

На правах рукописи



Бурмитских Антон Владимирович

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК**

Специальность 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2022

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,
заведующий лабораторией Электродинамики и
СВЧ электроники, ИФ СО РАН.

Официальные оппоненты: Гаврилюк Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» (ИГУ), г. Иркутск.

Каранский Виталий Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры физической электроники, декан факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Защита состоится «16» декабря 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.1.228.02 в ИФ СО РАН, по адресу: 660036, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайтах по адресам <https://ksc.krasn.ru> и <http://kirensky.ru>.

Автореферат разослан «___» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Втюрин
Александр Николаевич

Актуальность темы исследования

Магнитные материалы широко используются в устройствах современной радиоэлектроники и микроэлектроники. На их основе создаются фильтры и фазовращатели [1], необходимые для функционирования радаров, различных систем передачи информации, в том числе систем сотовой связи поколения 5G. Явления магнетизма играют ключевую роль в работе компьютерных жестких дисков [2], медицинского оборудования [3] и многих других приборов в промышленности [4]. На основе магнитных материалов создаются разнообразные миниатюрные датчики, чувствительные к магнитным полям [5]. Как правило, работа таких устройств основана на функционировании низкоразмерных систем – тонких магнитных пленок (ТМП). Использование низкоразмерных систем связано с тем, что ТМП могут иметь отличные от объемных аналогов свойства [6]. Варьируя толщиной пленки, числом слоев и другими параметрами, можно создавать материалы с уникальными свойствами в сравнении с их объемными аналогами.

В связи с расширением области применения тонкопленочных магнитных материалов возрастает интерес и к исследованиям их магнитных свойств, а также происходящим внутри них процессам [6]. Поэтому актуальной становится задача совершенствования экспериментальных методов исследований. Например, изучение магнитных неоднородностей в тонкопленочных структурах и механизмов образования этих неоднородностей необходимо для отработки технологий изготовления магнитных пленок с улучшенными характеристиками, что, несомненно, приведет к качественному повышению характеристик разрабатываемых конечных устройств на их основе.

Успехи в области изучения явлений магнетизма связаны в первую очередь с прогрессом в области технологий и экспериментальных методов исследований. Одним из основных методов исследований характеристик магнитных материалов является метод ферромагнитного резонанса (ФМР) [7]. Метод ФМР позволяет регистрировать резонансное поглощение электромагнитной энергии магнитным материалом при одновременном воздействии внешних магнитных полей: постоянного и переменного. Исследованиям магнитных материалов методом ФМР посвящено большое количество работ. Впервые явление ФМР было открыто В. К. Аркадьевым в 1911 г. [8], а наблюдение поглощения электромагнитной энергии магнитным веществом проведено в 1936 г. К. Я. Гортером [9]. К. Я. Гортер использовал генератор Хартли, спроектированный по схеме индуктивной трехточки, для наблюдения сигнала парамагнитного резонанса на частоте 10 МГц. Поглощение регистрировалось калориметрическим методом с использованием газового манометра. Такой способ измерений имел низкую чувствительность, что не позволило определить точно положения пика поглощения при развертке по полю. Явление резонансного поглощения с использованием сверхрегенеративного детектора (автодина) впервые наблюдал Е. К. Завойский [10, 11] в 1945 г. Пик поглощения электромагнитной энергии парамагнитными солями в эксперименте Е. К. Завойского наблюдался на частоте 151 МГц при величине поперечного постоянного магнитного поля 54 Э.

Трудности при проведении измерений автодинным способом были связаны в первую очередь с работой электровакуумных приборов, что накладывало ограничения на чувствительность установок и не позволяло получить высокое отношение сигнал/шум (ОСШ). Дальнейшие исследования магнитных материалов методом ФМР проводились с применением современных приборов детектирования, а сегодня наиболее часто для этих целей используют установки на основе векторного анализатора цепей (ВАЦ).

Возможности исследований магнитных материалов методом ФМР значительно возросли благодаря появлению широкополосной VNA-FMR-спектроскопии (vector network analyzer ferromagnetic resonance spectroscopy), реализуемой с использованием векторного анализатора цепей. Для реализации этого метода в спектрометрах ФМР, как правило, используется волноводный [12], копланарный [13] или микрополосковый резонатор [14] на отрезке симметричной или несимметричной полосковой линии (ПЛ). VNA-FMR-спектроскопия позволяет исследовать свойства магнитных материалов в широком диапазоне частот, от нескольких сотен мегагерц до 40–50 ГГц, обеспечивая высокую чувствительность и точность измерений в сравнении с другими методами [15].

Цель работы – разработка и совершенствование экспериментальных установок и методик измерений магнитных характеристик тонких пленок, в том числе с использованием метода ФМР.

Задачи диссертационного исследования

- Провести анализ существующих методов и способов измерений магнитных характеристик ТМП.
- Разработать и изготовить экспериментальную автоматизированную установку для проведения измерений магнитных характеристик ТМП методом ФМР с использованием сверхрегенеративного детектора.
- Разработать автоматизированную установку, позволяющую получать спектры поглощения энергии высокочастотного (ВЧ) поля возбуждения образцом ТМП при ФМР на основе измерителя импеданса.
- Разработать установку и методику получения петель гистерезиса образцов ТМП индукционным методом с использованием синхронного детектора (СД).
- Разработать и изготовить конструкцию широкополосного спектрометра ФМР с использованием ВАЦ и возможностью проведения измерений на локальных участках образцов ТМП. Обеспечить компенсацию лабораторного магнитного поля.
- Разработать методику определения магнитных характеристик (эффективной намагниченности насыщения, величины и направления поля одноосной магнитной анизотропии) на основании анализа поведения спектров ФМР в зависимости от направления и величины постоянного магнитного поля.

Теоретическая и практическая значимость работы

– Разработана схема высокочувствительного сверхрегенеративного детектора сигналов ФМР тонких магнитных пленок, позволяющая исследовать образцы толщиной от 100 Å. Реализована цифровая обработка сигналов с использованием двух 12-разрядных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) со скоростью преобразования до $3 \cdot 10^6$ выборок/с и потоковой передачей данных с использованием технологии Ethernet, позволяющей получать до 1000 значений измерений в каждой точке при развертке магнитного поля после усреднения и прохождения сигнала через фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр). Разработана схема усиления полезного сигнала с выхода сверхрегенеративного детектора, позволяющая производить масштабирование, компенсацию постоянной составляющей сигнала на опорном входе и регулировку коэффициента усиления аналогового тракта. Достигнута скорость измерений образцов ТМП при развертке магнитного поля от 0 до 20 Э с шагом 0,1 Э и по углу вращения образца ТМП от 0° до 360° с шагом 1° – один образец в сутки.

– Разработаны автоматизированная установка и методика визуализации петель гистерезиса ТМП, регистрируемых индукционным методом с использованием синхронного детектора на частотах от десятков герц до 100 кГц с компенсацией фазового сдвига для большого количества гармоник полезного сигнала. Установка позволяет изменять направление (от 0° до 360°) и величину (от минус 30 до 30 Э) постоянного магнитного поля H_0 , а также количество учитываемых при измерениях гармоник сигнала.

– Создана автоматизированная установка для регистрации спектра мнимой части комплексной магнитной проницаемости ТМП с использованием измерителя импеданса на частотах 1–10 МГц, позволяющая в автоматизированном режиме варьировать направление постоянного магнитного поля в плоскости пленки в диапазоне от 0° до 360°, при его развертке от минус 30 до 30 Э.

– Разработан автоматизированный широкополосный спектрометр ФМР, позволяющий снимать частотные спектры магнитных пленок в диапазоне от 200 МГц до 12 ГГц при фиксированных значениях магнитного поля. Диапазон развертки постоянного магнитного поля спектрометра от минус 1500 до 1500 Э. Предложена и исследована конструкция измерительной ячейки широкополосного спектрометра, собственная резонансная частота которой выше 12 ГГц. Максимальные размеры исследуемого образца 12×12 мм с толщиной подложки до 1 мм. Для измерения спектров локальных участков ТМП широкополосным спектрометром ФМР разработана оригинальная измерительная ячейка с измерительным отверстием диаметром 2 мм.

Научная новизна

– Разработана новая конструкция автоматизированного спектрометра ФМР с использованием сверхрегенеративного детектора, которая отличается возможностью формирования произвольной ориентации постоянного и переменного магнитных полей в плоскости пленки, возможностью автоматической подстройки чувствительности измерительной системы путем изменения амплитуды сигнала в цепи положительной обратной связи генератора, наличием блока цифровой обработки данных.

– Разработан автоматизированный комплекс на основе бесконтактной резонансной измерительной системы для регистрации спектров импеданса ТМП и методика определения по измеренным спектрам мнимой части комплексной магнитной проницаемости тонких пленок.

– Для регистрации петель гистерезиса индукционным методом с применением СД использована схема фазовой подстройки опорного сигнала СД, позволяющая компенсировать фазу полезного сигнала для большого числа измеряемых гармоник. Предложена методика восстановления по сигналу с выхода измерительной системы как продольных, так и поперечных петель гистерезиса образцов ТМП.

– Разработан автоматизированный широкополосный спектрометр ФМР на основе векторного анализатора цепей, позволяющий измерять магнитные параметры локальных участков ТМП. Чувствительным элементом спектрометра является короткозамкнутый отрезок ПЛ с измерительным отверстием в экране вблизи пучности высокочастотного магнитного поля. Разработана методика определения основных магнитных характеристик ТМП по снятым спектрам коэффициента отражения от измерительной ячейки с образцом, позволяющая находить величину и направление полей магнитной анизотропии, эффективную намагниченность насыщения, частоту ФМР, а также параметр затухания Гильберта.

Методология и методы исследований. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические методы основаны на идеализации свойств образцов ТМП с использованием однодоменной феноменологической модели ТМП с одноосной магнитной анизотропией. Экспериментальные методы включали в себя непосредственное проведение измерений магнитных характеристик образцов и сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными с использованием других известных способов и методов измерения. При проектировании и отладке работы экспериментальных установок использованы методы трехмерного и схемотехнического моделирований. В качестве специального метода исследований свойств ТМП был использован метод ФМР. Полученные в работе теоретические результаты согласуются с результатами экспериментальных измерений.

Положения, выносимые на защиту

– Спектрометр, реализованный с использованием схемы сверхрегенеративного детектора, позволяет получать угловые зависимости магнитной проницаемости в плоскости ТМП при развертке по постоянному магнитному полю от минус 50 до 50 Э с возможностью вращения образца ТМП относительно направления постоянного H_0 и высокочастотного h магнитных полей в диапазоне от 0° до 360°.

– Установка для измерений магнитной проницаемости ТМП индукционным методом с использованием синхронного детектора позволяет визуализировать как продольные, так и поперечные петли гистерезиса образцов ТМП в диапазоне частот от десятков герц до 100 кГц.

– Автоматизированная широкополосная измерительная установка с использованием векторного анализатора цепей позволяет проводить измерения

спектров ФМР в диапазоне частот от 200 МГц до 12 ГГц при фиксированных в интервале от минус 1500 до 1500 Э магнитных полях на пленочных магнитных образцах и локальных участках ТМП.

– Разработанная методика позволяет определять магнитные характеристики образцов ТМП на основе частотных зависимостей коэффициента отражения S_{11} от измерительной ячейки.

Публикации по теме работы. Всего по теме диссертационного исследования опубликовано 16 работ, из них опубликовано в журналах из перечня ВАК, индексируются базами WoS, Scopus – 9 статей. Результаты работы опубликованы в журналах *Physica B: Condensed Matter*, *Journal of Alloys and Compounds*, «Успехи современной радиоэлектроники» и др. Опубликовано в иных журналах и сборниках – 7 работ. Получено патентов на изобретения РФ – 9 шт., зарегистрировано программ ЭВМ – 5 шт.

Личный вклад. Представленные в работе экспериментальные способы измерений магнитных характеристик ТМП разработаны лично автором или при его непосредственном участии. Автором предложены новая конструкция и принципиальная схема спектрометра на основе сверхрегенеративного детектора; разработано специализированное программное обеспечение для управления работой измерительных установок и обработки данных; реализована новая конструкция автоматизированного спектрометра на основе измерителя импеданса и СД; написаны программы постобработки полученных экспериментально результатов. Автор принимал непосредственное участие в разработках новых конструкций и программного обеспечения широкополосного спектрометра, а также методик определения магнитных характеристик ТМП на основе частотных зависимостей коэффициента отражения, полученных с использованием векторного анализатора цепей.

Степень достоверности и аprobация работы. Степень достоверности подтверждается использованием сертифицированного и поверенного оборудования, согласованностью полученных результатов с результатами исследователей, использующих отличающиеся установки и способы измерений.

Результаты работы представлялись на следующих конференциях: международная конференция «Решетневские чтения», Россия, г. Красноярск, 2018 г.; международная конференция «Актуальные проблемы радиофизики», Россия, г. Томск, 2019 г.; международная конференция «IEEE – Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON – 2019», Россия, г. Томск, 2019 г.; VI Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», г. Красноярск, 2019 г.; «Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology», г. Екатеринбург, 2020 г.; «Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology», г. Екатеринбург, 2021 г.; «IEEE Siberian Conference on Control and Communications 2021 «SIBCON 2021», г. Казань, 2021 г.; конкурс-конференция ФИЦ КНЦ СО РАН для молодых ученых, аспирантов и студентов, секция «Физика», г. Красноярск, 2022 г.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем диссертации – 114 страниц, включая 58 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 124 источника.

Первая глава диссертационной работы содержит основные теоретические сведения о процессах, происходящих в ТМП под влиянием внешних магнитных полей, постоянного и переменного, а также описания экспериментальных способов исследований ТМП. Задачей главы является краткое описание основных методов и принципов измерений магнитных характеристик образцов ТМП широко применяемых в экспериментах: оптические методы (магнитооптический эффект Керра, бриллюзновская спектроскопия); индукционные (вибрационный магнитометр, перемагничивание с использованием СД); магнитно-силовая микроскопия и др. Отдельно выделены способы, основанные на использовании метода ФМР с измерительными ячейками в виде отрезка несимметричной ПЛ и сверхрегенеративного способа регистрации спектров. Представлены некоторые серийно выпускаемые установки для исследований свойств ТМП и приведены их технические характеристики.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке установок для измерений магнитных характеристик ТМП в ВЧ-диапазоне с использованием измерителя импеданса, сверхрегенеративного и синхронного детекторов.

Для апробации методов измерений и разработанного экспериментально-го оборудования использовался контрольный образец однослоевой ТМП толщиной 2000 Å, состава Ni₈₀Fe₂₀. Образец получен методом магнетронного распыления на постоянном токе в присутствии однородного магнитного поля величиной около 200 Э, приложенного в плоскости пленки в процессе напыления. При этом давление аргона составляло 2 мбар, а температура ситалловой подложки толщиной 0,5 мм поддерживалась на уровне 200 °C. Для улучшения качества осаждаемой пленки на оптически полированную подложку предварительно напылялась моноокись кремния толщиной 100 нм, уменьшающая остаточную после полировки шероховатость подложки [16].

Измерения магнитных характеристик образцов проведены с использованием известных приборов и методов: на сканирующем спектрометре ферромагнитного резонанса [17] и цифровом индукционном феррометре (рисунок 1) ФТМП-03 (петлескоп), разработанными в ИФ СО РАН.

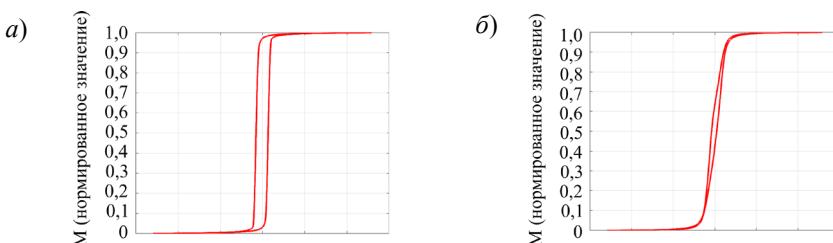


Рисунок 1 – Продольные петли гистерезиса, полученные с использованием ФТМП-03 (а – магнитное поле направлено вдоль оси легкого намагничивания; б – вдоль оси трудного намагничивания)

При измерениях на сканирующем спектрометре ФМР использовалась измерительная головка [18], работающая на частоте 1009,46 МГц. Результаты измерения контрольного образца ТМП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений параметров контрольного образца ТМП

Измерительная установка	Намагниченность насыщения, Гс	Поле одноосной анизотропии, Э	Параметр затухания Гильберта	Коэрцитивная сила, Э
Сканирующий спектрометр ФМР	1152,76	2,80	0,01436	–
Феррометр ФТМП-03	–	2,81	–	1,51

Регистрация магнитных спектров импеданса ТМП проводилось с использованием измерителя Keysight E4990A. На рисунке 2 a показана блок-схема разработанной автоматизированной установки, позволяющей проводить измерения при различных величинах и направлениях постоянного магнитного поля H_0 .

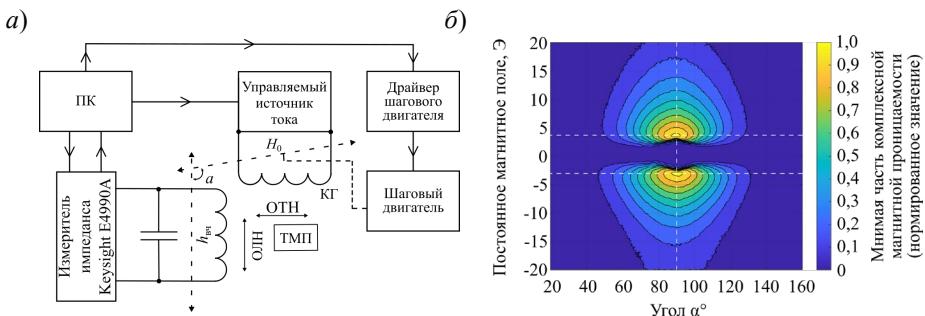


Рисунок 2 – Блок-схема (а) автоматизированной установки для регистрации спектров импеданса и результаты измерений мнимой части комплексной магнитной проницаемости (б) контрольного образца

Управление работой установки осуществляется с использованием разработанного программного обеспечения (ПО) на персональном компьютере (ПК). Измерительная ячейка установки представляет собой параллельный колебательный контур, в центре катушки индуктивности которого размещается исследуемый образец ТМП. Для исследований образцов ТМП в диапазоне частот от 1 до 10 МГц был изготовлен набор различных измерительных ячеек. На рисунке 2 b показано распределение мнимой части комплексной магнитной проницаемости, полученное для контрольного образца ТМП на резонансной частоте измерительной ячейки, равной 2,6 МГц.

Для исследований магнитных характеристик ТМП методом ФМР в диапазоне частот от 1 до 10 МГц был разработан спектрометр на основе сверхрегенеративного детектора. Блок-схема спектрометра показана на рисунке 3а.

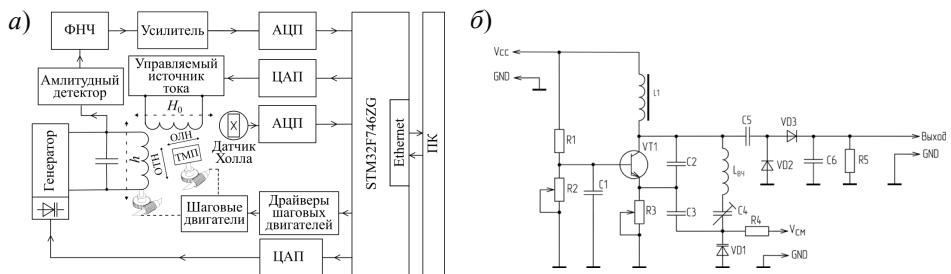


Рисунок 3 – Блок-схема спектрометра (а)
и электрическая принципиальная схема (б) сверхрегенеративного детектора

Измерительная система спектрометра (рисунок 4) построена с использованием сверхрегенератора, реализованного на основе схемы генератора Клаппа (рисунок 3б). Основным отличием разработанной схемы является использование в качестве сосредоточенной индуктивности колец Гельмгольца (КГ), создающих в центре, где располагается исследуемый образец, однородное магнитное ВЧ-поле (рисунок 5).

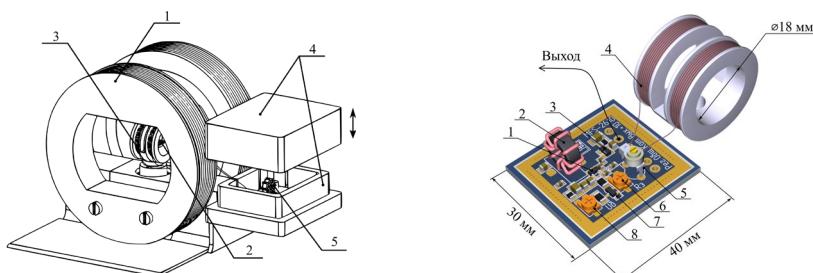


Рисунок 4 – Измерительная система сверхрегенеративного спектрометра
(1 – КГ, создающие поле H_0 ;
2 – измерительный столик;
3 – измерительные КГ,
создающие магнитное ВЧ-поле;
4 – термостатирующий экран;
5 – печатный узел)

Рисунок 5 – ВЧ-сверхрегенератор
и амплитудный детектор измерительной
системы (1 – транзистор регенератора;
2 – блокировочный дроссель;
3 – амплитудный детектор;
4 – измерительные КГ, создающие
магнитное ВЧ-поле;
5 – подстроечная емкость;
6 – подстроечный резистор в эмиттер-
ной цепи; 7 – вариакап;
8 – подстроечный резистор в цепи
смещения базы транзистора)

Перед началом измерений система производит автоматическое вращение образца в постоянном магнитном поле и определяет углы, при которых наблюдаются «провалы» в спектре, обусловленные возбуждением ФМР в исследуемом образце. Если в процессе определения направления осей намагничивания ТМП происходит срыв генерации, система автоматически перезапускает генератор и увеличивает напряжение положительной обратной связи (ПОС). В процессе измерений полезный сигнал с выхода амплитудного детектора через фильтр низких частот (ФНЧ) поступает на вход операционного усилителя и через буферный каскад – на вход АЦП. Оцифрованные данные по протоколу UDP передаются в ПК, где происходит цифровая фильтрация данных фильтром с конечной импульсной характеристикой. Ток в КГ, создающих постоянное магнитное поле H_0 , изменяется посредством команд от МК, поступающих с выхода МК на источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). Величина постоянного магнитного поля контролируется установленным вблизи образца датчиком Холла с аналоговым выходом, сигнал с которого поступает на один из каналов АЦП МК.

Вращение образца осуществляется по командам от ПК, поступающим с выводов общего назначения (GPIO) МК, подключенных к входу драйвера шагового двигателя (ШД), работающего в линейном режиме. Систему вращающихся элементов спектрометра (рисунок 6) условно можно разделить на две части. Первая обеспечивает вращение столика с образцом, а вторая – вращение внутренних колец Гельмгольца, создающих магнитное ВЧ-поле. При этом в полушаговом режиме работы ШД с шагом $0,9^\circ$ обеспечивается дискретность вращений столика и КГ $0,0125^\circ$.

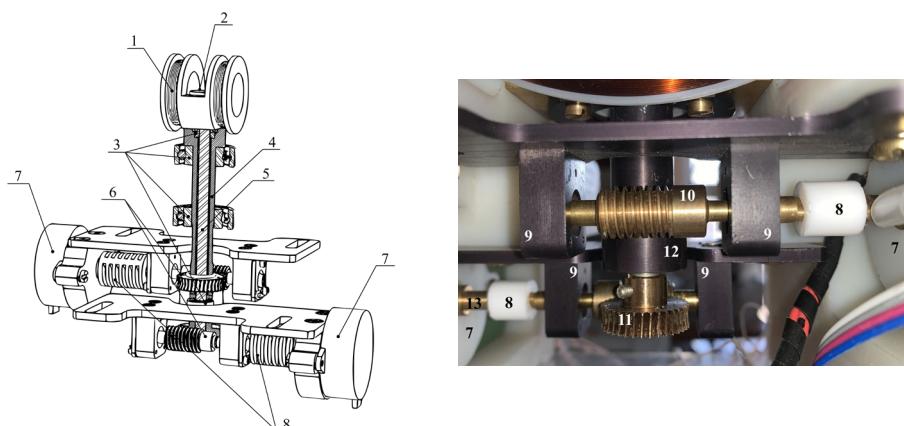


Рисунок 6 – Система вращения столика и измерительных катушек сверхрегенеративного спектрометра (1 – КГ, создающие поле h ; 2 – вращающийся столик; 3 – керамические подшипники; 4 – внешний вал, вращающий КГ (1);

5 – внутренний керамический вал, вращающий столик (2);

6 – червячные передачи; 7 – ШД; 8 – компенсационные муфты;

9 – стойки с подшипниками; 10 и 11 – червяк и шестерня червячной передачи;

12 – втулка подшипника внутреннего вала червячной передачи; 13 – вал ШД)

На рисунке 7 показаны спектры поглощения, обусловленные ФМР, полученные с использованием сверхрегенеративного детектора на частоте 4 МГц. Развертка поля H_0 производилась от минус 10 до 10 Э (и в обратном направлении – от 10 до минус 10 Э) с шагом по полю, равным 0,1 Э.

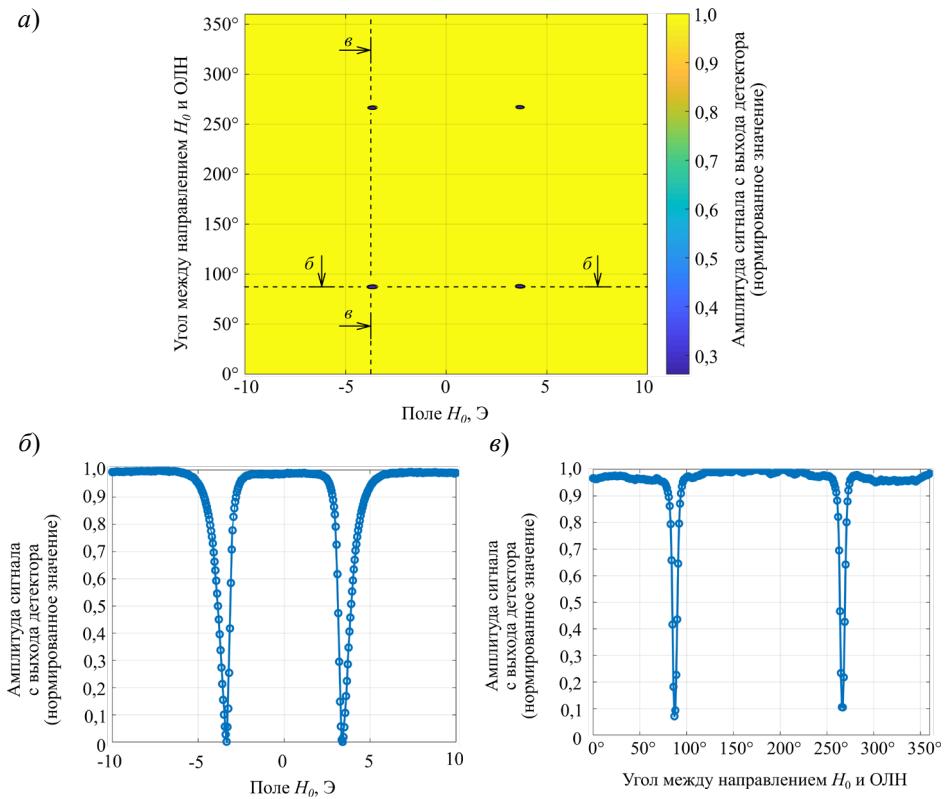


Рисунок 7 – Спектры поглощения ВЧ-энергии контрольным образцом при ФМР
 (а – развертка по углу и по полю; б – срез для $\alpha = 90^\circ$ между h и H_0 ,
 положение среза (б–б) показано стрелками на рисунке а; в – срез для
 поля $H_0 = -2,8$ Э, положение среза (в–в) показано стрелками на рисунке а)

Максимумы поглощения наблюдаются вблизи поля H_k , соответствующего полю одноосной магнитной анизотропии в образце. Направление поля H_0 изменялось в диапазоне от 0° до 360° . При этом наблюдается четыре резонансных пика поглощения при ортогональном направлении поля h к H_0 , когда поле H_0 направлено вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) образца.

Для визуализации петель гистерезиса ТМП с использованием синхронного детектора была разработана индукционная измерительная система, блок-схема которой показана на рисунке 8а.

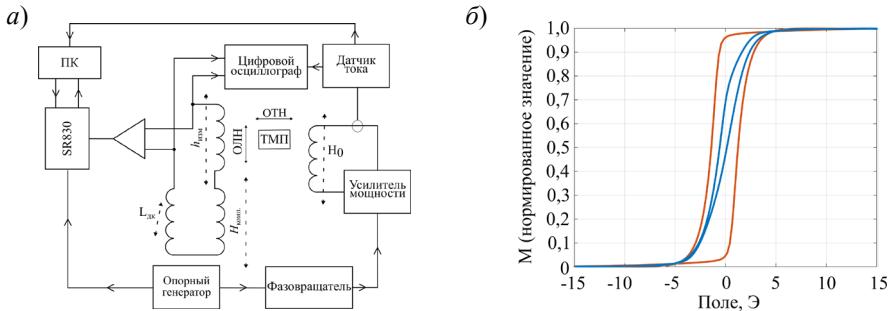


Рисунок 8 – Блок-схема (а) индукционной измерительной системы и полученные продольные петли гистерезиса (б) контрольного образца ТМП (красная линия – ВЧ- и перемагничивающее поля направлены вдоль ОДН; синяя линия – магнитные поля направлены вдоль ОТН)

Установка позволяет изменять направление (от 0° до 360°) и величину (от минус 30 до 30 Т) постоянного магнитного поля H_0 , а также количество измеряемых гармоник сигнала.

Измерительная ячейка установки состоит из трех катушек, две из которых намотаны на одном каркасе и включены во встречном направлении. Измерительная ячейка находится в центре КГ, позволяющих изменять направление и величину поля H_0 в плоскости пленки. В силу того, что измерительная и компенсационная катушки имеют некоторые отличия, а также того, что формируемое КГ перемагничивающее поле H_0 имеет некоторую неоднородность, полная компенсация сигналов невозможна. По этой причине последовательно с компенсационной катушкой включена дополнительная компенсационная катушка ($L_{\text{дк}}$), изменением положения которой можно добиться максимальной компенсации сигнала помехи. Внесение образца ТМП в измерительную катушку создает сигнал, пропорциональный магнитному моменту (произведению намагниченности на объем образца). Сигнал с измерительной катушкой поступает на вход схемы усиления, а затем на вход СД.

Для проведения измерений с использованием СД требуется дополнительная корректировка фазы опорного сигнала. Это вызвано тем, что СД позволяет корректно компенсировать разницу фаз между измеряемым и опорным сигналом только для первой гармоники сигнала. Установив разницу между фазой опорного и измеряемого сигнала в ноль, СД разделяет действительную и мнимую части полезного сигнала (сигналы в каналах X и Y соответственно) таким образом, что мнимая часть комплексной магнитной проницаемости пропорциональна напряжению в канале X (синфазная компонента), а действительная часть – напряжению в канале Y (квадратурная компонента). На рисунке 8б показаны продольные петли гистерезиса, полученные для контрольного образца вдоль ОДН и вдоль ОТН соответственно.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке установки для измерений магнитных характеристик ТМП в СВЧ-диапазоне с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ), блок-схема которой показана на рисунке 9а.

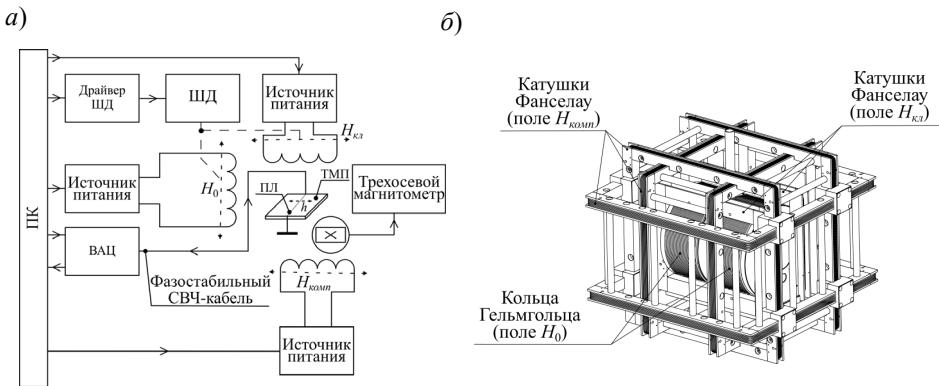


Рисунок 9 – Блок-схема (а) и магнитная система (б)
широкополосного спектрометра на основе ВАЦ

Диапазон частот разработанной установки позволяет проводить измерения в пределах от 200 МГц до 12 ГГц. Измерения проводятся в режиме развертки по частоте для фиксированных значений постоянного магнитного поля в плоскости ТМП в интервале от минус 1,5 до 1,5 кЭ. Работа спектрометра осуществляется под управлением специализированного ПО, установленного на ПК. ПО управляет током в КГ (рисунок 9б) посредством управляемых источников питания:

- изменяющих величину приложенного в плоскости ТМП внешнего магнитного поля H_0 ;
- создающих поле $H_{k\mu}$, ориентирующее магнитный момент строго параллельно полю h для калибровки (нормализации) ВАЦ;
- создающих компенсационное магнитное поле $H_{k\mu\mu}$, компенсирующее лабораторное (в т. ч. магнитное поле Земли) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

На рисунке 10а показана конструкция широкополосного спектрометра ферромагнитного резонанса, позволяющего регистрировать спектры ФМР на локальных участках пленочных образцов. На алюминиевой стойке с верхней стороны размещается векторный анализатор цепей, СВЧ-порт которого посредством фазостабильного СВЧ-кабеля подключен к СВЧ-разъему измерительной ячейки. Для проведения интегральных измерений образцов ТМП создана универсальная измерительная ячейка (рисунок 10б), состоящая из корпуса, выполняющего роль электромагнитного экрана, СВЧ-разъема, несимметричной ПЛ, под которой располагается исследуемый образец ТМП.

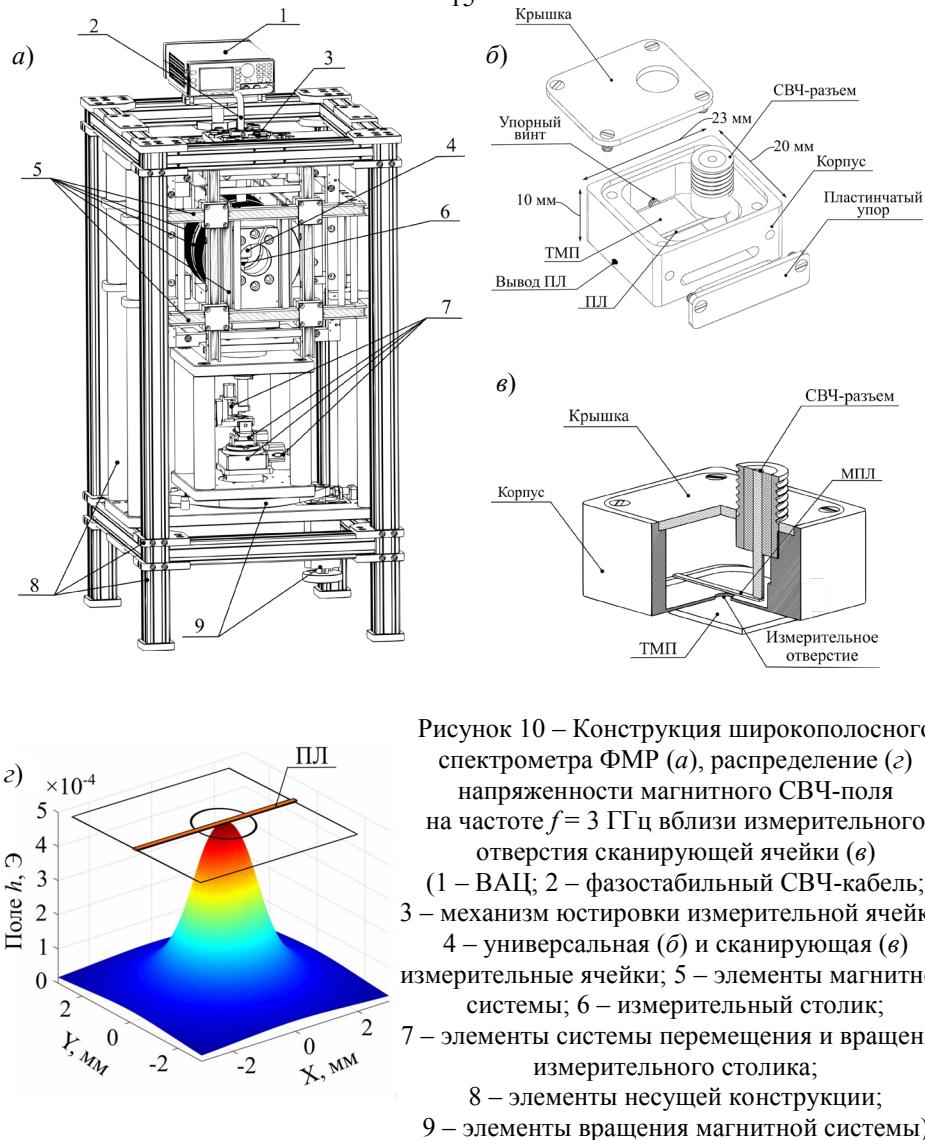


Рисунок 10 – Конструкция широкополосного спектрометра ФМР (а), распределение (б) напряженности магнитного СВЧ-поля на частоте $f = 3$ ГГц вблизи измерительного отверстия сканирующей ячейки (в)
 (1 – ВАЦ; 2 – фазостабильный СВЧ-кабель;
 3 – механизм юстировки измерительной ячейки;
 4 – универсальная (б) и сканирующая (в)
 измерительные ячейки; 5 – элементы магнитной
 системы; 6 – измерительный столик;
 7 – элементы системы перемещения и вращения
 измерительного столика;
 8 – элементы несущей конструкции;
 9 – элементы вращения магнитной системы)

Для исследований высокочастотных свойств на локальных участках образцов ТМП путем регистрации спектров ФМР в широкой полосе частот была разработана дополнительная сменная измерительная ячейка, имеющая измерительное отверстие. Конструкция этой измерительной ячейки отличается от приведенной на рисунке 10б тем, что в электромагнитном экране, являющемя корпусом, под отрезком несимметричной ПЛ сделано отверстие (рисунок 10в) вблизи пучности высокочастотного магнитного поля. Исследуемый образец

ТМП располагается с внешней стороны электромагнитного экрана таким образом, чтобы исследуемый участок пленки находился напротив отверстия в экране.

Сканирование локальных участков исследуемого образца ТМП осуществляется с использованием четырехкоординатной (RXYZ) системы перемещения широкополосного спектрометра. Моделирование работы сканирующей измерительной ячейки на частоте $f = 3$ ГГц проводилось в программе CST Studio Suite. Полученное распределение напряженности магнитного СВЧ-поля показано на рисунке 10г. Вращение КГ, создающих поле H_0 , а также калибровочных колец (рисунок 9б) осуществляется с использованием элементов системы вращения (шагового двигателя и ременной передачи).

С использованием разработанного широкополосного спектрометра ФМР проведены измерения магнитных характеристик контрольного образца ТМП (рисунок 11). Измерения проводились при развертке поля H_0 от минус 1,0 до 1,5 кЭ, в диапазоне частот от 200 МГц до 10 ГГц с шагом 50 МГц. Полученные зависимости распределения спектров поглощения СВЧ-энергии контрольным образцом показаны на рисунке 11а, а на рисунках 11б и 11в – зависимости μ' и μ'' от поля (на частоте 2 ГГц) и от частоты (для значения поля $H_0 = 50$ Э).

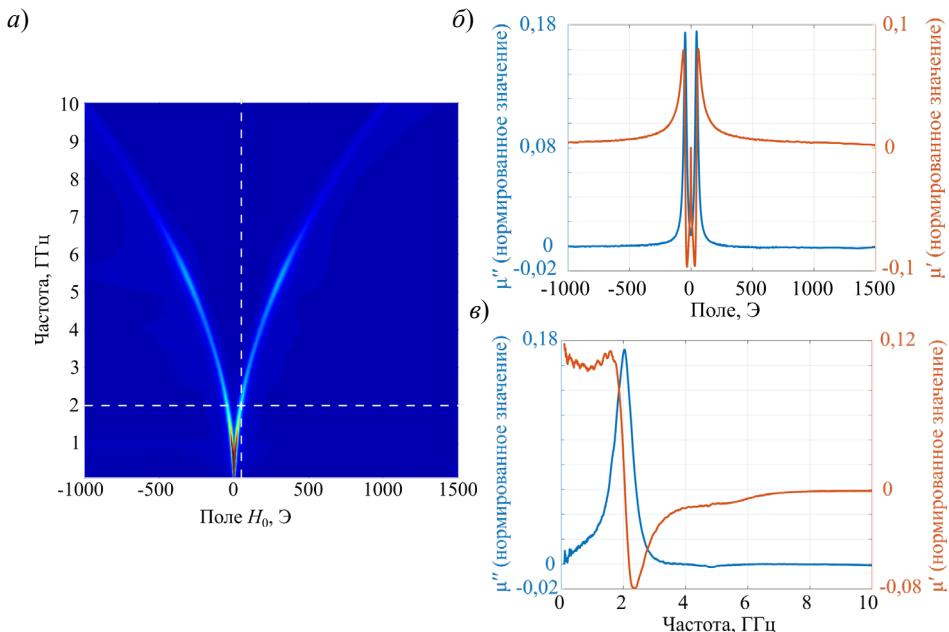


Рисунок 11 – Распределения спектров поглощения СВЧ-энергии контрольным образцом ТМП (а) и результаты измерений μ' и μ'' контрольного образца ТМП при развертке по полю (а) для фиксированной частоты $f = 2$ ГГц и при развертке по частоте (б) для фиксированного значения поля $H_0 = 50$ Э

Последовательность действий при определении магнитных характеристик ТМП на основе спектров комплексного коэффициента отражения S_{11} , полученных с использованием созданного широкополосного спектрометра ФМР, приведена на рисунке 12.

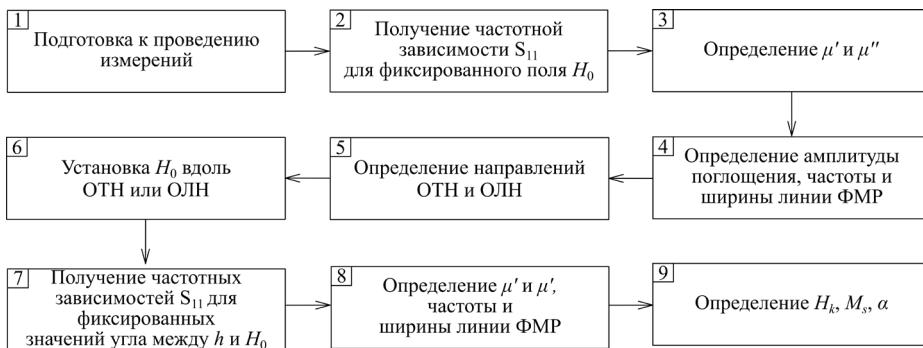


Рисунок 12 – Последовательность действий при реализации методики определения магнитных характеристик ТМП на основе данных S_{11}

В таблице 2 приведены результаты измерений магнитных характеристик контрольного образца ТМП, полученные с использованием разработанных установок, описанных в главах 2 и 3 диссертационной работы, а также данные, полученные с использованием сканирующего спектрометра ФМР и цифрового феррометра ФТМП-03 (петлескоп).

Таблица 2 – Результаты измерений параметров контрольного образца ТМП

Измерительная установка	Диапазон развертки по полю H_0 , Э	M_s , Гс	H_k , Э	α	H_c , Э	Частота измерения
С использованием ВАЦ	от минус 1500 до 1500 (значения для $H_0 = 100$)	929,02	2,27	0,01439	–	2 ГГц
Измеритель импеданса	от минус 20 до 20	–	2,87	–	–	2,6 МГц
Сверххегеронативный спектрометр	от минус 50 до 50	–	2,84	–	–	4 МГц
Синхронный детектор	от минус 20 до 20	–	2,83	–	1,54	800 Гц
Сканирующий спектрометр ФМР	от минус 500 до 500	1152,76	2,80	0,01436	–	1009,46 МГц
Феррометр ФТМП-03	от минус 500 до 500	–	2,81	–	1,51	100 Гц

Заключение

1. Анализ существующих экспериментальных методов исследований магнитных характеристик ТМП в широком диапазоне частот показал, что наиболее информативным является метод ФМР с использованием ВАЦ. Для определения статических магнитных характеристик ТМП рационально использовать простые измерительные индукционные установки на основе СД, измерителя импеданса или сверхрегенеративного детектора.

2. Разработан автоматизированный спектрометр ФМР на основе сверхрегенеративного детектора, позволяющий получать спектры ФМР при развертке по углу и постоянному магнитному полю H_0 на частотах в диапазоне 1–10 МГц, а также определять величину и направление поля одноосной анизотропии в образцах ТМП. Особенностями работы спектрометра являются возможность подстройки чувствительности измерительной системы путем регулировки уровня сигнала ПОС; формирование произвольного направления внешних магнитных полей h и H_0 в плоскости образца ТМП с помощью двух независимых систем вращения; управление, обработка и передача данных с использованием МК.

3. Разработана автоматизированная установка для измерений магнитных характеристик образцов ТМП с использованием измерителя импеданса Keysight E4990A, позволяющая получать значения мнимой части магнитной проницаемости в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля H_0 , приложенного в плоскости пленки. Установка работает в автоматизированном режиме, данные передаются на ПК и обрабатываются в цифровом виде с использованием разработанного ПО.

4. Сконструирована автоматизированная установка для наблюдения петель гистерезиса с использованием синхронного детектора SRS SR830 (Ametek 7270 или другого типа). Измерения проводятся в автоматизированном режиме при развертке постоянного магнитного поля H_0 от минус 30 до 30 Э. Разработана методика проведения измерений.

5. Разработана и изготовлена конструкция автоматизированного широкополосного спектрометра ФМР, позволяющая проводить измерения в полосе частот от 200 МГц до 12 ГГц. Создана оригинальная конструкция измерительной ячейки для проведения измерений магнитных характеристик на локальных участках образцов ТМП. Для обеспечения возможности калибровки ВАЦ используется калибровочная магнитная система, направляющая магнитный момент вдоль поля h . Компенсация лабораторного магнитного поля обеспечивается магнитной системой, компенсирующей поле в трех взаимно перпендикулярных направлениях. По снятым спектрам комплексного коэффициента отражения $S_{11}(f)$ от измерительной ячейки с образцом разработана методика определения основных магнитных характеристик ТМП с использованием однодоменной модели магнитной пленки с одноосной анизотропией, реализованная в программном пакете MATLAB. Предложенная методика позволяет определять эффективную намагниченность насыщения, величину и направление поля одноосной анизотропии, параметр затухания Гильберта.

На рисунке 13 показаны фотографии разработанных и описанных в главах 2 и 3 диссертационной работы ВЧ- и СВЧ-устройств, предназначенных для измерения магнитных характеристик ТМП.



Рисунок 13 – Фотографии разработанных устройств
 (а, б – спектрометр на основе сверхрегенеративного детектора;
 в – измерительная ячейка установки (д) для автоматизированного измерения
 импеданса в ТМП; г – измерительная ячейка установки (е)
 для наблюдения петель гистерезиса с использованием СД;
 жс – широкополосный спектрометр ФМР, универсальная (и)
 и сканирующая (к) измерительные ячейки)

Список публикаций по теме работы

- A1. Izotov, A. V. Ferromagnetic resonance line broadening and shift effect in nanocrystalline thin magnetic films: Relation with crystalline and magnetic structure / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, N. M. Boev, **A. V. Burmitskikh**, G. V. Skomorokhov, S. M. Zharkov, P. N. Solovev // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 900. (Q1).
- A2. Izotov, A. V. Tailoring the microwave properties of thin Permalloy films using a periodically grooved substrate / A. V. Izotov, B. A. Belyaev, N. M. Boev, **A. V. Burmitskikh**, A. A. Leksikov, G. V. Skomorokhov, P. N. Solovev // Physica B: Condensed Matter. – 2022. – Vol. 629. (Q2).
- A3. **Бурмитских, А. В.** Определение мнимой части комплексной магнитной проницаемости тонких пленок с использованием резонансной и нерезонансной измерительных систем / **А. В. Бурмитских**, С. А. Клешнина, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, А. А. Горчаковский // Международный научно-технический журнал «Успехи современной радиоэлектроники». – 2019. – Т. 12. – С. 28–32. (BAK).
- A4. Клешнина, С. А. Установка для локальных измерений магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок / С. А. Клешнина, Н. М. Боев, **А. В. Бурмитских**, А. А. Горчаковский // Международный научно-технический журнал «Успехи современной радиоэлектроники». – 2019. – Т. 12. – С. 194–199. (BAK).
- A5. **Burmitskikh, A. V.** Automated Measuring System for Studying Ferromagnetic Resonance Spectra in the Radio Frequency Range / **A. V. Burmitskikh**, B. A. Belyaev, N. M. Boev, S. A. Kleshnina // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2021. – P. 267–271. (Scopus).
- A6. **Burmitskikh, A. V.** Measurement of Thin Film Magnetic Characteristics in the Radio Frequency Range / **A. V. Burmitskikh**, N. M. Boev, S. A. Kleshnina // SIBCON 2021 – International Siberian Conference on Control and Communications. – 2021. (Scopus).
- A7. **Burmitskikh, A. V.** Measuring the Imaginary Part of the Complex Magnetic Permeability of Thin Films Using Resonant and Non-resonant Automated Measuring Systems / **A. V. Burmitskikh**, B. A. Belyaev, N. M. Boev, S. A. Kleshnina // 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2020. – P. 265–268. (Scopus).
- A8. Kleshnina, S. A. Unit for Measuring the Magnetic Characteristics of Thin Ferromagnetic Films / S. A. Kleshnina, B. A. Belyaev, N. M. Boev, A. V. Izotov, A. A. Gorchakovskiy, **A. V. Burmitskikh** // 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2020. – P. 326–329. (Scopus).
- A9. **Burmitskikh, A. V.** Unit for Analysis of Thin Magnetic Film Ferroresonance Spectrum / **A. V. Burmitskikh**, N. M. Boev, V. G. Andyuseva // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2019. (Scopus).

Список патентов на изобретения РФ

А10. Широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса: пат. 2747912 Российская Федерация: G01R 33/05 / Б. А. Беляев, **А. В. Бурмитских**, А. В. Изотов, Н. М. Боев; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2020133282; заявл. 09.10.2020; опубл. 17.05.2021, Бюл. № 14.

А11. Устройство для измерения параметров тонких магнитных пленок методом ферромагнитного резонанса на радиочастотах: пат. 2747595 Российская Федерация: МПК G01R 33/05 / Б. А. Беляев, Н. М. Боев, **А. В. Бурмитских**, А. В. Изотов; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2020133596; заявл. 13.10.2020; опубл. 11.05.2021, Бюл. № 14.

А12. Чувствительный элемент тонкопленочного магнитометра: пат. 276436 Российская Федерация: (51) МПК G01R 33/05 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, С. А. Клешнина, **А. В. Бурмитских**; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2019110902; заявл. 11.04.2019; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32.

А13. Широкополосный высокочувствительный датчик переменных магнитных полей: пат. 2761319 Российская Федерация: СПК G01R 33/24 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, А. А. Горчаковский, С. А. Клешнина, **А. В. Бурмитских**, Д. А. Шабанов; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2021111748; заявл. 26.04.2021; опубл. 07.12.2021, Бюл. № 34.

А14. Широкополосный датчик переменного тока на тонкой ферромагнитной пленке: пат. 2762518 Российская Федерация: СПК G01R 15/185 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, С. А. Клешнина, **А. В. Бурмитских**, А. А. Горчаковский, Д. А. Шабанов; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2021115950; заявл. 03.06.2021; опубл. 21.12.2021, Бюл. № 36.

А15. Датчик слабых магнитных полей на тонких магнитных пленках: пат. 2758817 Российская Федерация: МПК G01R 33/24 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, **А. В. Бурмитских**, С. А. Клешнина, А. А. Горчаковский, Д. А. Шабанов; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2021111990; заявл. 27.04.2021; опубл. 02.11.2021, Бюл. № 31.

А16. Магнитометр на тонкой магнитной пленке: пат. 2743321 Российская Федерация: СПК G01R 33/02 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, **А. В. Бурмитских**, А. С. Волошин, А. О. Афонин, А. В. Угрюмов; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2020121274; заявл. 22.06.2020; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 5.

А17. Тонкопленочный магнитометр слабых магнитных полей: пат. 2712926 Российская Федерация: МПК G01R 33/05 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, **А. В. Бурмитских**, С. А. Клешнина; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2019112266; заявл. 22.04.2019; опубл. 03.02.2020, Бюл. № 4.

А18. Датчик слабых магнитных полей: пат. 2682076 Российская Федерация: МПК G01R 33/24 / А. Н. Бабицкий, Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. В. Изотов, **А. В. Бурмитских**; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2018116292; заявл. 28.04.2018; опубл. 14.03.2019, Бюл. № 8.

Список программ для ЭВМ

А19. Программа получения данных спектров ферромагнитного резонанса с использованием измерителя импеданса: прог. для ЭВМ 2021668344 Российская Федерация / **А. В. Бурмитских**, С. Д. Креков; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2021667837; заявл. 11.11.2021; опубл. 15.11.2021.

А20. Программа управления измерительной системой, предназначенный для получения спектров поглощения тонких магнитных пленок: прог. для ЭВМ 2020660060 Российская Федерация / **А. В. Бурмитских**, А. В. Изотов; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО СФУ – № 2020618280; заявл. 27.07.2020; опубл. 26.08.2020.

А21. Программа визуализации результатов работы автоматизированной измерительной установки, предназначенный для измерения магнитных характеристик тонкопленочных образцов методом ферромагнитного резонанса: прог. для ЭВМ 2019613477 Российская Федерация / **А. В. Бурмитских**, Б. А. Беляев, И. В. Подшивалов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2019612187; заявл. 05.03.2019; опубл. 18.03.2019.

А22. Программа управления автоматизированным комплексом, предназначенным для измерения магнитных характеристик металлических тонкопленочных образцов, применяемых в датчиках слабых магнитных полей: прог. для ЭВМ 2019613483 Российская Федерация / **А. В. Бурмитских**, Б. А. Беляев, Д. А. Шабанов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2019612139; заявл. 05.03.2019; опубл. 18.03.2019.

А23. Программа обработки значений частотных характеристик RLC-анализатора импеданса: прог. для ЭВМ 2018615945 Российская Федерация / **А. В. Бурмитских**, Б. А. Беляев, А. Н. Бабицкий; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ СО РАН – № 2018612942; заявл. 28.03.2018; опубл. 18.05.2018.

Другие публикации

А24. **Бурмитских, А. В.** Автоматизированный широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса / **А. В. Бурмитских**, С. А. Клешнина, С. Д. Креков // Материалы XXV конференции-конкурса молодых ученых ФИЦ КНЦ СО РАН. – Красноярск. – 2022. – С. 10.

А25. **Бурмитских, А. В.** Исследование магнитоимпеданса тонких пленок при ферромагнитном резонансе / **А. В. Бурмитских**, С. А. Клешнина, С. Д. Креков // Материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск. – 2022.

А26. Kleshnina, S. A. Measuring Unit for the Observation of Hysteresis Loops in Thin Ferromagnetic Films / S. A. Kleshnina, B. A. Belyaev, N. M. Boev, **A. V. Burmitskikh**, I. V. Podshivalov // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2021. – P. 326–329.

А27. Клешнина, С. А. Установка для локальных измерений магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок / С. А. Клешнина, Н. М. Боев, А. В. Бурмитских, А. А. Горчаковский, // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 125-й годовщине Дня радио. – Красноярск. – 2020. – С. 194–199.

А28. **Бурмитских, А. В.** Измерение мнимой части комплексной магнитной проницаемости тонких магнитных пленок методом ферромагнитного резонанса / А. В. Бурмитских, Б. А. Беляев, С. А. Клешнина // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 125-й годовщине Дня радио. – Красноярск. – 2020. – С. 81–85.

А29. **Бурмитских, А. В.** Автоматизированный комплекс для измерения параметров ферромагнитного резонанса в тонких магнитных пленках / А. В. Бурмитских, Б. А. Беляев, С. А. Клешнина // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики». – Томск. – 2019. – С. 478–481.

А30. **Бурмитских, А. В.** Автоматизированный комплекс для анализа спектров ферромагнитного резонанса в тонких магнитных пленках / А. В. Бурмитских, Б. А. Беляев // Материалы XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск: СибГУ. – 2018. – Т. 2. – С. 245–247.

Список цитируемой литературы

1. Yunpeng, C. Novel Ultra-Wide Band (10 MHz – 26 GHz) Permeability Measurements for Magnetic Films / C. Yunpeng, X. Wang, H. Chen, Y. Gao, N. Sun // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Vol. 54, № 11.
2. Wood, R. Future hard disk drive systems / Roger Wood // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2009. – Vol. 321, № 6. – P. 555–561.
3. Sliker, L. J. Magnetically driven medical devices: A review / L. J Sliker, G. Ciuti, M. Rentschler, A. Menciassi // Expert Review of Medical Devices. – 2015. – Vol. 12, № 6. – P. 1–16.
4. Gutfleisch O. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient / M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, J. P. Liu // Advanced Materials. – 2010. – Vol. 23, № 7. – P. 821–842.
5. Belyaev, B. A. Study of the Weak Field Sensor on the Resonant Microstrip Structure with a Thin Ferromagnetic Film / B. A. Belyaev, N. M. Boev, A. V. Izotov, P. N. Solovev, V. V. Tyurnev // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61. – P. 1367–1375.
6. Stamps, R. L. The 2014 Magnetism Roadmap / R. L. Stamps, S. Breitkreutz, J. Akerman, A. V. Chumak, Y. C. Otani // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47. – P. 1–28.
7. Беляев, Б. А. Диагностика тонкопленочных структур методом ферромагнитного резонанса: учеб. пособие / Б. А. Беляев, А. В. Изотов, С. А. Ходенков, С. М. Жарков. – Красноярск: СибГАУ, 2012. – 136 с.

8. Arkad'yev, V. K. Absorption of electric waves in parallel wires / V. K. Arkad'yev // Journal of Russian Society of Physical Chemistry Society (Physics Series). – 1912. – Vol. 44. – P. 165–200.
9. Gorter, C. J. Paramagnetic Relaxation / C. J. Gorter // Physica. – 1936. – Vol. 3, № 6. – P. 503–514.
10. Zavoisky, E. K. Spin Magnetic Resonance in the Decimetre-Wave Region / E. K. Zavoisky // J. Phys. – 1946. – Vol. 10. – P. 197–198.
11. Zavoisky, E. K. Paramagnetic Resonance Absorption in Salts of the Iron Group / E. K. Zavoisky // Phys. Rev. – 1947. – Vol. 72, № 12. – P. 1233–1240.
12. Kostylev, M. Waveguide-based ferromagnetic resonance measurements of metallic ferromagnetic films in transmission and reflection / M. Kostylev // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113, № 5.
13. Neudecker, I. Comparison of frequency, field, and time domain ferromagnetic resonance methods / G. Woltersdorf, B. Heinrich, T. Okuno, G. Gubbiotti, C. H. Back // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 307, № 1. – P. 148–156.
14. Bekker, V. A new strip line broad-band measurement evaluation for determining the complex permeability of thin ferromagnetic films / V. Bekker, K. Seemann, H. Leiste // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 270, № 3. – P. 327–332.
15. Maksymov, I. Broadband stripline ferromagnetic resonance spectroscopy of ferromagnetic films, multilayers and nanostructures / I. Maksimov, M. Kostylev // Physica E Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2015. – Vol. 69. – P. 254–293.
16. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Лань, 2001. – 368 с.
17. Belyaev, B. A. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance / B. A. Belyaev, A. V. Izotov, A. A. Leksikov // IEEE Sensors Journal. – 2005. – Vol. 5, № 2. – P. 260–267.
18. Беляев, Б. А. Измерительные головки сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса / Б. А. Беляев, Н. М. Боев, А. А. Горчаковский, Р. Г. Галеев // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 2. – С. 107–114.

Отпечатано в типографии Института физики им. Л. В. Киренского

Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН.

Тираж 100 экз. Заказ № 6.

Объем 1,4 усл. печ. л. Формат 60x84/16.

660036, Красноярский край, г. Красноярск,
ул. Академгородок, д. 50, стр. 38.