



«Утверждаю»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики

Российской академии наук,

Заместитель директора по научной работе

Д.ф.-м.н. Мерзликин А. М.

30.11.2022

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Головчанского Игоря Анатольевича «Динамика магнитного момента в гибридных системах сверхпроводник-ферромагнетик», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации.

Диссертация Головчанского И. А. посвящена исследованиям магнитодинамических явлений в системах сверхпроводник-ферромагнетик, которые могут быть перспективны для применений в магноники и гибридных СВЧ устройствах. Актуальность развития принципиально новых классов электроники связана с невозможностью дальнейшего существенного увеличения интеграции элементов полупроводниковой (CMOS) электроники из-за тепла, выделяемого в CMOS-элементах и возникновения квантовых эффектов, нарушающих штатное функционирование таких схем при уменьшении размеров. Сверхпроводниковая электроника, спинтроника и магноника позволяют развить принципиально новые подходы к передаче и обработке информации, позволяющие решить эти проблемы, чем и обусловлен значительный интерес к разработке элементов электроники на основе сверхпроводниковых и гибридных микро- и наноструктур. Магноника является одним из альтернативных направлений развития СВЧ электроники, где реализуется передача и обработка сигналов посредством спиновых волн. Преимущества магنونных устройств, а именно, возможность управлять законом дисперсии спиновых волн и микро-масштабы характерных длин волн, уже привели к разработке целого ряда элементов магنونных логических устройств, таких как магنونные транзисторы, затворы и другие элементы.

Диссертация Головчанского И. А. вносит заметный вклад в изучение магноники. В работе изучается взаимодействие магнитного момента магнетиков со сверхпроводящими подсистемами. Так, в работе продемонстрированы широкие возможности управления дисперсией спиновых волн ферромагнетика, взаимодействующего со сверхпроводником за счет индуктивного и электронного взаимодействия. В диссертации показано также, что обычно слабое фотон-магنونное взаимодействие в гибридных СВЧ устройствах можно значительно усилить за счет взаимодействия между магнитодинамическими осцилляциями и

электромагнитными волнами в сверхпроводящих структурах. При этом, впервые был достигнут режим сверхсильного фотон-магнонного взаимодействия. Установлено, что сверхпроводящие резонансные структуры можно использовать для исследования магнитодинамических свойств слабых ферромагнетиков и ферромагнитных микроструктур.

Целями диссертационной работы были поиск методов исследования ферромагнитного резонанса в ферромагнитных пленках и микроструктурах с улучшенными характеристиками, определение влияния сверхпроводимости на динамику магнитного момента ферромагнетиков и законы дисперсии спиновых волн в различных гибридных структурах, поиск и апробация методов моделирования спин-волновых процессов в гибридных системах, а также анализ проблемы слабого фотон-магнонного взаимодействия в гибридных СВЧ структурах.

Основные результаты работы и их новизна.

1. Впервые исследована динамика магнитного момента ферромагнитных тонких пленок и микроструктур слабого разбавленного ферромагнетика $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$ при криогенных температурах с использованием широкополосного метода. Установлены основные магнитные характеристики сплава и характерные времена изменения вектора магнитного момента. Изучена зависимость этих характеристик от температуры. Полученные результаты свидетельствуют в пользу кластерного характера магнетизма в тонких пленках $Pd_{0.99}Fe_{0.01}$.

2. Впервые исследована динамика магнитного момента в сверхтонких эпитаксиальных пленках железо-иттриевого граната с использованием сверхпроводящего ниобиевого волновода, напыленного непосредственно поверх магнитной пленки. Продемонстрирована роль поверхностных напряжений и сверхпроводящей вихревой фазы на спектр ферромагнитного резонанса.

3. Разработан метод изучения магнитодинамических характеристик ферромагнитных микроструктур с использованием сверхпроводящего высокодобротного резонатора на чипе. Повышенная чувствительность метода обусловлена высокой добротностью электромагнитного резонатора. Широкополосность измерений обеспечивалась использованием серии резонансных мод электромагнитного резонатора.

4. Разработано сверхпроводящее гибридное устройство, позволяющее определять резонансные характеристики ферромагнитных микроструктур с высокой собственной магнитной анизотропией без применения анализатора цепей. Работа устройства основана на использовании «длинного» джозефсоновского перехода, работающем в режиме “ступеней нулевого поля” и связанного индуктивно с ферромагнитной микроструктурой. Движение солитона в длинном джозефсоновском переходе синхронизируется с магнитостатической стоячей волной ферромагнетика, что приводит к появлению ступеней на вольт-амперной характеристике при напряжениях, соответствующих частоте ферромагнитного резонанса.

5. Проведено экспериментальное исследование резонанса магнитостатических поверхностных спиновых волн, индуктивно взаимодействующих со сверхпроводящей

поверхностью. Обнаружено увеличение фазовой скорости спиновых волн. Предложена и опробована модель индуктивного взаимодействия между сверхпроводящей и ферромагнитной подсистемами. Исследованы законы дисперсии поверхностных магнитостатических и объемных спиновых волн, индуктивно взаимодействующих со сверхпроводящей поверхностью. Показано, что данный механизм может быть использован для преобразования закона дисперсии спиновых волн в практических целях.

6. Впервые проведено системное экспериментальное изучение динамики магнитного момента в трехслойных системах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник. Показано, что электронное взаимодействие между подсистемами радикально сдвигает частоты ферромагнитного резонанса в область более высоких частот.

7. Предложены методы формирования магнонных кристаллов, состоящих из гибридных периодических структур сверхпроводник-ферромагнетик. Изучены спин-волновые спектры таких структур, состоящие из набора запрещенных и разрешенных зон.

8. Впервые продемонстрировано сверхсильное фотон-магнонное взаимодействие на чипе с рекордными характеристиками взаимодействия. Рекордные характеристики взаимодействия достигнуты за счет формирования специальной многослойной гетероструктуры, состоящей из сверхпроводящих, ферромагнитных и диэлектрических слоев.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для проектирования магнонных устройств, работающих при криогенных температурах, для исследования резонансных свойств слабых ферромагнетиков и ферромагнитных микроструктур, в том числе в суб-терагерцовом диапазоне частот, а также для разработки гибридных систем с сильным фотон-магнонным взаимодействием.

Оформление диссертации, публикации и апробация.

Представленная диссертация Головчанского И.А. оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми ВАК РФ, является самостоятельной работой состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографии. Общий объем диссертации 240 страниц, из них 185 страниц текста, включая 61 рисунок. Библиография включает 431 наименование на 41 страницах. Основные результаты работы докладывались на восьми конференциях в виде стендовых, устных и приглашенных докладов, и были опубликованы в 12 статьях, индексируемых базами данных WoS и Scopus.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, новизна, основные задачи и основные положения, выносимые на защиту. Кроме того, в данном разделе диссертации описывается научная и практическая значимость результатов проведенных исследований.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому рассмотрению и экспериментальной разработке подходов к изучению резонансных характеристик ферромагнитных тонких пленок и микроструктур с помощью сверхпроводящих систем на чипе: сверхпроводящих волноводов, сверхпроводящих резонаторов и джозефсоновских переходов. Показаны преимущества в чувствительности сверхпроводящих волноводов и высокочастотных резонаторов на чипе при исследовании резонансных характеристик ферромагнитных микроструктур. Продемонстрировано влияние размагничивающего фактора микроструктуры на ФМР. Доказано влияние сверхпроводящей вихревой фазы на ФМР гетероструктуры сверхпроводник/ферромагнетик на примере ниобий/ЖИГ. Предложено гибридное устройство на основе длинного джозефсоновского перехода для детектирования ФМР микроструктур с высокими значениями магнитной анизотропии.

Во второй главе представлено экспериментальное и теоретическое исследование дисперсии спиновых волн в гибридных структурах сверхпроводник-ферромагнетик. Рассмотрено, как индуктивное, так и электронное взаимодействия между подсистемами. Экспериментально показано смещение резонансных линий поверхностных спиновых волн вследствие магнитостатического взаимодействия со сверхпроводящей поверхностью. Модифицированный метод микромагнитного моделирования, опробованный на экспериментальных результатах, позволил рассчитать дисперсию спиновых волн при плоскостной намагниченности. Представлено подробное экспериментальное исследование влияния эффекта сверхпроводящей близости в трехслойных гибридных системах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник на динамику магнитного момента в ферромагнитном слое.

В третьей главе представлены подходы к созданию различного типа магнитных кристаллов на основе гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, то есть, магнитных метаматериалов с периодической модуляцией параметров. Их основной характеристикой является наличие разрешенных и запрещенных зон для распространения спиновых волн. Рассмотрены гибридные структуры, в которых основным взаимодействием между сверхпроводящей и ферромагнитной подсистемами, является, как магнитостатическое, так и электронное взаимодействие.

Четвертая глава посвящена исследованию гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик, в которых впервые реализовано так называемое сверхсильное фотон-магнитное взаимодействие на чипе. Ключевым свойством рассматриваемых систем является существенное уменьшение фазовой скорости электромагнитных волн в тонкопленочных структурах сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник. Установлено что такая система может быть описана в модели Хопфилда, которая (в отличие от модели Дике для двух связанных осцилляторов) содержит дополнительное диамагнитное слагаемое, связанное с плазмонным вкладом электронов проводимости в энергию системы.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, вытекающие из проведенных исследований и анализа.

Содержание автореферата Головчанского И.А. полностью соответствует содержанию диссертации.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием экспериментальных данных, аналитических и численных расчетов. Представленные результаты были опубликованы в ведущих мировых рецензируемых научных изданиях и представлялись на конференциях высокого уровня, что также подтверждает достоверность результатов.

При знакомстве с работой возникли следующие вопросы и замечания.

1. Во Введении при обзоре работ, в которых используются сверхпроводники для изучения магнитных свойств пленок $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}$ следовало бы упомянуть работу Л. С. Успенской и др. «Магнитные свойства и пиннинг в гибридных структурах $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}\text{-Nb}$ », Письма в ЖЭТФ 97, 176 (2013), в которой выводы о магнитной структуре пленки $\text{Pd}_{99}\text{Fe}_{01}$ сделаны на основании изучения критического тока в сверхпроводящей подсистеме.

2. В разделе 1.2.2. «Тестовые измерения ферромагнитного резонанса в тонкопленочных структурах пермаллоя» приведено сравнение с литературными данными пересчитанных по измеренной линии ФМР и формуле (1.1) значений намагниченности насыщения M_s и поля анизотропии H_a для пленок пермаллоя. Было бы более убедительно сравнить результаты такого пересчета с величинами M_s и H_a , полученными из магнитостатических измерений на тех же образцах.

3. В разделе 1.5 из текста не ясно чем отличается «солитон» от джозефсоновского вихря (который тоже является солитоном со скачком фазы на 2π и содержит квант магнитного потока)

4. В главах 2 и 3 подробно описаны результаты измерений, но недостаточно внимания уделено описанию экспериментальных методов исследований.

5. Автор использует термин «закрытые граничные условия», он не является общепринятым и требует четкого определения для рассматриваемых в работе задач.

6. В тексте встречаются опечатки, орфографические ошибки, не согласование в одном предложении времен или падежей. Например, в главе 3 автор пишет: «величина эффекта сверхпроводящей близости пропорциональна толщине ферромагнитной слоя». Что такое «величина эффекта» и «ферромагнитной слоя»? Перечислять все подобные огрехи в отзыве не имеет смысла, на них указано автору. Впрочем, число подобных ошибок не больше, чем в других рукописях такого объема.

Вышеупомянутые замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Головчанского И.А. Совокупность результатов диссертационной работы может быть охарактеризована как значимое научное достижение в области изучения систем сверхпроводник-ферромагнетик и будут способствовать дальнейшему развитию исследований в этой важной для приложений области. Диссертационная работа

Головчанского И.А соответствует научной специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния. По актуальности, научной новизне и объему выполненных исследований она представляет собой завершённую научно-квалификационную работу.

Диссертационная работа «Динамика магнитного момента в гибридных системах сверхпроводник-ферромагнетик» отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС» П 710.05-22, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Головчанский Игорь Анатольевич, заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв обсуждались и одобрены на совместном семинаре подразделений ИТПЭ РАН 29 сентября 2022. Присутствовали 12 сотрудников. Результаты голосования 12 - "за", 0 - "против". Протокол № 1.

Заведующий лабораторией № 1

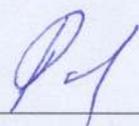
Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики

Российской академии наук (ИТПЭ РАН),

125412 Москва, ул. Ижорская 13, стр. 6.

Д.ф.-м.н., Александр Львович Рахманов



29.11.2022г.

Email: alrakhmanov@mail.ru

Тел. +7 916 8832679