

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова,
проф. А. А. Федянин



« 17 » мая 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертационную работу Сафина Ансара Ризаевича «Нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Диссертационная работа Сафина Ансара Ризаевича посвящена разработке теории нелинейных динамических процессов в автоколебательных структурах спинтроники, содержащих антиферро- и ферримагнетики. **Тема работы актуальна** по целому ряду причин, имеющих как фундаментально научное, так и прикладное значение. В первую очередь это связано с созданием элементов функциональной электроники ТГц диапазона частот и поиском материалов с резонансными частотами, находящимися в этом частотном диапазоне. Несмотря на то, что к настоящему времени основными активными элементами спинтроники являются ферромагнитные (ФМ) материалы, с прикладной точки зрения антиферромагнетики (АФМ), слабые ферромагнетики и ферримагнетики имеют преимущества перед ФМ. Частоты АФМ-колебаний на порядки превышают частоты ФМ, что дает возможность создавать сверхбыстрые (с частотами в сотни и тысячи ГГц). Также АФМ-структуры имеют малую (в ряде случаев практически нулевую) намагниченность, т.е. не создают внешних магнитных полей. Следовательно, АФМ-элементы практически не взаимодействуют друг с другом посредством магнитного поля. Большинство применений антиферромагнетиков в спинтронике до последних лет ограничивалось использованием их в качестве буферных

слоев для фиксации намагниченности в спиновых вентилях, работающих на эффекте гигантского магнитосопротивления. Таким образом, ключевым преимуществом использования АФМ по сравнению с ФМ для реализации миниатюрных устройств спинтроники является возможность функционирования без громоздких источников постоянного магнитного поля на частотах в сотни и тысячи гигагерц при комнатной температуре. В последние годы количество публикаций по АФМ спинтронике возрастает. Вместе с тем большинство работ носит фундаментальный характер, а недостаточная проработанность экспериментальных методов исследования АФМ накладывает ограничения на их потенциальные практические приложения.

Таким образом, чрезвычайно актуальным является создание теоретических основ базовых элементов АФМ-спинтроники, а именно управляемых по частоте осцилляторов и детекторов, а также более сложных функциональных элементов: синтезаторов, спектроанализаторов и нейропроцессоров.

В работе впервые решен целый ряд задач нелинейной динамики автоколебательных структур антиферромагнитной спинтроники. Сафиным А.Р. развита теория нелинейных динамических процессов в осцилляторах и детекторах терагерцевых колебаний, разработан сетевой подход при объединении базовых элементов в большие ансамбли, позволяющий решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений. Теоретические результаты, полученные в диссертационной работе Сафина А.Р., позволят практически реализовать различные устройства терагерцевой электроники: генераторы, детекторы, эмиттеры, синтезаторы, спектроанализаторы и нейропроцессоры.

Для достижения цели работы автором решались следующие задачи:

1. Построить теорию спинтронного осциллятора, выполненного на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследовать динамические режимы работы единичного осциллятора, найти диапазон перестройки резонансной частоты колебаний и изменения критического тока возбуждения автоколебаний.

2. Построить теорию спинтронного, регенеративного детектора на основе гетероструктуры «магнетик-тяжелый металл-магнетик». Провести верификацию полученной модели с результатами экспериментальных данных.

3. Проанализировать различные методы перестройки частоты и изменения критического тока самовозбуждения осциллятора и детектора, выполненных на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл».

4. Построить теорию внешней и взаимной синхронизации АФМ осцилляторов и устройств на их основе: синтезаторов, спектроанализаторов, нейропроцессоров и квантовых вычислителей.

5. Разработать сетевой подход к анализу и синтезу сетей взаимосвязанных спинтронных осцилляторов, позволяющих решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений.

Автор диссертации для решения поставленных задач разработал математические модели, использовал как известные методы, так и развил оригинальные подходы, выполнил трудоемкие аналитические и численные расчеты, что свидетельствует о его высокой квалификации как физика-теоретика.

Научная новизна основных полученных результатов состоит в следующем:

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

- 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».

- Предложены различные способы перестройки резонансной частоты спинтронных детекторов и критического тока рождения автоколебаний в осцилляторах с помощью внешнего магнитного поля, электрического тока, магнитострикции, температуры.

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

Достоверность выводов диссертационной работы Сафина А.Р. не вызывает сомнений. В работе использовался современный математический аппарат, материалы теоретических исследований подтверждены убедительными результатами обработки имеющихся экспериментальных данных. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых журналах и многократно проходили апробацию на международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты диссертационной работы А.Р. Сафина могут быть использованы при

разработке и создании элементов функциональной электроники ГГц и ТГц диапазонов частот. В частности, в работе:

- Предложена и обоснована методика расчета, способы оптимизации параметров и перестройки спинтронных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств ГГц и ТГц 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.

Работа производит хорошее впечатление, содержит подробный обзор литературы, детальное описание методов, большой фактический материал, подробный анализ и обсуждение результатов расчета. Однако работа не свободна от недостатков:

1. Не сделаны оценки влияния диссипативных потерь на нелинейную динамику антиферромагнитных осциллятора и детектора.
2. Не приведены данные о температурной стабильности антиферромагнитных осцилляторов.
3. Для взаимосвязанных антиферромагнитных осцилляторов не проведена оценка влияния синхронизации на ширину спектральной линии суммарного колебания при сложении мощностей.


Указанные замечания не носят принципиальный характер, ни в коей мере не влияют на выводы диссертации, и не снижают общей высокой оценки работы.

Резюмируем сказанное. Представленная диссертация является самостоятельным законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. Полученная совокупность новых теоретических результатов является крупным вкладом в развитие фундаментальных знаний о нелинейных динамических процессах в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники. Достигнутый прогресс в понимании этих свойств является достижением физики магнитных явлений, имеющим важное научное и практическое значение. Оформление диссертации отвечает всем требованиям ВАК, структура и

объём диссертации адекватно отражают полученные результаты. Автореферат и публикации по теме диссертации достаточно полно отражают представленные к защите результаты и положения. Основные результаты представлены в 36 статьях из перечня ВАК и 28 статьях индексируемых в WOS и SCOPUS, 4 патентах.

Диссертационная работа 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».

Доклад Сафина А.Р. по диссертационной работе заслушан и обсужден на научном семинаре кафедры магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры магнетизма физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (протокол № 4 от 5 апреля 2023 года).

Заведующий кафедрой магнетизма,
доктор физ.-мат. наук, профессор  Перов Николай Сергеевич

Профессор кафедры магнетизма,
доктор физ.-мат. наук, профессор  Грановский Александр Борисович

119991, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.2

физический факультет, кафедра магнетизма

тел.: 8(495) 939-47-87

E-mail: kaf-magn@physics.msu.ru

WEB: <http://magn.ru>

*Подписи Перова Н.С. и Грановского А.Б.
заверяю*

Ведущий специалист
по кадрам

Горюховская К.И.

