

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Чубчева Евгения Дмитриевича

на диссертационную работу Темной Ольги Станиславовны на тему
«УПРАВЛЕНИЕ ЗАТУХАНИЕМ ВОЛН И КОЛЕБАНИЙ
НАМАГНИЧЕННОСТИ СПИНОВЫМ ТОКОМ В СВЯЗАННЫХ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности
1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Общая характеристика работы

В последнее время активно развиваются технологии, основанные на альтернативных физических принципах обработки и передачи информации с помощью наноразмерных устройств. Продолжающаяся миниатюризация компонентов традиционной полупроводниковой электроники подводит существующие технологии к своим физическим и технологическим пределам, в частности в вопросах энергоэффективности и теплоотдачи. В связи с этим возникает запрос на развитие альтернативных технологий, которые могли бы позволить улучшать характеристики информационных систем, таких как скорость обработки информации и энергопотребление при относительно низких размерах.

Одним из таких возможных направлений развития информационных технологий является магноника. Важной задачей магоники является исследование эффективных методов компенсации собственного затухания спиновых волн из-за магнон-фононного рассеяния.

Диссертационная работа Темной О.С. посвящена исследованию динамики магнонных систем с компенсацией потерь с помощью эффекта переноса магнитного момента. В работе исследовано влияние компенсации потерь на динамику связанных магнонных волноводных структур и осцилляторов и различные нелинейные эффекты и явления в магнонных осцилляторах, а именно влияние ориентации внешнего магнитного поля и угла поляризации спинового тока на неизохронность системы и частоты нормальных мод, а также на положение особой точки. Такие системы могут использоваться для создания элементов компонентной базы устройств обработки информации.

Диссертация включает введение, четыре главы, список использованной литературы и приложение.

Во введении приведена актуальность выбранной темы, а также обзор существующих акустических датчиков для исследования свойств жидкостей и льда. Сформулированы цели и задачи исследования, определена научная

новизна, научная и практическая ценность полученных результатов, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава разделена на 7 параграфов. В ней приведен обзор эффектов и явлений, возникающих в магнонных волноводных и резонансных структурах, описаны методы расчета характеристик магнитостатических спиновых волн: метод магнитостатического потенциала и метод спин-волновых мод. Перечислены основные типы волн и приведены выражения для расчета их дисперсионных характеристик. Проведён обзор механизмов потерь спиновых волн при распространении. Далее выполнен обзор методов компенсации собственного затухания в магнонных структурах, таких как управление магнитной анизотропией с помощью электрического напряжения, параметрическая накачка, перенос спинового момента. В завершение приведен обзор литературы по особым точкам в различных системах и описываются условия их возникновения в пространстве параметров системы. Приведен обзор литературы по особым точкам в магнонных системах.

Во второй главе исследуется влияние переноса магнитного момента на распространение спиновых волн в структуре “ферромагнетик-нормальный металл”. Исследуется компенсация потерь спиновых волн с помощью переноса магнитного момента, возникающего из-за спинового эффекта Холла при протекании электрического тока через нормальный металл, и влияние переноса магнитного момента на компоненты тензора магнитной восприимчивости ферромагнетика. Проводится сравнение результатов теоретических расчётов с результатами эксперимента, опубликованного в статье Н. Merbouche, В. Divinskiy, D. Gouere et al. True amplification of spin waves in magnonic nano-waveguides // Nat. Commun. 2024. Vol. 15. No. 1560 (статья [69] в тексте диссертации). Получены выражения для компонент тензора магнитной восприимчивости при наличии переноса магнитного момента. Показано, что наличие спинового тока в нормальном металле приводит к компенсации потерь спиновых волн и к повышению частот, при которых могут распространяться спиновые волны.

Третья глава посвящена исследованию взаимодействия двух магнонных волноводов при наличии компенсации потерь и усиления потерь с помощью эффекта переноса магнитного момента. Исследуются условия существования особой точки в системе из двух магнонных волноводов с усилением и усиленными потерями, полученными с помощью эффекта переноса магнитного момента. Исследуется спектры пропускания системы из двух волноводов в зависимости от константы взаимодействия волноводов и собственных потерь. Исследуется изменение длины перекачки энергии между двумя магнонными волноводами вблизи условий возникновения особой точки. Получены спектры пропускания для двух вариантов компенсации собственных потерь в связанных структурах – симметричном, когда в обеих структурах затухание компенсировалось одинаково, и асимметричном, где в одной структуре затухание усиливалось, а во втором компенсировалось на ту же абсолютную величину. Показано, что при асимметричной компенсации

собственного затухания система всегда переходит в одночастотный режим, даже если изначально две нормальные моды были спектрально различимы, что является следствием существования особой точки. Показано, что при увеличении плотности спин-поляризованного тока длина перекачки энергии из одного волновода в другой растёт и в особой точке стремится к бесконечности.

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния нелинейности на поведение связанных магнонных осцилляторов и параметры возникновения особых точек в системе из двух и трёх связанных спин-трансферных магнонных осцилляторов (СТНО). Рассматривается влияние нелинейности на параметры возникновения особой точки в системе связанных осцилляторов Дуффинга. Исследуется изменение параметров особой точки при увеличении угла внешнего магнитного поля и наличии внешнего воздействия в системе из двух и трёх связанных СТНО. Показано, что кубическая нелинейность при определённых значениях коэффициента нелинейности приводит к уменьшению амплитуды тока, необходимого для наблюдения особой точки. Показано, что путем изменения амплитуды внешнего воздействия и угла спинового тока можно менять ток возникновения особой точки, что означает возможность менять ее положение в пространстве параметров системы, чего нельзя достичь в линейной системе.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Предложена математическая модель, описывающая распространение поверхностных магностатических спиновых волн в связанных магнитным дипольным взаимодействием структурах ФМ-НМ, в которых с помощью спинового эффекта Холла компенсируется и усиливается собственное затухание. Найдены условия возникновения особой точки в этой системе, приведена зависимость величины электрического напряжения, при котором особая точка появляется в пространстве параметров «частота-электрический ток», от физических размеров структур и расстояния между ними.

2. Проведен анализ влияния спинового тока на длину перекачки спиновых волн в связанных структурах ФМ-НМ, а также рассогласования в собственных затуханиях и волновых числах спиновых волн на величину критического постоянного электрического тока, при котором в пространстве параметров системы «частота-электрический ток» возникает особая точка.

3. Проведен анализ влияния спинового тока на длину перекачки спиновых волн в связанных структурах ФМ-НМ, а также рассогласования в собственных затуханиях и волновых числах спиновых волн на величину критического постоянного электрического тока, при котором в пространстве параметров системы «частота-электрический ток» возникает особая точка.

4. Предложена математическая модель, описывающая зависимость характеристик дипольно связанных СТНО от угла внешнего магнитного поля. Проанализировано влияние угла внешнего магнитного поля на

неизохронность системы, константу связи между структурами, смещение собственных частот и расталкивание нормальных мод.

5. Проведен анализ влияния параметров системы двух дипольно-связанных СТНО, а именно направления внешнего магнитного поля и угла спиновой поляризации, на изменение величины действующего на СТНО постоянного электрического тока, при котором в системе возникает особая точка.

Достоверность полученных результатов подтверждена применением известных методов расчёта спиновых волн и систем из связанных резонаторов. Представленные выводы не противоречат данным, имеющимся в научной литературе, а дополняют и расширяют их.

Основные результаты работы были представлены на 4 российских и международных конференциях по теме диссертации. Автор имеет 6 публикаций по теме исследования в различных научных журналах, включая высокорейтинговые журналы первого квартиля, входящие в международные базы данных Web of Science и Scopus.

Практическая значимость работы заключается в исследовании поведения связанных магнонных структур с компенсацией собственного затухания. Показано, что в пространстве параметров таких связанных структур могут возникать особые точки, где вырождаются не только собственные числа системы, но и собственные векторы. В работе исследованы различные нелинейные эффекты и явления в спинтронных осцилляторах, а именно влияние ориентации внешнего магнитного поля и угла поляризации спинового тока на неизохронность системы и характеристики нормальных мод, а также изменение параметров системы, при которых может возникнуть особая точка. Такие системы могут использоваться для создания элементов компонентной базы устройств обработки информации, узкополосных фильтров и магнонных волноводов.

Основное содержание работы соответствует требованиям специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Замечания:

1. В главе 2 сравниваются результаты расчетов с экспериментом из статьи Н. Merbouche, В. Divinskiy, D. Gouere et al. True amplification of spin waves in magnonic nano-waveguides // Nat. Commun. 2024. Vol. 15. No. 1560. В этой статье, в частности, показано, что существует зависимость сдвига частоты от угла, и при определённом угле зависимость от величины тока, используемого для усиления, должна исчезнуть. В тексте диссертации не воспроизводился этот эффект. Есть ли возможность это сделать, используя описанную в диссертации теорию?

2. Для получения особой точки требуются одинаковые частоты и различные скорости затухания или усиления. Во второй главе показано, что спиновый ток меняет не только мнимую, но и действительную часть магнитной восприимчивости, которая может привести к изменению частоты резонанса магнитного осциллятора. Не учтено, каким образом изменение

действительной части магнитной восприимчивости повлияет на условия возникновения особой точки. Это особенно важно в четвертой главе, в которой отсутствует компенсация потерь в одном из резонаторов.

3. Как физически объяснить обусловленное нелинейностью уменьшение интенсивности тока, необходимого для получения особой точки?

4. Параметр нелинейности β_{th} , при котором наблюдается уменьшение амплитуды тока, необходимого для наблюдения особой точки, принимает значения порядка 0,76. Достижимы ли такие значения в эксперименте?

5. В случае двух связанных линейных резонаторов усиление, необходимое для экспоненциального роста амплитуды, всегда больше усиления, необходимого для наблюдения особой точки. В главе 4 утверждается, что при определенной ориентации внешнего магнитного поля сила постоянного тока $I_{от}$, необходимого для наблюдения особой точки в системе из двух СТНО, может быть больше силы тока I_{th} , при которой возникает усиление моды. По какой причине может наблюдаться такое соотношение между $I_{от}$ и I_{th} ?

6. В тексте диссертации есть опечатки, например, в главе 1 второй и третий параграфы имеют номера 2.2 и 2.3, а не 1.2 и 1.3, соответственно, в главе 3 два параграфа с номером 3.4, на стр. 35 “изучение влияние усиления”, на стр.39 ссылка на литературу [2.12] в квадратных скобках, состоящая из двух индексов, на стр.47 в уравнении 3.1 у вектора \mathbf{m} то один, то два индекса. Иногда присутствуют аббревиатуры на английском языке без расшифровки (STT на стр. 27).

Отмеченные здесь недостатки не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление от диссертации и в основном являются уточнениями, дополнениями к описанию наблюдаемых явлений и используемым формулировкам.

Автореферат соответствует требованиям п. 25 «Положения о присуждении степеней», его содержание полностью отражает основное содержание диссертации. На основании изложенного можно заключить, что диссертация Темной О.С. «Управление затуханием волн и колебаний намагниченности спиновым током в связанных ферромагнитных структурах» представляет собой завершённое научное исследование, удовлетворяющее требованиям п. 9 «Положения о присуждении степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 – «Радиофизика»), старший научный сотрудник научно-теоретического отдела 0070 Федерального государственного унитарного предприятия

«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

« 18 » марта 2025 г.



Чубчев Евгений Дмитриевич

Контактная информация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Адрес: 127030, г. Москва, ул. Сущевская, д. 22.

Телефон: +7 (916) 240-19-64

e-mail: eugene.chubchev@yandex.ru

Подпись Чубчева Е.Д. заверяю

Учёный секретарь НТС ФГУП «ВНИИА»



Феоктистова Л.В.