

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»

Актуальность темы диссертации

Основой современных микроэлектронных устройств является процесс переноса носителей электрического заряда носителей тока – электронов. Однако в последние 30 лет в связи с бурным развитием микро и наноэлектроники возникли новые перспективы в создании устройств ГГц и ТГц электроники, построенных на основе тонких магнитных пленок. Одним из самых перспективных элементов спинтроники, который в будущем сможет заменить современные ГГц перестраиваемые генераторы, управляемые напряжением, а также стать основой ТГц генераторов, является спинтронный осциллятор, перестраиваемый по частоте спин-поляризованным током. Достоинствами таких генераторов являются широкий диапазон перестройки частоты током или магнитным полем, миниатюрные размеры, возможность функционирования при комнатной температуре, малые питающие напряжения. Основным недостатком, ограничивающим на данный момент их практическое применение, является низкая выходная мощность генерируемых колебаний. В связи с этим чрезвычайно актуальной является задача о сложении мощностей и взаимной синхронизации многих спинтронных осцилляторов. К настоящему моменту проведен ряд успешных экспериментов по взаимной синхронизации ГГц осцилляторов, построенных на основе ферромагнитных материалов, показавших принципиальную возможность реализации взаимной синхронизации и сложения мощностей. Однако для реальных приложений необходимо реализовать структуру, состоящую из большого числа осцилляторов. Теоретических работ, позволяющих подойти к решению задачи взаимной синхронизации антиферромагнитных осцилляторов, работающих в ТГц диапазоне частот, в современной литературе по спинтронике не существует.

Постановка цели диссертации и основных задач

Целью диссертационной работы Сафина А.Р. была разработка теории, позволяющей исследовать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах спинтроники, содержащих антиферро- и ферримагнетики: осцилляторах и детекторах терагерцевых сигналов, характеристиками которых можно управлять посредством внешних воздействий (магнитных и электрических полей, спин-поляризованного тока,

температуры), а также разработка сетевого подхода при объединении базовых элементов в большие ансамбли, позволяющего решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений. Высока вероятность, что теоретические результаты, полученные в работе Сафина А.Р., позволят на практике разработать различные устройства терагерцевой электроники: генераторы, детекторы, преобразователи и нелинейные смесители, синтезаторы, спектроанализаторы, квантовые вычислители и нейропроцессоры.

Для достижения цели работы в диссертационной работе решались следующие основные задачи:

1. Построение теории перестраиваемого током спинтронного осциллятора, выполненного на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследование динамических режимов работы единичного осциллятора, определение диапазона перестройки резонансной частоты колебаний и изменения критического тока возбуждения автоколебаний;
2. Построение теории перестраиваемого током спинтронного, регенеративного детектора на основе гетероструктуры «магнетик-тяжелый металл-магнетик». Верификация полученной модели с результатами экспериментальных данных;
3. Анализ различных методов перестройки частоты и изменения критического тока самовозбуждения осциллятора и детектора, выполненных на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл»;
4. Построение теории внешней и взаимной синхронизации АФМ осцилляторов и устройств на их основе: синтезаторов, спектроанализаторов, нейропроцессоров и квантовых вычислителей;
5. Разработка сетевого подхода к анализу и синтезу сетей взаимосвязанных спинтронных осцилляторов, позволяющих решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений.

Решение приведенных выше задач Сафиным А.Р. весьма актуально и представляет как фундаментальный теоретический, так и прикладной интерес, и в перспективе даст возможность реализовать устройства формирования, приема и обработки сигналов ТГц диапазона частот на основе антиферромагнитных наноструктур.

Структура диссертационной работе

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 обзор литературы, сформулированы цель и задачи диссертации. Во второй главе представлен вывод и сделан анализ математической модели для перестраиваемого спин-поляризованным током спинтронного осциллятора, состоящего из наноразмерных слоев магнетика и тяжелого металла, находящегося во внешнем магнитном поле. В третьей главе построена теория регенеративного спинтронного детектора, состоящего из наноразмерных слоев магнетика и тяжелого металла. 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. В пятой главе развита теория суб-ТГц спинтронного эмиттера электромагнитного излучения, построенного на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». В шестой главе построена теория внешней и взаимной синхронизации спинтронных осцилляторов. В седьмой главе исследована взаимная синхронизация двух связанных спинтронных осцилляторов. Получена 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. Исследованы нейроморфные вычислители на основе спинтронных осцилляторов.

Достоверность и научная новизна диссертационной работы

Достоверность основных выводов диссертационной работы подтверждается соответствием полученных теоретических результатов и экспериментальных данных, опубликованных в соответствующей литературе. Материалы теоретических исследований подтверждены убедительными результатами обработки экспериментальных данных, публикациями и докладами на научных конференциях.

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.

Полученные автором научные результаты являются новыми, убедительными и соответствуют современным представлениям о практическом применении спинтроники для создания устройств ГГц и ТГц электроники.

Рассмотрение материалов диссертации позволяет сделать вывод об обоснованности новизны, научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Практическая значимость выводов и рекомендаций диссертационной работы

Результаты, полученные в диссертационной работе А.Р. Сафина, могут быть использованы при разработке и создании элементов функциональной электроники ГГц и ТГц диапазонов частот. Практическая значимость работы заключается в том, что в ней:

- 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.

Научные положения выносимые на защиту

1. Автоколебания в спинтронном осцилляторе, выполненном на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» сопровождаются возникновением гомоклинической траектории, образованной слиянием сепаратрис седел. В результате этого проявляется гистерезисный эффект между положением равновесия и автоколебательным режимом. Для уменьшения этого эффекта необходимо уменьшать эффективное поле анизотропии в легкой плоскости или увеличивать обменное поле между магнитными подрешетками.

2. Зависимость выпрямленного напряжения за счет обратного спинового эффекта Холла от частоты внешней электромагнитной волны или спин-поляризованного тока для гетероструктуры «тяжелый металл-антиферромагнетик-тяжелый металл» носит резонансный характер.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

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, 4 патента на изобретение. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и различных конференциях, а также вошли в материалы научно-исследовательских работ по многочисленным грантам.

Среди наиболее значимых работ можно отметить следующие:

- [1] **Safin A.R.**, Nikitov S.A., Kirilyuk A.I., Tyberkevych V.S., Slavin A.N. Theory of Antiferromagnet-Based Detector of Terahertz Frequency Signals // *Magnetochemistry*. – 2022. - Vol. 8 (2). No. 26. - P. 1-11.
- [2] **Safin A.**, Puliafito V., Carpentieri M., Finocchio G., Nikitov S., Stremoukhov P., Kirilyuk A., Tyberkevych V., and Slavin A. Electrically tunable detector of THz-frequency signals based on an antiferromagnet // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 117. – P. 222411.
- [3] Popov P.A., **Safin A.R.**, Kirilyuk A., Nikitov S.A., Lisenkov I., Tyberkevich V., and Slavin A. Voltage-Controlled Anisotropy and Current-Induced Magnetization Dynamics in

Antiferromagnetic-Piezoelectric Layered Heterostructures // Physical Review Applied. – 2020. – Vol. 13. – No. 044080.

[4] **Safin A.R.**, Udalov N.N., Kapranov M.V. Mutual phase locking of very nonidentical spin-torque nanooscillators via spin-wave interaction // European Physics Journal – Applied Physics – 2014. – Vol. 67. – P. 20601.

[5] Никитов С.А., **Сафин А.Р.**, Калябин Д.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Логунов М.В., Морозова М.А., Одинцов С.А., Осокин С.А., Шараевская А.Ю., Шараевский Ю.П., Кирилук А.И. Диэлектрическая магноника – от гигагерцев к терагерцам // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1009-1040.

[6] **Сафин А.Р.**, Никитов С.А., Кирилук А.И., Калябин Д.В., Садовников А.В., Стремоухов П.А., Логунов М.В., Попов П.А. Возбуждение терагерцевых магнонов в антиферромагнитных наноструктурах: теория и эксперимент // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 158, Вып.1. – С. 85-99.

[7] **Сафин А.Р.**, Попов П.А., Калябин Д.В., Никитов С.А. Синтезатор дискретной сетки частот на основе антиферромагнитного спинтронного осциллятора // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, Вып. 20. – С. 23-26.

[8] **Сафин А.Р.**, Логунов М.В., Никитов С.А. Возбуждение нелинейных спиновых колебаний в антиферромагнетике под действием терагерцевых импульсов накачки // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т.44, Вып. 24. – С. 103-111.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата в полной мере отражает основные результаты диссертационной работы. Диссертация написана хорошим научным языком и аккуратно оформлена.

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.

По тексту диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. Отсутствует анализ фазовых и амплитудных флуктуаций при внешней и взаимной синхронизации антиферромагнитных спинтронных осцилляторов.

2. Не приведен вывод выражений для мод колебаний взаимосвязанных неидентичных спинтронных осцилляторов.

3. В пятой главе отсутствует теоретический анализ возбуждения нелинейных колебаний намагниченности в антиферромагнетике под действием ТГц импульсов накачки. Приведены только результаты численного моделирования нелинейных уравнений.

Перечисленные недостатки не изменяют общего положительного впечатления от диссертационной работы. Диссертация Сафина А.Р. представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, в которой решена важная задача построения теории, позволяющей описывать нелинейные динамические процессы в автоколебательных структурах антиферромагнитной спинтроники. В работе получен ряд новых важных теоретических и практических результатов. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Заключение

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».

Официальный оппонент:

Самардак Александр Сергеевич,

доктор физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе, профессор Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

«10» мая 2023 г.

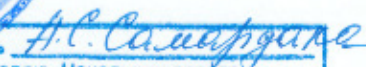

 / А.С. Самардак /

Подпись официального оппонента Самардака Александра Сергеевича ЗАВЕРЯЮ:

«10» мая 2023 г.



М.П.


удостоверяю. Начальник отдела
кадрового делопроизводства
ДФОУ 
"10" мая 2023 г.