса для диагностики характеристик тонких магнитных пленок / Б. А. Беляев, А. В. Изотов, А. А. Лексиков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т. 67, №9. – С. 24–33.

10. Беляев, Б. А. Исследование магнитных материалов и тонкопленочных структур методом ферромагнитного резонанса: учеб. пособие. / Б. А. Беляев, А. В. Изотов, С. А. Ходенков, С. М. Жарков. – Красноярск: СибГАУ, 2012. – 136 с.

11. Тюрнев, В. В. Расчет связанных микрополосковых линий на слоистой подложке, содержащей металлическую ферромагнитную пленку / В. В. Тюрнев // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, №7. – С. 858–866.

12. Тюрнев, В. В. Теория цепей СВЧ / В. В. Тюрнев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – 194 с.

13. Bartington Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bartington.com> (дата обращения: 01.01.2019).