

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Головчанского И.А. **«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.

В настоящее время большое количество работ посвящается исследованию динамики распространения спиновых волн в магнитных материалах в СВЧ и терагерцевом диапазоне частот. проводятся для структур, которые могут быть использованы как элементные блоки устройств обработки информации на принципах магنونной логики. Расширение области использования пленок для создания на их основе различных функциональных элементов магнонных сетей стало возможным, вследствие исследования свойств спиновых волн, распространяющихся вдоль магнитных микроволноводов и магнонных кристаллов. Диссертационное исследование Головчанского И.А. посвящено изучению динамики магнитного момента в различных гибридных системах, в основе которых лежит взаимодействие между сверхпроводящей и ферромагнитной подсистемами. Актуальность исследований магнитодинамических явлений связана с чрезвычайно широкими возможностями их применений в двух основных направлениях: в науках о материалах - в качестве способа изучения магнитных характеристик материалов, а также в области магноники и смежных областях - в качестве инструмента передачи и обработки информации посредством спиновых волн.

Для проведения исследований автором применялись современные тонкопленочные технологии для создания гибридных микроструктур, а также криогенные СВЧ эксперименты для характеристики резонансных характеристик микроструктур. Теоретические исследования осуществлены при помощи микромагнитного моделирования. В ходе диссертационных исследований экспериментально и теоретически установлено, что в системах сверхпроводник-ферромагнетик можно контролируемо изменять законы дисперсии спиновых волн за счет магнитостатического и электронного взаимодействия между подсистемами. Также показано что определенные преимущества сверхпроводящих СВЧ структур позволяют применять их для исследования магнитодинамических свойств слабых ферромагнетиков или одиночных ферромагнитных микроструктур. Одним из наиболее значимых результатов является демонстрация сверхсильного взаимодействия между электромагнитными волнами и магнитодинамическими осцилляциями в сверхпроводящих гетероструктурах за счет кинетической индуктивности сверхпроводящей подсистемы. Причем, как показано экспериментально, такие системы описываются моделью Хопфилда и не подвержены сверхизлучательному переходу. Возможность реализации конкурирующих модели Дике или модели Хопфилда является активно обсуждаемой проблемой взаимодействия фотонов с ансамблем двухуровневых систем.

Хотел бы отметить следующие замечания к автореферату (для отзыва на автореферат - опционально):

1. На стр. 23 автореферата представлены результаты экспериментального исследования спектра спиновых волны в слое пермаллоя нагруженного копланарной линией. В частности показано, что при температуре  $T < T_c$  наблюдаются линии поглощения которые трактуются как спин-волновые резонансы (СВР). СВР объясняются поглощением микроволновой мощности стоячими магнитостатическими волнами, формируемые их отражениями от границ магнитного образца. Предложена формула для расчета резонансных частот СВР. Почему при  $T > T_c$  СВР исчезают? Резонансные частоты для СВР остались неизменными, так как граничные условия от температуры не зависят. Следовательно, и при  $T > T_c$  в магнитном образце должна формироваться стоячая спиновая волна. На рисунке 5б представлены полевые зависимости частот СВР для мод СВР с номерами  $n=0,1,2,3,4$ . Однако, известно что, возможность возбуждения мод СВР определяется интегралом перекрытия сторонних магнитных полей источников (копланарной линии) и собственных колебаний намагниченности соответствующей определенной моде. В частности, при соответствующей конфигурации полей источников могут возбуждаться только четные или нечетные моды СВР. Была ли проведена оценка условий возбуждений СВР для конкретных значений индексов  $n$ ?
1. В разделе 2.3 представлено численное исследование законов дисперсии спиновых волн, которые распространяются в двухслойной системе ферромагнетик-сверхпроводник. Дисперсионные характеристики спиновых волн в металлизированных пленках ферритов при различных величинах удельной проводимости металла исследованы ранее в большом количестве работ. В них показано, что при несимметричных граничных условиях для поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) проявляются эффекты невязимного распространения. В чем принципиальное отличие механизмов возникновения и проявления свойств невязимности, исследованных в данной работе для структур «сверхпроводник- ферромагнетик», от ранее полученных результатов для структур «металл- ферромагнетик»?
2. В разделе 3.3 представлены результаты микромагнитного моделирования зонной структуры гибридных магнитных кристаллов в геометрии поверхностных спиновых волн и обратных объемных спиновых волн. На рисунке 10 б представлена зонная структура обратных объемных волн (ООВ) в магнитной структуре нагруженной периодической системой сверхпроводящих полос. ООВ имеют многомодовый характер распространения, связанный с различными распределениями намагниченности по толщине структуры. Для какой моды ООВ представлены результаты на рис. 10 б? Почему не учитываются другие моды ООВ?


Приведенные замечания носят исключительно рекомендательный характер и не влияют на высокий уровень диссертации и проведенных исследований в целом.

Основные результаты по теме диссертации изложены в статьях, в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Результаты исследований прошли хорошую апробацию на международных и всероссийских научных конференциях. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в научно-исследовательских и производственных организациях, образовательных учреждениях, сферой деятельности которых являются исследования спиновых волн в различных структурах, а также производство устройств, работающих с их использованием.

Считаю, что диссертационное исследование Головчанского И.А. выполнено на высоком научном уровне. Достоверность результатов подтверждается значительным количеством проведенных измерений и выбором методов экспериментального, теоретического и численного исследования. Актуальность диссертационных исследований подтверждается списком опубликованных работ по теме диссертации в ведущих мировых изданиях. Диссертационное исследование полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор, Головчанский Игорь Анатольевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Саратовский национальный  
исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского»  
кандидат физико-математических наук  
по специальностям 01.04.03 и 01.04.05,  
доцент, доцент кафедры физики открытых  
систем Института физики СГУ, г. Саратов.

Контактные данные  
Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83  
тел.: +79033868480  
e-mail: Sadovnikovav@gmail.com

  
Садовников Александр Владимирович  
1 декабря 2022 г.

