

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гапончика Романа Валерьевича на тему «Исследование наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн и магнонных вычислительных устройств на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Актуальность темы.

Диссертационная работа Гапончика Р.В. посвящена изучению нелинейного сдвига фазы спиновых волн малой амплитуды, одновременно распространяющихся в магнонных кристаллах на разных частотах, наведённого спиновой волной накачки большой амплитуды, с учётом нелинейного затухания спиновой волны накачки и разработке методики измерения этого эффекта. Интерес к такого рода исследованиям обусловлен необходимостью разработки новых устройств спин-волновой (магнонной) логики, в которых управление характеристиками выходного сигнала одного логического элемента происходило бы с помощью выходного сигнала другого магнонного логического элемента. В диссертации также проведено исследование новых элементов магнонной логики, построенных с использованием наведённого нелинейного сдвига фазы спиновых волн. Кроме того, проведено исследование аппаратной реализации физических резервуарных вычислений на основе магнонного резервуара с токовым механизмом ввода данных.

В последнее десятилетие исследования нелинейных свойств спиновых волн, распространяющихся в сплошных и периодических магнитных структурах, и аппаратных реализаций нейроморфных вычислений ведутся наиболее интенсивно. Были исследованы различные нелинейные эффекты и физические реализации резервуарных вычислений, однако ряд важных вопросов оставался неизученным. К этим вопросам можно отнести исследования, проведённые соискателем в настоящей диссертации. Таким

образом, тема диссертационной работы Гапончика Р.В. является *актуальной и представляет научный и практический интерес*, а применяемые в исследованиях методы и экспериментальное оборудование соответствуют современному мировому уровню в данной области.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований. Полный объём диссертации составляет 111 страниц текста с 47 рисунками и 4 таблицами. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели работы и изложены основные положения, выносимые на защиту. В последующих разделах приводится обзор состояния исследований в данной научной области, описываются теоретические подходы и численные методы, используемые в работе, приводятся результаты исследований. В заключении изложены наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная ценность и новизна.

Работа соискателя посвящена исследованию наведённого нелинейного сдвига фазы спиновых волн в магнетонных кристаллах, а также исследованию нелинейных элементов магнетонной логики и аппаратной реализации резервуарных вычислений с токовым механизмом ввода данных. В частности,

- впервые был теоретически и экспериментально исследован наведённый нелинейный сдвиг фазы, возникающий при одновременном распространении двух спиновых волн в магнетонных кристаллах, для двух типов спиновых волн: поверхностной и прямой объёмной спиновых волн;
- изучено влияние коэффициента связи между прямой и отраженной спиновой волной, а также коэффициентов нелинейного затухания третьей и пятой степеней на величину наведенного нелинейного сдвига фазы в магнетонных кристаллах;

- предложена и экспериментально исследована схема магنونного нелинейного логического элемента, выполняющего функцию «исключающее или-не»;
- теоретически и экспериментально исследована аппаратная реализация магنونного физического резервуара с токовым механизмом ввода данных, оценена его производительность.

Для теоретических исследований наведённого нелинейного сдвига фазы был использован метод медленно меняющихся амплитуд и метод связанных волн. Также была предложена оригинальная методика его измерений в ферромагнитных плёночных структурах. Экспериментальные исследования нелинейного элемента магنونной логики производилось с использованием схемы типа интерферометра Маха-Цендера. Предложенная схема магنونного резервуара с токовым типом ввода данных была построена на базе активного спин-волнового кольцевого резонатора. Оценка производительности резервуара основывалась на известных тестах на кратковременную память и проверку четности.

Все полученные в диссертации результаты являются *новыми*. Среди полученных результатов на мой взгляд наиболее важными являются следующие:

1. Теоретически и экспериментально исследован наведённый нелинейный сдвиг фазы спиновых волн различных типов, распространяющихся в магنونных кристаллах. Показано влияние нелинейного затухания волны накачки, а также влияние отражения волны накачки от периодической структуры на наведённый нелинейный фазовый набег спиновых волн.

2. Проведено исследование спин-волнового логического элемента, в основе работы которого лежит эффект наведённого нелинейного сдвига фазы спиновых волн, а также явления интерференции спиновых волн.

3. Разработана модель магنونной резервуарной вычислительной системы с токовым механизмом ввода данных. Исследовано влияние

параметров конструкции магنونного физического резервуара на его характеристики.

4. Экспериментально исследованы рабочие характеристики и производительность магنونного физического резервуара с токовым механизмом ввода данных. Показана возможность выполнения трех базовых операций – нелинейного отображения, кратковременной памяти и ввода данных – одним и тем же компонентом – пленкой железо-иттриевого граната.

Практическая значимость работы состоит, во-первых, в разработке новой методики исследования нелинейного эффекта сдвига фаз спиновых волн. Во-вторых, полученные результаты могут быть использованы для создания новых интегральных устройств обработки СВЧ сигналов на принципах магنونной логики.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов следует из использования автором использования автором известных и хорошо себя зарекомендовавших математических методов и подходов. Отдельные результаты, полученные различными методами (аналитическими, численными и экспериментальными) совпадают между собой. Основные выводы находятся в соответствии с известными теориями и публикациями других авторов.

Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо оформлена и важность полученных результатов не вызывает сомнения. Тем не менее работа не свободна от недостатков. Можно выделить следующие **замечания** к тексту и к работе в целом.

1. В положении 1 используется термин «нелинейный поворот фазы», который в явном виде нигде в диссертационной работе не расшифровывается. Также недостаточно понятно вводится нормированный коэффициент передачи.

2. На рис. 2.12 вблизи частоты 3.23 ГГц наблюдается большой пик, который не описывается теоретической кривой и появление которого автор не объясняет.

3. Описывая экспериментальное исследование в главе 2 приведено значение магнитного поля, в котором проводилось измерение наведённого сдвига фазы спиновых волн, однако не указана однородность поля. Также было бы желательным исследовать зависимость этого эффекта от магнитного поля.

4. В тексте работы автором практически не приводится никакой информации об использованных образцах. Не указано, где и каким способом были изготовлены тонкоплёночные структуры. Не приведены их магнитные и другие характеристики. В разных главах исследуются образцы с разными параметрами, однако не указана причина выбора именно этих образцов.

5. В теоретической главе приведена подробная теория нелинейных эффектов, вывод которой проводился только для непрерывных сигналов. Однако эксперименты проводились для случая, когда одновременно структуру возбуждали как непрерывным, так и импульсным сигналом. Насколько это правомерно? Рассматривалось ли влияние параметров импульсов на исследованные нелинейные эффекты?

6. Формулировка четвертого научного положения представляется слишком общей. Можно было написать более конкретно.

Отмеченные недостатки и замечания в целом никоим образом не снижают высокого уровня представленной работы и важности полученных практических результатов.

Основные результаты работы *полностью опубликованы* в ведущих научно-технических журналах (13 статей), прошли апробацию на Российских и международных научно-технических конференциях. Автореферат достаточно подробно отражает, научную новизну, содержание и основные результаты диссертации.

Заключение

В целом диссертационная работа представляет собой серьезное исследование, выполненное на высоком научном уровне. В ней получен ряд новых важных результатов по решению задач нелинейного распространения спиновых волн, магنونной логики и аппаратной реализации резервуарных вычислений. Научные положения и выводы диссертации обоснованы и подтверждены соответствующими исследованиями.

Учитывая изложенное, считаю, что диссертационная работа Гапончика Р.В. «Исследование наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн и магнонных вычислительных устройств на их основе», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, представляет собой законченную исследовательскую работу, выполненную на высоком научном уровне и соответствует всем требованиям пп. 9-14 Положения ВАК о присуждении учёных степеней (утверждённым постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а её автор Гапончик Роман Валерьевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Оппонент:

Профессор кафедры нанoeлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет",
доктор физико-математических наук, доцент



Фетисов Леонид Юрьевич

20.11.2023

Адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78

Телефон (рабочий): +7 916 1287383

Адрес электронной почты: fetisovl@yandex.com

Подпись руки


УДОСТОВЕРЯЮ:

Начальник Управления кадров

М. М. Бузанова

