

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

САФИНА АНСАРА РИЗАЕВИЧА

«Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений»

Проблематика и актуальность работы

Диссертационная работа Сафина Ансара Ризаевича посвящена исследованию нелинейных динамических процессов в автоколебательных наноструктурах антиферромагнитной спинтроники, таких как осцилляторы, детекторы, эмиттеры терагерцового излучения, а также более сложные устройства на их основе: спектроанализаторы, синтезаторы частот и нейропроцессоры. Одной из возможных перспектив применения антиферромагнитной спинтроники и результатов диссертационного исследования является создание миниатюрных генераторов электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот, выполненных на основе тонких магнитных пленок. Достоинствами таких генераторов являются миниатюрные размеры, широкий диапазон перестройки частоты генерации, малые питающие напряжения и совместимость с технологиями производства современных интегральных полупроводниковых микросхем.

Несмотря на большой объем публикаций в данной области исследований, серьезной проблемой, ограничивающей возможность практических применений спинтронных генераторов, остается низкая выходная мощность (единицы и десятки нановатт) выходных колебаний. Одним из путей решения указанной проблемы является взаимная синхронизация нескольких таких генераторов с целью сложения мощностей отдельных элементов в общей нагрузке. В диссертационной работе Сафина А.Р. последовательно исследуются вопросы как внешней синхронизации спинтронного генератора, так и взаимной синхронизации многих спинтронных генераторов в общей нагрузке. В современной литературе по спинтронике применительно к

генераторам на основе антиферромагнитных систем подобная проблема до сих пор не была решена и поэтому *тема диссертации Сафина А.Р. несомненно является актуальной.*

Оценка содержания диссертации в целом

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, содержащего основные результаты и выводы, списка публикаций по теме работы и списка цитируемых источников из 207 наименований. Общий объём диссертации составляет 400 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований и задачи, которые необходимо решить для её достижения, указаны научная новизна проведённых исследований и практическая значимость их результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён достаточно подробный обзор литературы, включающий описание спинтронных эффектов в магнитных структурах, содержащих ферро- и антиферромагнетики, рассмотрены основные публикации по построению спинтронных осцилляторов и детекторов, внешней и взаимной синхронизации спинтронных осцилляторов с различными способами соединений (локальными и нелокальными), а также описаны перспективы применения антиферромагнитных материалов в устройствах терагерцевой электроники. По итогам обзора литературы были выявлены не исследованные в литературе проблемы для автоколебательных структур спинтроники, содержащих антиферро- и ферромагнетики, и поставлены задачи исследования.

Во второй главе проведена сформулирована и проанализирована математическая модель перестраиваемого спин-поляризованным током спинтронного осциллятора, состоящего из наноразмерных слоев магнетика и тяжелого металла, находящегося во внешнем магнитном поле. Получены дифференциальные уравнения, используемые в последующих главах диссертации. Рассмотрены различные магнитные материалы: антиферро- и

ферромагнетики, а также слабые ферромагнетики. Качественными методами теории колебаний проведен анализ нелинейной динамики модели антиферромагнитного осциллятора со слабым ферромагнетизмом в магнитном поле, лежащем в легкой плоскости. Найдены количественные условия безгистерезисной одномодовой генерации автоколебаний при варьировании величины внешнего магнитного поля.

В третьей главе построена теория регенеративного спинтронного детектора, состоящего из наноразмерных слоев магнетика и тяжелого металла. Проведен анализ выпрямления колебаний гигагерцового и терагерцового диапазонов частот для одноосного антиферромагнетика типа «легкая ось», двуосного антиферромагнетика типа «легкая плоскость», слабого ферромагнетика при учете взаимодействия Дзялошинского-Мория и ферромагнетиков вблизи точки компенсации углового момента.

В четвертой главе рассмотрены различные способы перестройки частоты и критического тока спинтронных детектора и осциллятора путем изменения эффективной анизотропии магнетиков за счет магнитострикции и температуры. Предложен и проанализирован метод изменения эффективной анизотропии магнетика путем приложения электрического напряжения к пьезоэлектрику в наногетероструктуре «пьезоэлектрик-магнетик-тяжелый металл» для различных магнетиков со слабой и сильной магнитострикцией (для примера рассмотрены оксид никеля и гематит). Найдены условия, при которых в продольном случае возможно реализовать линейное изменение эффективной анизотропии путем изменения напряженности в слое пьезоэлектрика.

В пятой главе развита теория субтерагерцового спинтронного эмиттера электромагнитного излучения, построенного на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследована нелинейная математическая модель для описания динамики антиферромагнетика под действием импульса накачки.

В шестой главе построена теория внешней и взаимной синхронизации спинтронных осцилляторов. Показано, что выбор направления поляризации

входного переменного спинового тока является ключевым для обеспечения внешней синхронизации единичного спинтронного осциллятора. Исследовано влияние дробно-кратной синхронизации при внешней синхронизации спинтронных осцилляторов. Предложены и исследованы математические модели двух устройств на основе эффекта внешней синхронизации осцилляторов – синтезатора дискретной сетки частот и спектроанализатора. При синтезе частоты методом «медленно меняющихся амплитуд» получена зависимость коэффициента усиления по кольцу системы фазовой синхронизации от разности частот синхронизируемых колебаний при разных коэффициентах деления в цепи обратной связи.

В седьмой главе исследована взаимная синхронизация двух связанных спинтронных осцилляторов. Сформулирована математическая модель двух связанных через общий слой тяжелого металла осцилляторов в виде двух дифференциальных уравнений маятникового типа для углов поворота векторов Нееля в базисной плоскости.

В восьмой главе решена задача анализа и синтеза управляемых, динамических сетей взаимосвязанных спинтронных осцилляторов. Проведен анализ спектров нормальных мод ансамблей осцилляторов с различной топологией: линейка, кольцо, решетка, дерево, «малый мир», иерархическая и случайная сеть. Исследованы нейроморфные вычислители на основе спинтронных осцилляторов. Показана возможность реализации нейроморфных вычислений типа «И» и «ИЛИ» в системе трех спинтронных осцилляторов, взаимосвязанных через общий слой тяжелого металла. Найдены условия реализации простейших нейроморфных вычислений на основе массивов спинтронных осцилляторов».

Все разделы диссертации последовательно связаны между собой, экспериментальные результаты и их трактовка логически изложены в соответствующих разделах работы.

Научная новизна диссертационной работы

1. Построены и исследованы математические модели перестраиваемых по частоте антиферромагнитных и ферромагнитных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств на их основе.
2. Найдены условия безгистерезисной генерации автоколебаний намагниченности при возбуждении антиферромагнитной гетероструктуры спин-поляризованным током.
3. Исследована взаимосвязь между направлениями осей анизотропии магнетика, направлением внешнего постоянного магнитного поля и поляризацией источника возбуждения для реализации регенеративного, резонансного детектирования колебаний гигагерцового и терагерцового диапазонов частот на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл».
4. Предложены различные способы перестройки резонансной частоты спинтронных детекторов и критического тока рождения автоколебаний в осцилляторах с помощью внешнего магнитного поля, электрического тока, магнитострикции, температуры.
5. Проведено исследование влияния инерционных слагаемых в уравнениях, описывающих как внешнюю синхронизацию единичного спинтронного осциллятора, так и взаимную синхронизацию массивов.
6. Проведен анализ нормальных мод массивов взаимосвязанных осцилляторов с различной топологией связей: линейка, кольцо, решетка, дерево, «малый мир», иерархическая и случайная сеть.
7. Описано нейроморфное поведение спинтронных осцилляторов, возбуждаемых импульсами оптического излучения, а также предложены варианты реализации на их основе простейших логических операций.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в том, что в ней заложены теоретические основы построения и функционирования элементов функциональной электроники на основе антиферромагнетиков. Данная работа

представляет собой фундаментальное исследование, расширяющее и углубляющее научные представления на пересечении спинтроники, физики нелинейных колебаний и радиофизики. Полученные в диссертации новые научные результаты в совокупности можно охарактеризовать как важное научное достижение, которое может привести к реализации в ближайшем будущем эффективных миниатюрных устройств функциональной электроники терагерцового диапазона частот, работающих при комнатных температурах.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложена и обоснована методика расчета, способы оптимизации параметров и перестройки спинтронных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств гигагерцового и терагерцового частотных диапазонов на их основе.
- продемонстрирована возможность разработки нового класса процессоров для задач нейросетевой обработки информации на основе массивов перестраиваемых по частоте спин-поляризованным током антиферромагнитных наноосцилляторов.
- исследованы различные нелинейные явления в спинтронных осцилляторах, в частности, гистерезисный эффект при возникновении автоколебаний и бистабильность при переходе осцилляторов из режима синхронизации в асинхронный режим, наличие которых является паразитным эффектом для задачи возбуждения стабильных колебаний.

Достоверность полученных в ходе проведённых расчётов и исследований результатов, а также научных положений и выводов диссертации подтверждается их согласием с экспериментальными данными, опубликованными в литературе.

Наиболее важные научные результаты, полученные диссертантом

1. Автоколебания в спинтронном осцилляторе, выполненном на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл», реализуются в условиях, когда проявляется гистерезисный эффект при переходе системы из области *затухающих* колебаний в область *автоколебаний*. Установлено, что для уменьшения области гистерезисной генерации необходимо уменьшать

эффективное поле анизотропии в легкой плоскости.

2. Зависимость выпрямленного напряжения в спинтронном детекторе на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» от частоты внешней электромагнитной волны или спин-поляризованного тока носит резонансный характер. Поляризация внешнего электромагнитного излучения для эффективного выпрямления должна быть круговой или эллиптической.

3. Использование слабых ферромагнетиков в качестве активных элементов терагерцевых детекторов при возбуждении линейно поляризованной волной возможно только при ненулевом внешнем постоянном магнитном поле.

Влияние внешнего поля на динамику спинов слабого ферромагнетика обусловлено взаимодействием Дзялошинского-Мория.

4. Использование ферримагнетиков с анизотропией типа «легкая ось» в качестве активных элементов терагерцевых детекторов при возбуждении линейно поляризованной волной при нулевом внешнем магнитном поле возможно только при ненулевой раскомпенсации между намагниченностями магнитных подрешеток. Для одноосного ферримагнетика типа «легкая плоскость» выпрямленное напряжение имеет конечную величину даже при нулевой раскомпенсации намагниченностей.

5. Приложение постоянного напряжения к пьезоэлектрику в гетероструктуре «пьезоэлектрик-антиферромагнетик-тяжелый металл», приводит к изменению эффективной анизотропии антиферромагнетика и, как следствие, к изменению частоты антиферромагнитного резонанса в докритической области колебаний, а также снижению порогового тока рождения автоколебаний.

5. Контролируемая спиновая динамика массивов спинтронных осцилляторов может быть реализована на границе перехода «затухающие колебания-автоколебания» путем выбора амплитуды и частоты возбуждающего импульса, а также плотности постоянного спин-поляризованного тока.

Публикации и апробация основных результатов работы

По теме диссертации опубликовано 36 статей, в том числе 22 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 14 в зарубежных научных

изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus.

На каждом этапе исследований автор не ограничивается только фундаментальными результатами, а ищет возможности для их практического использования, что в итоге привело к получению им 4 патентов на изобретения.

Основные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах и различных конференциях.

Содержание автореферата в полной мере отражает основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечена большим объёмом непротиворечивого теоретического и численного материала, а также сравнением с экспериментальными данными, квалифицированным использованием методов исследований, грамотной интерпретации полученных результатов. Сделанные в работе выводы достоверны и полностью отражают основное содержание работы.

Личный вклад соискателя

Все теоретические результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором. Экспериментальные результаты получены при непосредственной работе с соавторами, а их интерпретация и сопоставление с теоретическими результатами были проведены автором диссертации. Ряд статей автора написан в соавторстве со студентами и аспирантами, работавшими под его научным руководством.

Замечания по работе

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания.

1. Во второй главе диссертации:

- нет общего анализа уравнений нелинейной сигма-модели относительно двух углов вращения вектора Нееля – азимутального и полярного. Нелинейный

анализ на фазовой плоскости проводится только для уравнения, описывающего динамику полярного угла вектора Нееля;

- отсутствует анализ возможности использования спиновых осцилляторов на основе антиферромагнетиков в качестве генераторов электромагнитного излучения терагерцевого диапазона.

2. В третьей главе диссертации нет численных оценок чувствительности описываемых спинтронных детекторов на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» по отношению к электромагнитному излучению терагерцевого диапазона.

3. В главах 4, 6, 7 не приведен математический критерий применимости метода медленно меняющихся амплитуд при описании нелинейной динамики осцилляторов.

4. В восьмой главе приведено описание схемы нейроморфного вычислителя на основе антиферромагнитного осциллятора и рассмотрены только две простейшие логические операции – «ИЛИ» и «И». Для более общего рассмотрения было бы целесообразно рассмотреть также реализации других логических операций, таких как «НЕ», «Исключающее ИЛИ» и т.д.

Ряд замечаний может быть сделан **по форме и стилю** написания диссертационной работы.

Стр. 24.

На рис.1.1 вместо намагниченности локализованных моментов **M** ошибочно указана намагниченность электронов проводимости **m**.

Стр. 26.

В первом абзаце параграфа 1.1.2 автор пишет: «При протекании электрического тока j_e через немагнитный металл... появляется спиновый ток j_s , перпендикулярный направлению j_e », из чего с очевидностью следует, что автор считает спиновый ток j_s , вектором, как и электрический ток j_e . Это, вообще говоря, неверное утверждение, поскольку хорошо известно, что плотность спинового тока – это тензорная величина.

Стр. 32.

Рис. 1.5.а заимствован автором, однако ссылка на первоисточник не приведена.

Рис. 1.5.б также заимствован автором, здесь источник указан - дана ссылка на работу [53], однако указанная работа [53] отношения к рис. 1.5.б не имеет.

Стр.34.

Рисунок 1.6 заимствован автором, однако ссылка на первоисточник не приведена.

Стр.37-38.

В предложении «Было показано экспериментально..., что, пропуская электрический ток через слой Pt, в ЖИГ возникает нескомпенсированный спиновый момент...» автором нарушены нормы русского языка по употреблению деепричастного оборота.

Стр. 55.

Употребление жаргона иногда затрудняет понимание смысла сказанного автором. Пример (8-я строка второго абзаца стр.55): «Если спиновый ток поляризован перпендикулярно основному состоянию АФМ...».

Стр.56 и другие.

В работе имеет место отсутствие единообразного обозначения векторов. Векторы изображаются автором и прямым жирным шрифтом (что общепринято), и жирным наклонным, и обычным прямым, и обычным наклонным – один из примеров - на рис.1.17а.

Стр.60.

В первом абзаце параграфа 1.5 автор некорректно называет двухподрешеточные антиферромагнетики, в которых имеет место неполная компенсация намагниченностей подрешеток из-за их слабой неколлинеарности, «слабыми антиферромагнетиками». В литературе для обозначения таких магнетиков употребляется термин «слабые ферромагнетики». Термин же «слабый антиферромагнетизм» был введен Вонсовским и Туровым для

определения магнитного упорядочения в магнетике с основным ферромагнитным обменом и неколлинеарностью подрешеток, вызванной обменом Дзялошинского–Мория. При этом типе упорядочения абсолютная величина вектора антиферромагнетизма мала по сравнению с полным магнитным моментом.

Стр.365-374.

В разделе «Заключение» на 10 страницах текста автор перечислил 38 основных результатов проведенных им теоретических исследований. Фактически автор просто механически просуммировал в неизменном виде все выводы, которые уже были представлены ранее в отдельных главах диссертации, и не сделал каких-либо обобщающих заключений о полученных в диссертационной работе результатах.

Все приведенные выше замечания не носят принципиального характера и ни в коей мере не ставят под сомнение основные результаты работы, выполненной на высоком научном уровне и заслуживающей положительной оценки.

Итоговое заключение

Диссертация Сафина Ансара Ризаевича представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, оформленное как научно-квалификационная работа, в которой построена теория, позволяющая описывать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений». В работе получен ряд новых значимых теоретических и практических результатов. Автореферат диссертации Сафина А.Р. в полной мере отражает содержание диссертационной работы и дает адекватное представление о полученных автором результатах,

Основываясь на изложенных выше выводах об актуальности темы, научной новизне результатов, их обоснованности и достоверности, теоретической и практической значимости, а также их достаточной апробации,

можно сделать заключение о том, что диссертационная работа Сафина А.Р. «Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники» соответствует критериям и требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискателя учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор, Ансар Ризаевич Сафин, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических
наук, профессор, академик РАН,
научный руководитель
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского
отделения Российской академии
наук

Адрес: 620108, г. Екатеринбург,
ул. С. Ковалевской, 18
Телефон: +7 (343) 374-02-30
e-mail: ustinov@imp.uran.ru

УСТИНОВ

Владимир Васильевич

Подпись академика РАН, д.ф.-м.н., проф. Устинова В.В. заверяю:

27.04.2023г.

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН

Подпись, Печать



Арапова И.Ю.