

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.м.-н., профессора
Преображенского Владимира Леонидовича
на диссертационную работу Сафина Ансара Ризаевича
«Нелинейные динамические процессы в автоколебательных
структурах антиферромагнитной спинтроники»,
представленной к защите на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
1.3.12. – «Физика магнитных явлений».

Диссертационная работа А.Р.Сафина посвящена одному из актуальных направлений современной физики магнитных явлений и микроэлектроники- антиферромагнитной (АФМ) спинтроники.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из двухсот семи наименований и списка из сорока работ автора, включая четыре патента. Общий объем диссертации – четыреста страниц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, в частности, отмечается возросший научный интерес и стимулирующее развитие технологий материалов и структур для исследования новых физических явлений и создания перспективной компонентной базы на основе АФМ. Подчеркиваются такие преимущества АФМ, как малая намагниченность и высокие частоты спектров АФМ от десятков ГГц до ТГц, реализующиеся без приложения сильных магнитных полей. С полным основанием утверждается потребность в разработке теоретических основ управляемых базовых элементов АФМ спинтроники, включая методы исследования сетей связанных АФМ структур. Формулируются цели и задачи работы, описывается структура диссертации и приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обстоятельный обзор имевшихся публикаций по построению спинтронных осцилляторов и методов их синхронизации, детекторов и анализаторов спектра на основе спинтронных элементов. Указывается на перспективы применения АФМ в терагерцовой электронике, конкретизируются задачи исследований.

Вторая глава посвящена построению теории АФМ спинтронного осциллятора. В основу модели положено адекватное описание нелинейной динамики антиферромагнетиков в рамках замкнутой системы уравнений движения для вектора антиферромагнетизма (вектора Нееля). Численными методами детально исследованы режимы возбуждения автоколебаний для двухосных АФ и слабых ферромагнетиков. Полученные результаты, вошли в защищаемые положения в формулировке: «Автоколебания в спинтронном осцилляторе, выполненном на основе гетероструктуры антиферромагнетик-тяжелый металл сопровождаются возникновением гомоклинической траектории, образованной слиянием сепаратрис седел, в результате чего проявляется гистерезисный эффект между положением равновесия и автоколебательным режимом». Результаты расчета не вызывают сомнений в достоверности.

В третьей главе представлены результаты систематического исследования принципов функционирования перестраиваемых спинтронных детекторов ТГц излучения на основе антиферромагнетиков. Рассмотрено резонансное детектирование переменных токов ТГц диапазона частот. Показана возможность управления резонансной частотой с помощью постоянного тока смещения. На защиту вынесено положение: «Зависимость выпрямленного напряжения за счет обратного спинового эффекта Холла от частоты внешней электромагнитной волны или спин-поляризованного тока для гетероструктуры

«антиферромагнетик-тяжелый металл» носит резонансный характер. Для реализации перестраиваемого по частоте резонансного детектора ТГц-колебаний на основе одноосного АФМ поляризация возбуждающего колебания должна быть круговой или эллиптической». Результаты достоверны, получены аналитическими методами на основе адекватных теоретических моделей и корректных расчетов.

В четвертой главе рассмотрены принципы управления параметрами спинтронных АФМ осцилляторов и детекторов с помощью изменения эффективной магнитной анизотропии. В качестве механизма управления анизотропией предложены пьезоэлектрическое деформирование АФМ кристаллов и спин-переориентационные переходы по температуре. Результаты получены на основе анализа выведенных автором уравнений, описывающих паведенную анизотропию в двухосных кристаллах для различных поляризаций пьезоэлектрика и направлений электрического поля. Показано, что среди рассмотренных комбинаций материалов наилучшую управляемость демонстрируют PZT5H/NiO. В качестве защищаемого положения по результатам данной главы выдвинуто, обоснованное расчетами, утверждение: «Приложение постоянного напряжения, подводимого 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».

В пятой главе изучаются особенности нелинейной динамики антиферромагнитных наноструктур. Построена теоретическая модель возбуждения нелинейных спиновых колебаний электромагнитными ТГц импульсами. Исследован нелинейный терагерцовый отклик спиновой системы и процессы выпрямления напряжения в условиях нелинейного антиферромагнитного резонанса. Проведено сравнение результатов с имеющимися экспериментальными данными. На защиту вынесено положение: « При высокоамплитудной спиновой накачке антиферромагнетика в условиях нелинейного резонанса наблюдается немонотонное поведение выпрямленного, благодаря обратному спиновому эффекту Холла в соседнем слое тяжелого металла, напряжения, что связано со встречными сдвигами частоты: за счет сильного магнитного поля и высокоинтенсивного возбуждения ТГц электромагнитным излучением». Положение обосновано численным моделированием уравнений нелинейной динамики АФ и согласием с результатами экспериментов.

Шестая глава посвящена проблематике внешней синхронизации спинтронных осцилляторов. Исследованы динамические и шумовые характеристики систем синхронизации спиновых осцилляторов внешним гармоническим воздействием (ВГВ) и ФАПЧ. Изучены процессы ВГВ в двухосном антиферромагнитном осцилляторе в режимах параллельной и перпендикулярной накачки спин-поляризованным током. Предложена схема синтезатора дискретной сетки частот на основе ФАП в АФ осцилляторе и рассчитаны его характеристики. Результаты численного моделирования вошли в защищаемые положения в формулировке: «Детектирование колебаний на основе двухосных антиферромагнетиков в режиме внешней синхронизации автоколебаний возможно при параллельной спиновой накачке, тогда как в докритической области только в регенеративном режиме при перпендикулярной спиновой накачке. В автоколебательном режиме помимо сигнала выпрямленного напряжения на основной частоте возникают побочные составляющие на дробно-кратных гармониках, что является следствием дробно-кратной внешней синхронизации осциллятора». Достоверность положения подтверждается обоснованностью использованной модели и согласием результатов с полученными на сходных моделях в других областях, в частности, при исследовании эффектов Джозефсона.

В седьмой главе исследуются процессы взаимной синхронизации пары неидентичных спинтронных осцилляторов ферро- и антиферромагнитного типа. Для АФМ осцилляторов численным анализом выявлены три режима автоколебаний: асинхронный, синхронный и гистерезисный. По результатам анализа динамических процессов в резистивно связанной системе сформулировано защищаемое положение: «Наличие эффективной массы, связанной с обменным взаимодействием между магнитными подрешетками, приводит к гистерезису при переходе из синхронного в асинхронный режим при взаимной и внешней синхронизации АФМ спинтронных осцилляторов». Данное положение не вызывает сомнений в достоверности в рамках рассматриваемых моделей.

Восьмая глава расширяет анализ процессов синхронизации на ансамбли связанных спинтронных осцилляторов. Выполнен анализ спектров нормальных мод ансамблей осцилляторов с различной топологией. Исследованы характеристики малых ансамблей осцилляторов. Рассмотрен вопрос о преимуществах различных схем при наличии неидентичности элементов. Развита сетевой подход к анализу и синтезу систем связанных спинтронных осцилляторов. Изучены спектры нормальных мод иерархически организованных структур. Основные результаты сформулированы в виде защищаемых положений: «Древовидные ансамбли спинтронных осцилляторов обладают фрактальным спектром нормальных мод типа "чертова лестница", причем с ростом количества ветвей дерева и при введении дополнительных связей между элементами ансамбля количество вырожденных мод возрастает. Увеличение количества связей (усложнение топологии ансамбля связанных осцилляторов) приводит к уменьшению времени установления синхронного состояния». В заключение данной главы рассмотрено приложение связанных спинтронных АФМ осцилляторов в нейроморфных вычислителях. Защищаемым положением данного раздела является, обоснованное расчетом, утверждение: «Контролируемая спайковая и берстовая 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».

Защищаемые положения дополняет перечень достижений автора, определяющих новизну результатов представленной работы. Отмечается, что в ней впервые:

- Построены и исследованы математические модели перестраиваемых по частоте антиферромагнитных и ферромагнитных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств на их основе: синтезаторов, спектроанализаторов и нейропроцессоров.

- Найдены условия безгистерезисной генерации автоколебаний намагниченности при возбуждении гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» спин-поляризованным током.

- Исследована взаимосвязь между направлениями осей анизотропии магнетика, направлением внешнего постоянного магнитного поля и поляризацией источника возбуждения для реализации регенеративного, резонансного детектирования ГГц и ТГц колебаний на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследована структура детектора в виде гребенчатой структуры АФМ, позволившей увеличить уровень выпрямленного выходного напряжения.

- Предложены различные способы перестройки резонансной частоты спинтронных детекторов и критического тока рождения автоколебаний в осцилляторах с помощью внешнего магнитного поля, электрического тока, магнитострикции, температуры. Исследовано влияние снижения порогового тока рождения автоколебаний на амплитуду терагерцевого сигнала, генерируемого в автоколебательном режиме.

- Проведено исследование влияния инерционных слагаемых в уравнениях, описывающих как внешнюю синхронизацию единичного спинтронного осциллятора, так и взаимную синхронизацию массивов. Найдены условия возникновения бистабильного режима на границе зоны синхронизма путем исследования

приближенных уравнений типа Курамото с инерцией, описывающих динамику спинтронных осцилляторов в режиме автоколебаний.

- Проведен анализ нормальных мод массивов взаимосвязанных осцилляторов с различной топологией связей: линейка, кольцо, решетка, дерево, «малый мир», иерархическая и случайная сеть. Предложены варианты организации топологии сетей взаимосвязанных осцилляторов, позволяющих решить проблему многомодовости в сетях.

- Описано нейроморфное поведение спинтронных осцилляторов, возбуждаемых импульсами оптического излучения, а также предложены варианты реализации на их основе простейших логических операций.

Диссертационная работа в целом, представляет собой законченный научный труд, содержащий новые теоретические результаты и рекомендации, имеющие существенное практическое значение в качестве ориентира для постановки экспериментов и теоретической базы для создания конкретных устройств и систем на основе антиферромагнитных спинтронных осцилляторов.

Содержание диссертации с достаточной полнотой отражено в 36 статьях, 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. Автором получены 4 патента на изобретение. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях, а также вошли в материалы научно-исследовательских работ по грантам.

Содержание автореферата правильно и с достаточной полнотой отражает содержание диссертации.

Замечания по тексту диссертационной работы.

1. В главе 2 не прояснено, что представляет собой параметр ϕ_{EA} применительно к кристаллу гематита, под который выполнялся расчет в разделе 2.5. Если это изотропная щель в спектре АФМР, то в формулу 2.35 она должна входить без угла ϕ_0 .

2. Результаты моделирования, приведенные в разделе 4.2.5 не могут быть отнесены к кристаллу $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, поскольку он не является двухосным АФ и не имеет кубической симметрии, как это ошибочно указано на стр.159 и 194. Симметрия гематита ромбоэдрическая (группа D_{3d}^6), и к нему неприменима формула (4.31), т.к. изотропная магнитоупругая щель, определяющая активацию в квазиферромагнитной ветви спектра, неустранима внешним напряжением из-за спин-переориентационного перехода под действием деформирования.

3. Поиск оптимальной конфигурации для управления анизотропией АФМ с помощью электрического поля в главе 4 выполнен применительно к PZT керамике, тогда как более подходящим для применений в композитных структурах магнетик/пьезоэлектрик является кристалл PMN-PT $\langle 011 \rangle$ из-за сильной анизотропии пьезоэффекта в плоскости, нормальной к управляющему электрическому полю.

Указанные замечания не меняют общей положительной оценки представленной диссертационной работы.

Докторская диссертация Сафина Ансара Ризаевича «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 А.Р. Сафин заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

/В.Л.Преображенский/

ФИО оппонента: Преображенский Владимир Леонидович
Ученая степень: Доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков
119991, Москва, ул. Вавилова, 38
Телефон: +7 (499) 503-8149
E-mail: vlpreobr@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук
Ученое звание : профессор
Должность : главный научный сотрудник
Научный центр волновых исследований

12.04.2023г.

Подпись г.н.с. В.Л. Преображенского
заверено



М.Л. Лямцев
Зам. директора ЦОФ РАН