

На правах рукописи



САФИН Ансар Ризаевич

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ
АНТИФЕРРОМАГНИТНОЙ СПИНТРОНИКИ**

Специальность **1.3.12** –
«Физика магнитных явлений»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва–2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Научный консультант: **НИКИТОВ Сергей Аполлонович**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН

**Официальные
оппоненты:** **УСТИНОВ Владимир Васильевич**
доктор физико-математических наук, академик РАН,
научный руководитель Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской
академии наук, Екатеринбург

ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ Владимир Леонидович
доктор физико-математических наук, главный научный
сотрудник Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института общей физики им. А.М.
Прохорова Российской академии наук, Москва

САМАРДАК Александр Сергеевич
доктор физико-математических наук, проректор по науке
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Защита состоится «16» июня 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 (Д 002.231.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Safin/index.html>

Автореферат разослан “ ” _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.111.01 (Д002.231.01)
доктор физико-математических наук, доцент



Кузнецова
Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Активные исследования в области антиферромагнитных материалов и структур на их основе, особенно с размерами в единицы и сотни нанометров, в последние годы позволили получить научные результаты, которые легли в основу нового научного направления – антиферромагнитной (АФМ) спинтроники¹. В ней исследуются процессы переноса и преобразования магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих АФМ. Перенос спина может также осуществляться с помощью возбуждения квантов спиновых волн – магнонов как в металлических, так и в диэлектрических АФМ². Это привело к возникновению нового направления спинтроники – АФМ-магноники, изучающей физические свойства распространяющихся спиновых волн, а также возможность применения спиновых волн для построения элементной базы функциональных узлов приборов генерации, приема и обработки сигналов миллиметровых и субмиллиметровых длин волн³. Об актуальности работ в области спинтроники свидетельствует присуждение Нобелевской премии по физике А. Ферту и П. Грюнбергу в 2007 году за открытие эффекта гигантского магнитосопротивления, приведшее к бурному росту плотности магнитной записи в конце 20 века.

За последние годы число публикаций в области АФМ-спинтроники и магноники заметно выросло (см. напр. обзор в [A1]). Это связано с высоким научным интересом и развитием технологий, позволяющих создавать материалы и структуры для

¹ V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi et al. Antiferromagnetic spintronics // Rev. Mod. Phys. 2018. Vol.90. No.015005; T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley et al. Antiferromagnetic spintronics // Nat. Nano. 2016. Vol.11. No.231; M. Jungfleisch, W. Zhang, and A. Hoffmann. Perspectives of antiferromagnetic spintronics // Phys. Lett. A. 2018. Vol.382, 865.

² S. M. Rezende, A. Azevedo, and R. L. Rodriguez-Suarez. Introduction to antiferromagnetic magnons // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 126. No. 151101.

³ С. А. Никитов, Д. В. Калябин, И. В. Лисенков и др. Магноника — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // УФН. 2015. Вып. 185. С. 1099-1128; С. А. Никитов, А. Р. Сафин, Д. В. Калябин и др. Диэлектрическая магноника — от гигагерцев к терагерцам // УФН. 2020. Вып. 190 С. 1009–1040.

исследования новых физических явлений и создания новой компонентной базы функциональной электроники на основе АФМ.

Несмотря на то, что к настоящему времени основными активными элементами спинтроники являются ферромагнитные (ФМ) материалы (например, железиттриевый гранат), с прикладной точки зрения антиферромагнетики, слабые ферромагнетики и ферримагнетики имеют преимущества перед ФМ. В частности, 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. Частоты АФМ-колебаний на порядки превышают частоты ФМ, что дает возможность создавать сверхбыстрые (с частотами в сотни и тысячи ГГц) устройства функциональной электроники⁴. Полупроводниковые АФМ встречаются гораздо чаще, чем ФМ, что позволяет сочетать преимущества как спинтроники (малое энергопотребление, высокие частоты), так и полупроводниковой электроники (простоту технологической реализации, легкую управляемость и т. д.).

Важным свойством АФМ является то, что в них наблюдается обменное усиление их динамических параметров. Это приводит к большим значениям скорости движения доменных стенок, скирмионов (десятки и сотни километров в секунду)⁵ и большим значениям резонансных частот антиферромагнетиков. Отметим «немагнитные» свойства некоторых АФМ⁶. Например, борат железа прозрачен в оптическом диапазоне и в нем проявляется сильный эффект Фарадея, а гематит обладает сильной магнитоупругой связью. Совокупность этих свойств АФМ обуславливает широкие

⁴ **Б.А. Иванов.** Спиновая динамика антиферромагнетиков и сверхбыстрая спинтроника // ЖЭТФ. 2020. Т. 158, вып. 1 (7). С. 103–123.

⁵ **В.И. Ожогин, В.Л. Преображенский.** Ангармонизм смешанных мод и гигантская акустическая нелинейность антиферромагнетиков // Успехи физических наук. 1988. Т. 155. Вып. 4. С. 593-621; **З.В. Гареева, С.М. Чен.** Сверхбыстрая динамика доменных границ в антиферромагнетиках и ферримагнетиках с температурами компенсации магнитного и углового моментов (Миниобзор) // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 114. Вып. 4. С. 250 – 262.

⁶ **Е.А. Туров, А.В. Колчанов, В.В. Меньшенин, И.Ф. Мирсаев, В.В. Николаев.** Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. – М.: Физматлит, 2001. – 560 с.

возможности их практического применения для создания электронной компонентной базы на новых физических принципах.

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. Для АФМ присущи⁷ явления переноса спина, спиновой накачки, анизотропного магнитосопротивления, так же как и для ФМ-структур. Однако, в отличие от ФМ, перечисленные выше эффекты за счет «обменного усиления» могут наблюдаться в АФМ **без применения внешних постоянных магнитных полей**. А поскольку резонансные частоты АФМ лежат в терагерцевом диапазоне, на их основе можно реализовать сверхбыструю память, управляемую как оптически, так и электронно (током), а также устройства генерации, приема и обработки сигналов. Экспериментальные работы в этой области тормозятся сложностью методов измерения магнитных возбуждений на частотах в сотни гигагерц и единицы терагерц и дороговизной соответствующего измерительного оборудования. 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.

Вклад в развитие теории и приложений АФМ внесли в разные годы следующие исследователи по всему миру (по алфавиту): Барьяхтар В.Г., Боровик-Романов А.С., Гомонай Е.В., Гуревич А.Г., Еременко В.В., Звездин А.К., Иванов Б.А., Кампфратх Т., Кимель А., Кирилюк А.И., Кляуи М., Крейнес Н.М., Локтев В.М., Львов В.А., Мухин А.А., Неель Л., Ожогин В.И., Писарев Р.В., Преображенский В.Л., Прозорова Л.А., Резенде С., Рудашевский Е.Г., Синова Дж., Туров Е.А., Файбег М., Фетисов Ю.К.,

⁷ Е.В. Гомонай, В.М. Локтев. Спинтроника антиферромагнитных систем // Физика низких температур. 2014. Т. 40. № 1. С. 22-47.

Церковняк Я., Шавров В.Г. и многие другие. 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. Поэтому важным является создание теоретических основ базовых элементов АФМ-спинтроники, а именно управляемых по частоте осцилляторов и детекторов.

Был предложен ряд конструкций осцилляторов⁸ и детекторов⁹ терагерцевых колебаний, построенных на основе АФМ и слоев тяжелых металлов (ТМ), таких как Pt, Ta, W, в которых за счет сильного спин-орбитального взаимодействия происходит поляризация электронов по спину (спиновый эффект Холла). При протекании через слой ТМ тока высокой плотности в АФМ за счет эффекта переноса спина возникает вращающий магнитный момент, компенсирующий затухание АФМ и приводящий к вращению вектора Нееля в легкой плоскости. За счет обратного спинового эффекта Холла может быть произведен съем электрического напряжения со слоя ТМ, то есть реализован осциллятор, перестраиваемый по частоте током. Недостатками предложенного варианта осциллятора являются высокая плотность тока, необходимая для самовозбуждения системы, порядка 10^8 - 10^9 А/см² и малая выходная мощность единичного АФМ осциллятора (порядка нановатт). Может быть реализован и обратный механизм¹⁰, то есть создавая резонанс в АФМ внешним источником, можно осуществить резонансный прием терагерцевых (ТГц) сигналов. В литературе не обсуждались вопросы перестройки частоты колебаний таких осцилляторов и детекторов, а также условия, необходимые для реализации резонансного приема ТГц сигналов. На основе предложенных схем АФМ осцилляторов и детекторов ТГц

⁸ R. Cheng, D. Xiao, A. Brataas. Terahertz antiferromagnetic spin Hall nano-oscillator // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. No. 207603; R. Khymyn, I. Lisenkov, V. Tiberkevich, et al. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like oscillator driven by spin current // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. No. 43705.

⁹ O. Gomonay, T. Jungwirth, J. Sinova. Narrow-band tunable terahertz detector in antiferromagnets via staggered-field and antidamping torques // Phys. Rev. B. 2018. Vol. 98. No. 104430.

¹⁰ R. Khymyn, V. Tiberkevich, A. Slavin. Antiferromagnetic spin current rectifier // AIP Adv. 2017. Vol. 7. No. 055931.

колебаний были предложены концепции устройств нейроморфной обработки сигналов¹¹, а также спектрального анализа¹². Вместе с тем, для практической реализации различных устройств ТГц электроники на основе АФМ необходимо разработать методы исследования как парциальных АФМ структур, так и их сетей, а также исследовать возможности управления их параметрами. Необходимость исследования сетей связанных осцилляторов обусловлена низкой выходной мощностью парциальных осцилляторов. В настоящее время экспериментально исследуются сети более чем из шестидесяти ФМ осцилляторов как для задачи сложения мощностей и взаимной синхронизации, так и для задачи нейроморфных вычислений¹³. Существенной проблемой при исследовании ансамблей осцилляторов является проблема многомодовости, обусловленная связью осцилляторов в ансамбле и мешающая эффективной синхронизации сетей осцилляторов. В настоящее время решение этой проблемы не было найдено. Таким образом, исследование нелинейных динамических явлений в базовых структурах АФМ спинтроники является проблемой, решение которой чрезвычайно важно как с точки зрения понимания физики АФМ наноструктур, так и с точки зрения создания устройств функциональной электроники на ТГц частотах.

Целью работы является 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

¹¹ O. Sulymenko, O. Prokopenko, I. Lisenkov, et al. Ultra-fast logic devices using artificial “neurons” based on antiferromagnetic pulse generators // Journal of applied physics. 2018. Vol. 124. No. 152115.

¹² P. Artemchuk, O. Sulymenko, S. Louis, et al. Terahertz frequency spectrum analysis with a nanoscale antiferromagnetic tunnel junction // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127. No. 063905.

¹³ M. Zahedinejad, A. Awad, S. Muralidhar, et al. Two-dimensional mutually synchronized spin Hall nano-oscillator arrays for neuromorphic computing // Nature Nanotechnology. 2020. Vol. 15. P. 47-52.

задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений. В перспективе теоретические результаты, полученные в диссертационной работе, позволят на практике разработать различные устройства терагерцевой электроники: генераторы, детекторы, преобразователи и нелинейные смесители, синтезаторы, спектроанализаторы, квантовые вычислители и нейропроцессоры.

Для достижения сформулированной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Построить теорию перестраиваемого током 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 перестраиваемого током спинтронного, регенеративного **детектора** на основе гетероструктуры «магнетик-тяжелый металл-магнетик». Получить математическую модель в виде линеаризованных уравнений для динамической компоненты вектора Нееля магнетика, а также нелинейную модель, учитывающую нелинейный сдвиг частоты и нелинейное затухание. 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». Рассмотреть возможность управления параметрами АФМ наноустройств спинтроники с помощью внешнего магнитного поля, электрического тока, магнитострикции, температуры.

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

нейропроцессоров и квантовых вычислителей. Получить методом медленно-меняющихся амплитуд детерминированные и флуктуационные модели исследуемых структур. Провести анализ влияния инерционных слагаемых на синхронизацию спинтронных осцилляторов.

5. Разработать **сетевой подход** к анализу и синтезу сетей взаимосвязанных спинтронных осцилляторов, позволяющих решать задачи взаимной синхронизации, устранения многомодовости, нейроморфных вычислений. Рассмотреть, в качестве примеров, различные топологии объединения в ансамбли: линейка, кольцо, решетка, дерево, иерархическая и случайная сеть.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

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

2. Найдены условия безгистерезисной генерации автоколебаний намагниченности при возбуждении гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл» 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 ГГц и ТГц колебаний на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследована структура детектора в виде гребенчатой структуры АФМ, позволившей увеличить уровень выпрямленного выходного напряжения.

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. Исследовано влияние снижения порогового тока рождения автоколебаний на амплитуду терагерцевого сигнала, генерируемого в автоколебательном режиме.

5. 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.

6. 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.

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

Научная и практическая ценность работы

1. Предложена и обоснована методика расчета, способы оптимизации параметров и перестройки спинтронных осцилляторов, детекторов, эмиттеров и устройств ГГц и ТГц частотных диапазонов на их основе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке функциональных устройств формирования, приема и обработки сигналов диапазона ГГц и ТГц.

2. Продемонстрирована возможность разработки нового класса процессоров для задач нейросетевой обработки информации на основе массивов

перестраиваемых по частоте спин-поляризованным током антиферромагнитных наноосцилляторов.

3. 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. Проведенные исследования позволили сформулировать критерии уменьшения паразитных эффектов путем уменьшения эффективной анизотропии магнетика внешним воздействием: магнитострикцией, постоянным магнитным полем, температурой.

Результаты диссертации используются в учебном процессе на радиотехническом факультете Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова НИУ «МЭИ» в рамках следующих учебных курсов: «Устройства генерирования и формирования сигналов», «Электроника», «Теория колебаний», «Регулярная и хаотическая динамика нелинейных систем».

Таким образом, данная диссертационная работа представляет собой многолетнее исследование, расширяющее и углубляющее научные представления на стыке радиофизики, физики нелинейных процессов и спинтроники. Полученные в диссертации новые научные результаты в совокупности можно охарактеризовать как важное научное достижение, которое может привести к реализации в ближайшем будущем миниатюрных устройств функциональной электроники ТГц диапазона частот, работающих при комнатных температурах.

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 чего проявляется гистерезисный эффект между положением

равновесия и автоколебательным режимом. Для уменьшения области гистерезисной генерации необходимо уменьшать эффективное поле анизотропии в легкой плоскости, или выбирать антиферромагнетики с большим обменным полем между магнитными подрешетками.

2. 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.

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. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

Методы исследования и достоверность полученных результатов

Основные теоретические результаты по исследованию элементов спинтроники были получены автором с использованием аналитических и численных методов решения дифференциальных уравнений, а также методов теории колебаний и волн. Численные расчеты массивов связанных спинтронных осцилляторов проводились с использованием метода Рунге-Кутты 4-5 порядков с адаптивным выбором шага. Выводы аналитических исследований были проверены и развиты при помощи численного моделирования, выполненного на высокопроизводительных вычислительных комплексах. Результаты работы по детектированию ТГц колебаний за счет обратного спинового эффекта Холла были экспериментально проверены в лаборатории сильных магнитных полей

Университета Неймеген (Нидерланды). Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных методов компьютерного моделирования, сравнением с полученными аналитическими результатами и сопоставлением с экспериментами.

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 была проведена автором диссертации. Ряд статей автора написан в соавторстве со студентами и аспирантами, работавшими под его научным руководством. Обсуждение научных результатов проводилось совместно с академиком РАН, профессором Никитовым С.А., профессорами Славиным А.Н., Звездиным А.К., Ивановым Б.А., Удаловым Н.Н., Капрановым М.В., Тиберкевичем В.С., Устиновым А.Б.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах: Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Саратовского государственного университета им. С.Г. Чернышевского, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, Национального исследовательского университета «МЭИ».

Основные положения и результаты диссертации были представлены на 50 международных конференциях и симпозиумах, среди которых: Международная конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов) в 2011, 2019-2021 годах; Всероссийская конференция «Физика и распространение микроволн» (г. Москва) в 2011, 2017, 2018, 2019, 2022

годах; Международный симпозиум по магнетизму (г. Москва) в 2011, 2014, 2017 годах; Международная конференция по магнетизму «International conference on magnetism» (США, г. Вашингтон) в 2019 году; Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва) ежегодно в 2012-2021 годах; Средиземноморская конференция по встраиваемым системам (Бар, Черногория) в 2012 году; Научная школа «Нелинейные волны» (г. Нижний Новгород) с 2016 по 2020 года; Международная конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (г. Саратов) в 2009, 2013, 2016 годах; Международный симпозиум «Спиновые волны» (г. Санкт-Петербург) в 2018 году; Международная конференция «Frontiers in nonlinear physics» (г. Нижний Новгород) в 2019 году; Международный семинар «Antiferromagnetic spintronics» (г. Майнц, Германия) в 2019 году; Международная конференция по метаматериалам и нанофотонике «Метанано» (г. Санкт-Петербург) в 2019 году; Российский форум «Микроэлектроника» в г. Ялта в 2019-2021 годах, в г. Сочи в 2022 году; Школа молодых ученых «Микроэлектроника» в г. Гурзуф в 2021, 2022 годах.

Результаты диссертационной работы вошли в материалы научно-исследовательской работы по грантам ФЦП: № 14.В.37.21.1211 “Наноэлектронные системы передачи, приема и обработки информации на основе устройств спинтроники и метаматериалов”, №14.132.21.1665 “Разработка микроволнового генератора на основе взаимодействующих спин-трансферных наноосцилляторов”, Российского фонда фундаментальных исследований (договоры №13-08-01278-13, № 19-29-03015, 18-57-76001, 18-37-20048, 18-29-27020, 18-29-27018), гранта Президента для молодых ученых и аспирантов (проект № СП-665.2012.3), гранта Президента для молодых кандидатов наук (проекты № МК-283.2019.8), Российского научного фонда (проекты № 21-79-10396, 23-79-30027, 19-19-00607,

15-19-10036), НИР № 8.3991.2011, а также используются в учебном процессе НИУ «МЭИ» и НИУ ВШЭ.

Соответствие направления диссертационного исследования специальности

В диссертационной работе исследуются нелинейные динамические явления в автоколебательных структурах спинтроники, содержащих антиферро- и ферримагнетики: осцилляторах и детекторах терагерцевых сигналов, характеристиками которых можно управлять посредством внешних воздействий, что соответствует формулам специальности и п.5. Моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в композитных структурах на их основе, п.6. Разработка новых физических принципов использования материалов с различными видами магнитного упорядочения, а также с композитными структурами на их основе раздела «направления исследования» паспорта специальности по шифру 1.3.12. – «Физика магнитных явлений».

Публикации

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.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 207 наименований. Общий объем диссертации составляет 400 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность выбранной темы, в общем виде формулируется цель работы, а также проблемы, задачи и положения, выносимые на защиту, раскрывается структура и содержание диссертации по главам.

В первой главе проводится обзор известных из литературы 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 первой главы были выявлены неисследованные в литературе проблемы для автоколебательных структур спинтроники, содержащих антиферро- и ферромагнетики. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе проводится вывод и анализ математической модели для перестраиваемого спин-поляризованным током спинтронного осциллятора (СО), состоящего из наноразмерных слоев магнетика и тяжелого металла, находящегося во внешнем магнитном поле (рис.1), на основе нелинейного дифференциального уравнения для вектора Нееля, которое принято в литературе называть «сигма-моделью»¹⁴. Рассмотрены различные магнитные материалы: антиферро-, ферри- и слабые ферромагнетики. Универсальной математической моделью, описывающей три вышеуказанных случая, является дифференциальное уравнение вида (записанное в макроскопическом приближении)

¹⁴ **В.И. Ожогин, В.Л. Преображенский.** Эффективный энгармонизм упругой подсистемы антиферромагнетиков // ЖЭТФ. 1977. Т.73. № 3. С.988-1000; **А.К. Звездин.** О динамике доменных границ в слабых ферромагнетиках // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. Вып.10. С. 605-610; **И.В. Барьяхтар, Б.А. Иванов.** О нелинейных волнах намагниченности антиферромагнетика // Физика низких температур. 1979. Т.5. Вып.7. С.759-770; **А.Ф. Андреев, В.И. Марченко.** Симметрия и макроскопическая динамика магнетиков // Успехи физических наук. 1980.Т.130. №1. С. 39-63.

$$\mathbf{l} \times \left[\frac{d^2 \mathbf{l}}{dt^2} + \gamma_{\text{eff}} \frac{d\mathbf{l}}{dt} - 2\gamma \left[\frac{d\mathbf{l}}{dt} \times \mathbf{H}_0 \right] + \frac{\partial W_{\text{AFM}}}{\partial \mathbf{l}} + \tau [\mathbf{p} \times \mathbf{l}] \right] = -\bar{\nu} \frac{d\mathbf{l}}{dt}, \quad (1)$$

где $\mathbf{l}(t)$ - вектор Нееля магнетика, γ_{eff} - эффективное затухание, состоящее из Гильбертова затухания и вклада, определяемого спиновой накачкой, \mathbf{H}_0 - постоянное внешнее магнитное поле, γ - гиромагнитное отношение, τ -

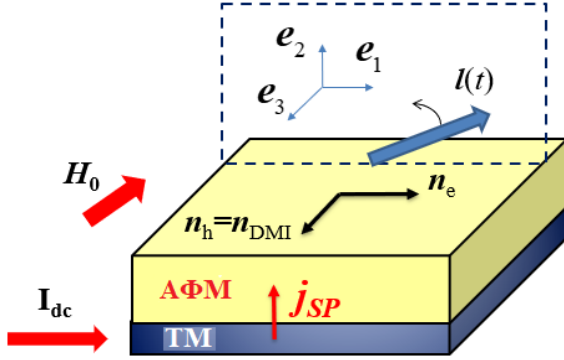


Рис.1. Модельная схема спинтронного осциллятора на основе гетероструктуры АФМ-ТМ: \mathbf{H}_0 - вектор напряженности внешнего магнитного поля, $\mathbf{l}(t)$ - вектор Нееля, I_{dc} - постоянный электрический ток, \mathbf{j}_{sp} - вектор спиновой накачки, $\mathbf{n}_e, \mathbf{n}_h$ - единичные вектора легкой и трудной осей намагничивания, \mathbf{n}_{DMI} - единичный орт Дзялошинского-Мория.

коэффициент спиновой поляризации, \mathbf{p} - единичный вектор спиновой поляризации, $\bar{\nu}$ - параметр нескомпенсированности ферромагнетика (для АФМ $\bar{\nu} = 0$) и W_{AFM} - функция энергии АФМ, включающая энергию анизотропии, влияние внешнего магнитного поля, размагничивания и эффекта Дзялошинского-Мория (для слабых ФМ).

Проведено исследование уравнения (1) для различных направлений ориентации вектора \mathbf{p} относительно осей анизотропии магнетика. В частности, асимптотическим методом найдена плотность тока рождения автоколебаний и исследован гистерезисный эффект при переходе из режима затухающих колебаний в режим автоколебаний. Найдено условие отсутствия гистерезиса при автоколебаниях, которое в частном случае двуосного АФМ типа «легкая плоскость» выглядит следующим образом:

$$H_{\text{EA}} \approx 1.58 \cdot (\alpha_{\text{eff}})^2 H_{\text{ex}}, \quad (2)$$

где H_{EA} - эффективное поле анизотропии в базисной плоскости, α_{eff} - эффективная константа затухания, H_{ex} - обменное поле между подрешетками. Применительно к оксиду никеля значение $H_{EA} \approx 0.0184$ Т, что заметно меньше поля анизотропии в легкой плоскости $H_{EA} \approx 0.0625$ Т. Таким образом, для уменьшения области гистерезиса необходимо уменьшать эффективную константу затухания.

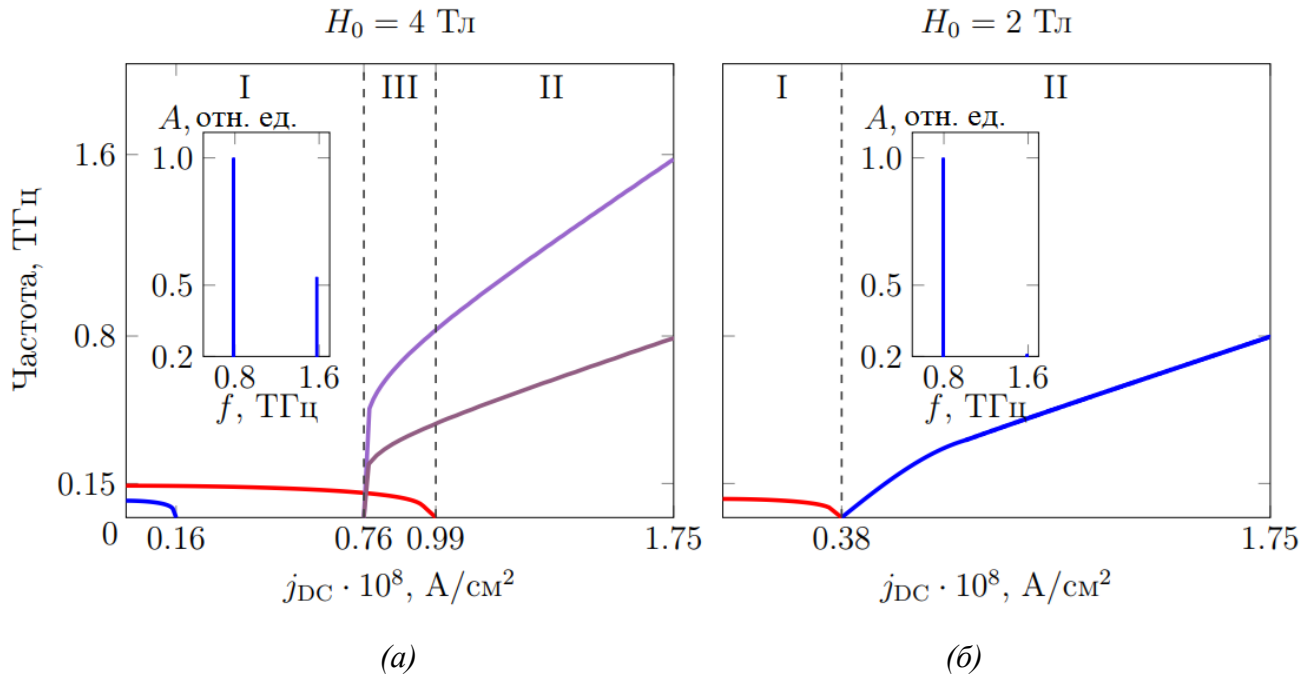


Рис.2. Зависимость частоты колебаний антиферромагнитного осциллятора от плотности тока в случае слабого ферромагнетика типа «легкая плоскость» - гематита и Фурье-спектр колебаний при $j_{DC} = 1.75 \cdot 10^8$ А/см² (а) в двухмодовом $H_0=4$ Тл и (б) в одномодовом $H_0=2$ Тл режимах.

Качественными методами теории колебаний проведен анализ нелинейной динамики модели антиферромагнитного осциллятора со слабым ферромагнетизмом в магнитном поле, лежащем в легкой плоскости. Показано, что возникновение автоколебаний в осцилляторе сопровождается возникновением гомоклинической траектории, образованной слиянием сепаратрис седел. Наличие внешнего постоянного магнитного поля приводит к снятию вырождения с резонансных частот АФМ осциллятора со слабым ферромагнетизмом в

докритической области и наличие двух устойчивых состояний равновесия и скачкам режима, а автоколебательный режим характеризуется двухмодовой генерацией (рис.2а). Количественно найдены условия безгистерезисной одномодовой генерации автоколебаний при варьировании величины внешнего магнитного поля (рис.2б).

В третьей главе построена теория регенеративного спинтронного детектора, состоящего из наноразмерного слоя магнетика и слоя тяжелого металла (рис.3а). Проведен анализ выпрямления ГГц и ТГц колебаний для одноосного АФМ типа «легкая ось» (ЛО), двуосного АФМ типа «легкая плоскость», слабого ферромагнетика с сильным эффектом Дзялошинского-Мория (ДМ) и ферримагнетиков вблизи точки компенсации углового момента. Показано, что для рассмотренных структур характер зависимости выпрямленного напряжения $V_{\text{OUT}}(\omega)$ от частоты носит резонансный (рис.2б) и квадратичный характер вида:

$$V_{\text{OUT}}(\omega) = \frac{V_{\text{max}}^0 (\gamma_0)^2 \omega_{\text{AFMR}} \omega}{(\omega_{\text{AFMR}}^2 - \omega^2)^2 + (\gamma_0 \omega)^2}, \quad (3)$$

где V_{max}^0 - максимальное напряжение при резонансе $\omega = \omega_{\text{AFMR}}$, γ_0 - ширина спектральной линии резонансной кривой.

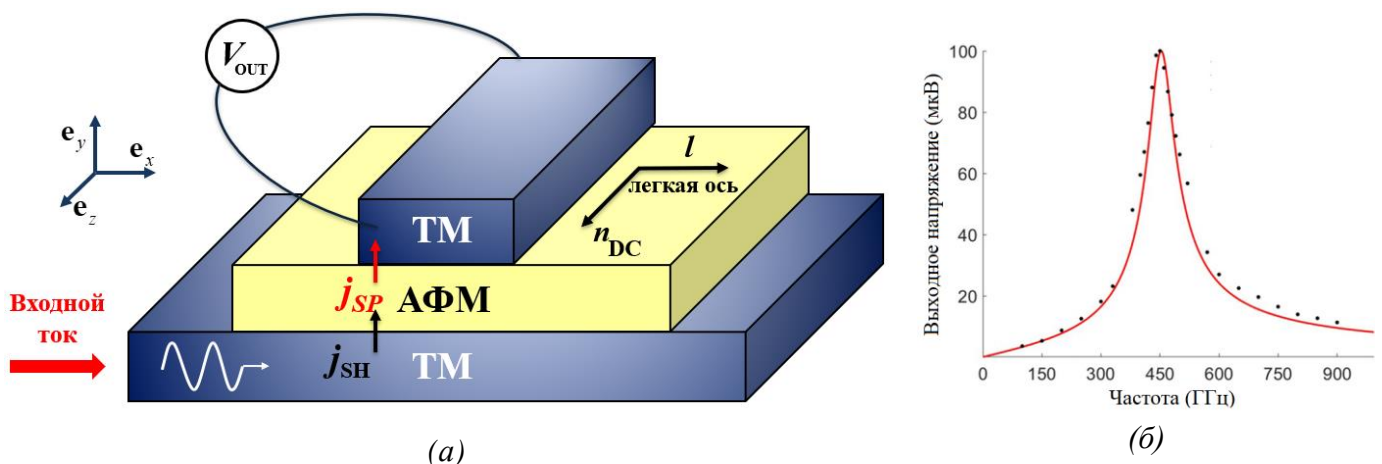


Рис.3. (а) Структура перестраиваемого током детектора ТГц колебаний, (б) зависимость выпрямленного детектором напряжения от частоты внешнего воздействия.

Для одноосного магнитного кристалла при возбуждении от линейно-поляризованного источника спинового тока или электромагнитного поля выпрямленное за счет спинового эффекта Холла напряжение равно нулю. Приложение внешнего постоянного магнитного поля снимает вырождение с нормальных частот колебаний магнетика, позволяя добиться ненулевого выпрямленного напряжения. При этом чувствительность детектора линейно зависит от внешнего постоянного поля и мощности входного сигнала. Для магнитного кристалла с двумя осями анизотропии вырождение нормальных частот снимается и при нулевом постоянном магнитном поле, что приводит к ненулевому выпрямленному напряжению. Проанализирован альтернативный способ выпрямления линейно поляризованных колебаний с помощью проводящих одноосных кристаллов с нарушенной пространственной и временной инверсиями. Показано, что выпрямление колебаний круговой и эллиптической поляризации возможно в нулевом внешнем магнитном поле как для одноосных, так и для двухосных магнетиков. Для увеличения чувствительности выпрямителя предложена структура в виде массива наноразмерных магнитных структур, соединенных общим слоем тяжелого металла.

Исследовано выпрямление микроволновых линейно-поляризованных электромагнитных волн за счет обратного спинового эффекта Холла с помощью АФМ со слабым ферромагнетизмом при помощи копланарной линии передачи (рис.4а) посредством анализа сигма-модели вида:

$$\mathbf{l} \times \left[\frac{d^2 \mathbf{l}}{dt^2} + \gamma_{\text{eff}} \frac{d\mathbf{l}}{dt} - 2\gamma \left[\frac{d\mathbf{l}}{dt} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} \right] + \frac{\partial W_{\text{AFM}}}{\partial \mathbf{l}} \right] = \left[\mathbf{l} \times \gamma \frac{d\mathbf{h}_{\text{AC}}}{dt} \right] \times \mathbf{l}, \quad (4)$$

$$W_{\text{AFM}}(\mathbf{l}, \mathbf{H}_0) = -\frac{\omega_{\text{ex}} \omega_{\text{EA}}}{2} (\mathbf{l} \cdot \mathbf{e}_{\text{EA}})^2 + \frac{\omega_{\text{ex}} \omega_{\text{HA}}}{2} (\mathbf{l} \cdot \mathbf{e}_{\text{HA}})^2 + \frac{\gamma^2}{2} (\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{l})^2 + \frac{\gamma^2}{2} H_{\text{DMI}}^2 (\mathbf{d} \cdot \mathbf{l})^2 + \gamma H_{\text{DMI}} \mathbf{l} \cdot [\mathbf{d} \times \mathbf{H}_0], \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_{\text{eff}}(\mathbf{l}) = \mathbf{H}_0 + H_{\text{DMI}}[\mathbf{d} \times \mathbf{l}]. \quad (6)$$

Здесь линейно поляризованное магнитное поле $\mathbf{h}_{\text{AC}}^{\text{LP}} = h_{\text{AC}} e^{i\omega t} \mathbf{e}_2$ возбуждает в образце спиновые колебания перпендикулярно направлению распространения волны (рис.4а), внешнее постоянное магнитное поле \mathbf{H}_0 и вектор Дзялошинского \mathbf{d} направлены в плоскости и перпендикулярно плоскости образца, соответственно. Анализ уравнения (4) показал, что наличие слабого ферромагнетизма даже при возбуждении электромагнитного поля линейной поляризации приводит к ненулевому выпрямленному напряжению несмотря на возбуждение только одной квазиферромагнитной моды (рис.4б). Однако, величина выпрямленного напряжения прямо пропорциональна величине внешнего постоянного магнитного поля и равна нулю при нулевом магнитном поле.

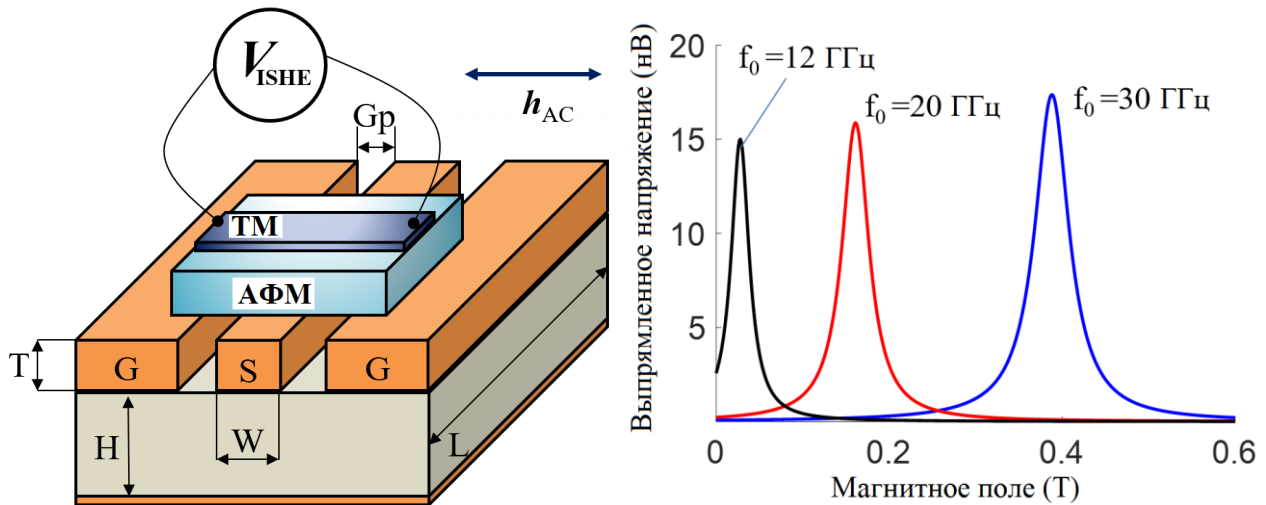


Рис.4. (а) Схема выпрямления микроволновых колебаний в слабом ферромагнетике с помощью копланарной линии передачи и (б) семейство резонансных зависимостей выпрямленного напряжения от величины внешнего магнитного поля при различных частотах возбуждения.

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» (рис.5а) для различных магнетиков со слабой и сильной магнитострикцией (для примера рассмотрены оксид никеля и гематит). Показано, что можно более чем в два раза уменьшить критический ток рождения автоколебаний осциллятора (рис.5б). Рассмотрены различные варианты подачи напряжения на слой пьезоэлектрика – поперечный (рис.5а) и продольный. Найдены условия, при которых в продольном случае возможно реализовать линейное изменение эффективной анизотропии путем изменения напряженности в слое пьезоэлектрика. Полученное уравнение динамики угла вращения вектора Нееля в базисной плоскости $\varphi(t)$ совпало с нелинейным маятниковым уравнением вида:

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \alpha_{\text{eff}} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\omega_e (1 - \beta \cdot E_{\text{PZ}})}{2} \sin 2\varphi = \tau_0, \quad (5)$$

которое было решено в автоколебательном режиме методом медленно меняющихся амплитуд. Здесь $\omega_{\text{ex}}, \omega_e$ - обменная частота и частота анизотропии АФМ в базисной плоскости соответственно, E_{PZ} - напряженность электрического поля в пьезоэлектрике, τ_0 - константа, характеризующая постоянный вращающий момент за счет спин-поляризованного тока. Константа преобразования β была рассчитана для различных АФМ в условиях выбранных параметров гетероструктуры (рис.5а), в частности, для оксида никеля она равна $1.64 \cdot 10^{-2} \text{ (кВ/см)}^{-1}$, тогда как для гематита $1.76 \text{ (кВ/см)}^{-1}$, что свидетельствует о возможности подбора материалов АФМ для реализации перестройки частоты за счет магнитострикции. Аналогичный анализ был проведен и для влияния температуры и внешнего магнитного поля на частоту АФМ.

Влияние температуры на частоту колебаний осциллятора проанализировано для ортоферрита гольмия вблизи температуры переориентационных фазовых переходов для температур от 30 до 50 К (рис.5в), а влияние внешнего магнитного

поля для одноосных АФМ типа «легкая ось» (рис.5г) и двуосных АФМ типа «легкая плоскость» и слабых ферромагнетиков. Показано, что понижение температуры уменьшает ширину гистерезиса при рождении автоколебаний. В то же время пороговая плотность тока автоколебаний также уменьшается. В автоколебательном режиме также возможно реализовать детектор, построенный на основе эффекта внешней синхронизации. В автоколебательном режиме добротность осциллятора составляет около 10^6 . Напротив, в режиме затухающих колебаний значение добротности составляет порядка 10.

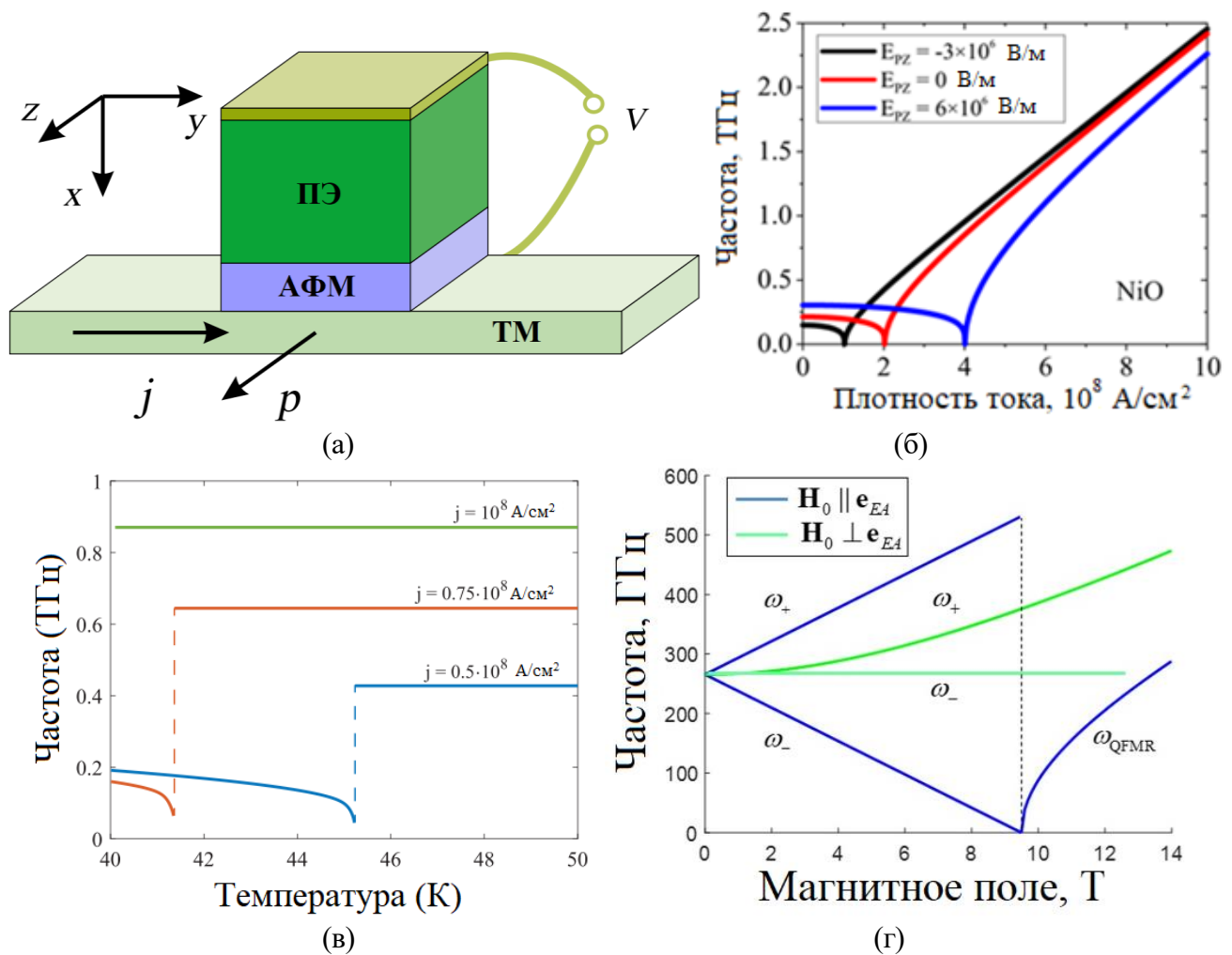


Рис.5. (а) Структура перестраиваемого напряжением V_{PZ} осциллятора ГГц колебаний на основе гетероструктуры ПЭ-АФМ-ТМ. (б,в,г) Зависимость частоты колебаний осциллятора от величины постоянного тока при различных значениях напряженности поля E_{PZ} в слое ПЭ, температуры и величины внешнего магнитного поля.

В пятой главе развита теория суб-ТГц спинтронного эмиттера электромагнитного излучения, построенного на основе гетероструктуры «антиферромагнетик-тяжелый металл». Исследована сигма-модель вида (1) для описания динамики АФМ под действием магнитного импульса накачки. Показано, что с ростом амплитуды импульса накачки величина отклика спиновой системы магнетика линейно растет на основной (резонансной) квазиантиферромагнитной моде и квадратично на второй гармонике.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования *нелинейного резонанса* в оксиде никеля **в сильном магнитном поле**. Детектирование колебаний осуществляется за счет обратного спинового эффекта Холла. Была рассмотрена двухслойная структура, состоящая из антиферромагнитного слоя NiO и слоя тяжелого металла (Pt), как показано на рис.ба.

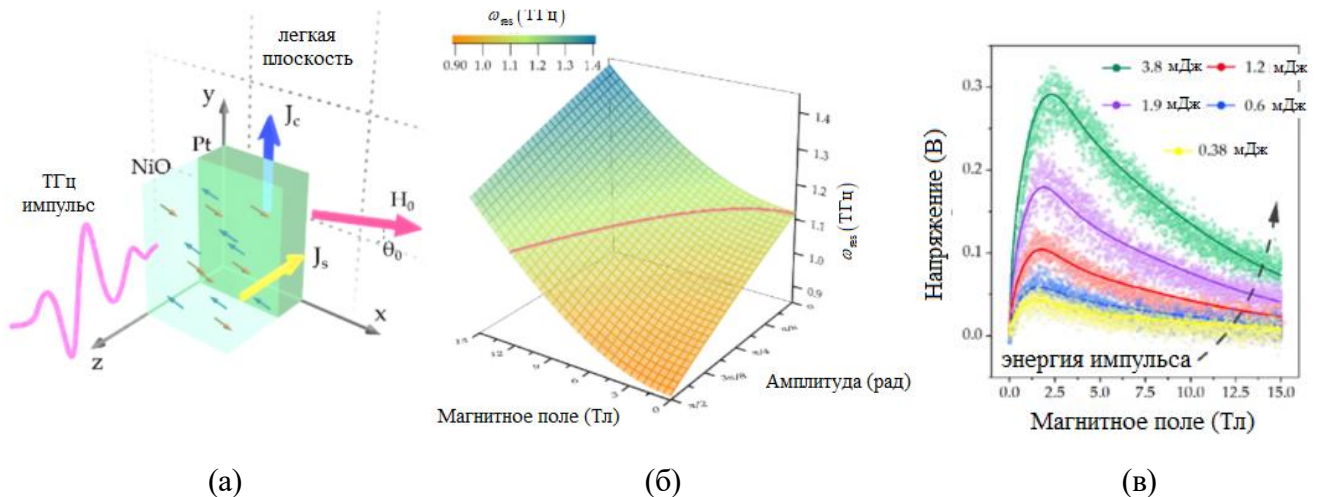


Рис.6. Возбуждение антиферромагнитного резонанса в NiO. (а) Геометрия эксперимента, здесь J_s - спиновый ток, J_c – зарядовый ток, H_0 – величина подмагничивающего поля, θ_0 - угол между легкой плоскостью образца и направлением поля H_0 . (б). Зависимость частоты АФМ резонанса от амплитуды стационарной прецессии вектора Нелля и приложенного магнитного поля. Розовая линия — контурная линия, где частота АФМР составляет 1,1 ТГц, как в малоамплитудном приближении, так и в нулевом приложенном поле. (в) Экспериментальная зависимость выпрямленного напряжения от величины магнитного поля при различных интенсивностях входного излучения и частоте возбуждения 1,1 ТГц с наложением кривых, построенных в результате теоретического анализа¹⁵.

¹⁵ P. Stremoukov, A. Safin, C. Schippers, et al. Strongly nonlinear antiferromagnetic dynamics in high magnetic fields // 2022. arXiv:2211.00353.

В рамках сигма-модели получены уравнения для азимутального $\theta(t)$ и планарного $\varphi(t)$ углов поворота вектора Нееля в базисной плоскости вида:

$$\sin^2 \theta \cdot \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \gamma_{eff} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\sin 2\varphi}{2} (\omega_{EA} \omega_{ex} + \omega_y^2 - \omega_x^2) \right) + 2\gamma (\mathbf{l} \cdot \mathbf{H}_0) \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \omega_x \omega_y \sin^2 \theta \cos 2\varphi + \sin 2\theta \frac{d\varphi}{dt} \frac{d\theta}{dt} = \gamma \left(\mathbf{l} \cdot \frac{d\mathbf{h}_{ac}}{dt} \right) \cos \theta, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \gamma_{eff} \frac{d\theta}{dt} - \frac{\sin 2\theta}{2} (\omega_{HA} \omega_{ex} + \omega_{EA} \omega_{ex} \cos^2 \varphi - (\omega_x^2 \cos^2 \varphi + \omega_y^2 \sin^2 \varphi)) - 2\gamma (\mathbf{l}_0 \cdot \mathbf{H}_0) \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \omega_x \omega_y \frac{\sin 2\theta}{2} \sin 2\varphi = \gamma \left(\frac{dh_{AC,x}}{dt} \sin \varphi - \frac{dh_{AC,y}}{dt} \cos \varphi \right), \quad (7)$$

где $\omega_{x,y} = \gamma \cdot \left(\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{H}_0 \right)$, $h_{AC,[x,y]}$ - проекции вектора \mathbf{h}_{AC} на оси \mathbf{x}, \mathbf{y} ,

соответственно. В работе численно решалась система нелинейных уравнений (6), (7) для различных значений амплитуды h_{AC} и частоты ω электромагнитной волны. Зависимость частоты АФМ резонанса, как функции магнитного поля и амплитуды внешнего воздействия представлена на рис.бб. Соответствующую зависимость частоты ω_{res} резонансной антиферромагнитной моды NiO от амплитуды стационарных колебаний A_0 было предложено аппроксимировать уравнением:

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_{ex} \omega_{HA} + \kappa \cdot \omega_H^2 - N \cdot A_0^2}, \quad (8)$$

где κ, N - феноменологические константы, которые были найдены путем аппроксимации экспериментальных данных, $\omega_H = \gamma H_0$. Как видно из выражения (8) постоянное магнитное поле увеличивает резонансную частоту, а при увеличении амплитуды уменьшается (при положительных коэффициентах κ, N). Таким образом, два эффекта могут компенсировать друг друга. Отстройка частоты АФМР от ее резонансного значения (таким образом, для NiO она составляет 1,1 ТГц при комнатной температуре) по-прежнему приводит к прецессии АФМ большой амплитуды, однако меньшей, чем при резонансе. Сравнение результатов

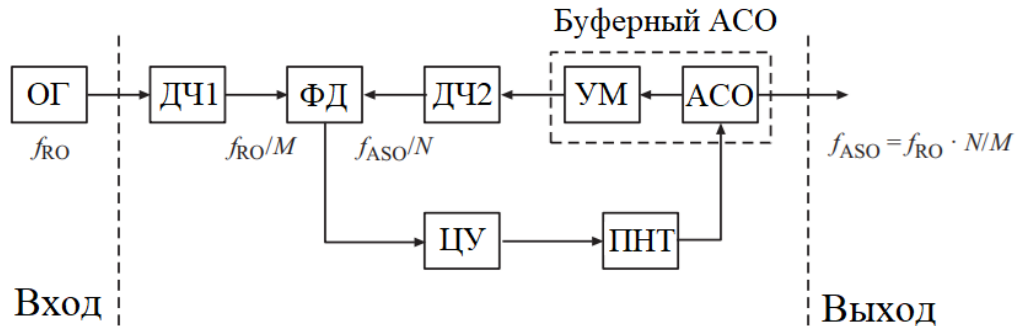
измерений детектируемого за счет обратного спинового эффекта Холла напряжения (см. рис.6в) с результатами анализа модели (6), (7) показало хорошее совпадение полученных теоретически результатов с экспериментом (рис.6в)¹⁶.

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. В частности, для случая, когда легкая плоскость АФМ перпендикулярна плоскости образца, а поляризация постоянного спинового тока параллельна трудной оси намагничивания, направление поляризации переменного спинового тока должно быть выбрано параллельно направлению поляризации постоянного спинового тока (параллельная накачки), тогда как при перепендикулярной накачке эффект синхронизации проявляется на субгармониках. Исследовано влияние дробно-кратной синхронизации при внешней синхронизации спинтронных осцилляторов.

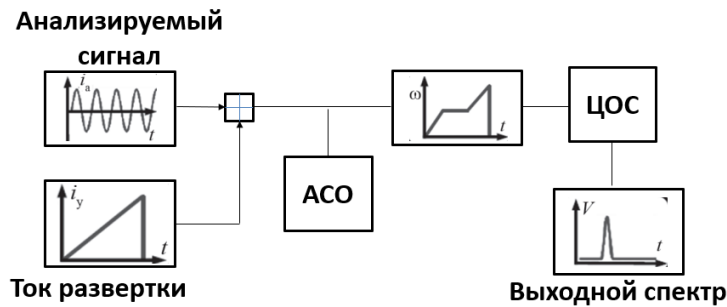
Предложены и исследованы математические модели двух устройств на основе эффекта внешней синхронизации АФМ осцилляторов – синтезатора дискретной сетки частот (рис.7а) и спектроанализатора (рис.7б). При синтезе частоты методом «медленно меняющихся амплитуд» получена зависимость коэффициента усиления по кольцу системы фазовой синхронизации от разности частот синхронизируемых колебаний при разных коэффициентах деления в цепи обратной связи. Показано, что с ростом коэффициента деления полоса синхронизируемых колебаний уменьшается при неизменных параметрах антиферромагнитного спинтронного осциллятора. При спектральном анализе сигналов получены аналитические выражения для определения длительности интервала синхронизации, которая пропорциональна нормированной амплитуде

¹⁶ P. Stremoukov, A. Safin, C. Schippers, et al. Strongly nonlinear antiferromagnetic dynamics in high magnetic fields // 2022. arXiv:2211.00353.

тока возбуждения и обратно пропорциональна скорости сканирования. Анализ проведен как приближенным методом медленно меняющихся амплитуд, так и методом фазовой плоскости.



(а)



(б)

Рис.7. (а) Структурная схема синтезатора дискретной сетки частот, построенного на основе системы фазовой синхронизации АФМ спинтронного осциллятора: ОГ — опорный генератор, ДЧ1 и ДЧ2 — делители частоты с коэффициентами деления M и N соответственно, ФД — фазовый дискриминатор (компаратор), ЦУ — цепь управления (непрерывный фильтр), ПНТ — преобразователь напряжение–ток, Буферный АСО — буферный блок, состоящий из усилителя мощности УМ и антиферромагнитного спинтронного осциллятора АСО; (б) Структурная схема спектроанализатора на основе АФМ спинтронного осциллятора, ЦОС – цепь обработки сигналов.

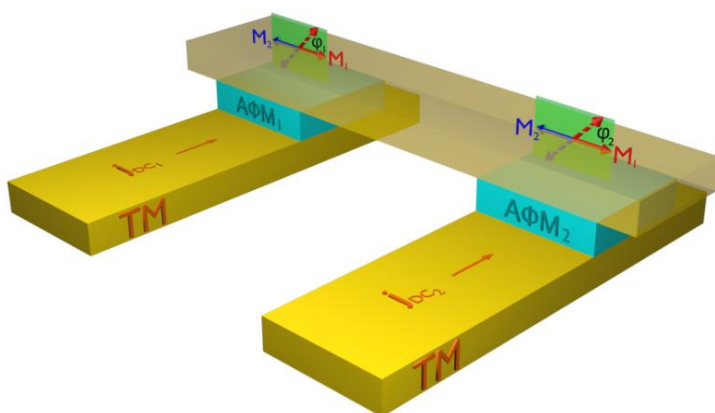
Проведен флуктуационный анализ работы синтезатора и спектроанализатора, представленных на рис.7. Получены спектральные характеристики амплитудного и фазового шума изохронного и неизохронного спинтронного осциллятора. Проведено их сравнение с характеристиками несинхронизированного осциллятора. Определена полоса пропускания кольца авторегулирования (рис.7а). Проведено сравнение схем внешней прямой и косвенной с использованием кольца авторегулирования систем синхронизации спинтронного осциллятора. Были

найлены условия, при которых ширина полосы синхронизма при прямой синхронизации больше, чем при косвенной.

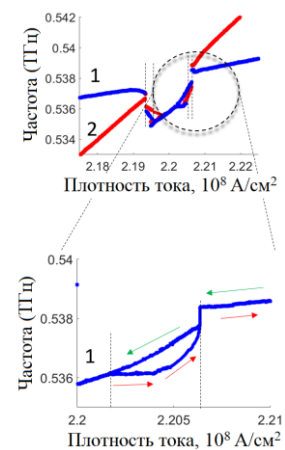
В седьмой главе исследована взаимная синхронизация двух связанных спинтронных осцилляторов. Получена математическая модель двух связанных через общий слой тяжелого металла АФМ осцилляторов в виде двух дифференциальных уравнений маятникового типа для углов поворота векторов Нееля в базисной плоскости АФМ в виде (связь резистивная):

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \frac{d^2 \varphi_{1,2}}{dt^2} + \alpha_{\text{eff}} \frac{d\varphi_{1,2}}{dt} + \frac{\omega_c}{2} \sin 2\varphi_{1,2} = \tau_{01,2} + \kappa \frac{d\varphi_{2,1}}{dt}, \quad (9)$$

где κ - коэффициент связи между осцилляторами. Показано, что в системе связанных осцилляторов, описываемых уравнением (9), возможно синхронное состояние при варьировании одного из вращающих моментов τ_{01} относительно другого. Численно исследовано влияние эффективной массы (инерции) связанных спинтронных осцилляторов на динамику перехода из синхронного состояния в асинхронное. Показано (рис.8б), что инерция ведет к бистабильному режиму при переходе из синхронного режима в асинхронный. Уменьшить его влияние можно выбором рабочей точки на характеристике «частота - плотность тока».



(а)



(б)

Рис.8. (а) Структура двух связанных спинтронных осцилляторов общим слоем тяжелого металла, (б) зависимость частоты колебаний в двух осцилляторах от плотности тока вблизи полосы синхронизма.

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 (рис.9).

Показано, что древовидные ансамбли 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. Обнаружено, что наличие иерархии в организации ансамбля ведет к вырожденности спектра нормальных мод, тогда как при рандомизации вырожденность в спектре пропадает.

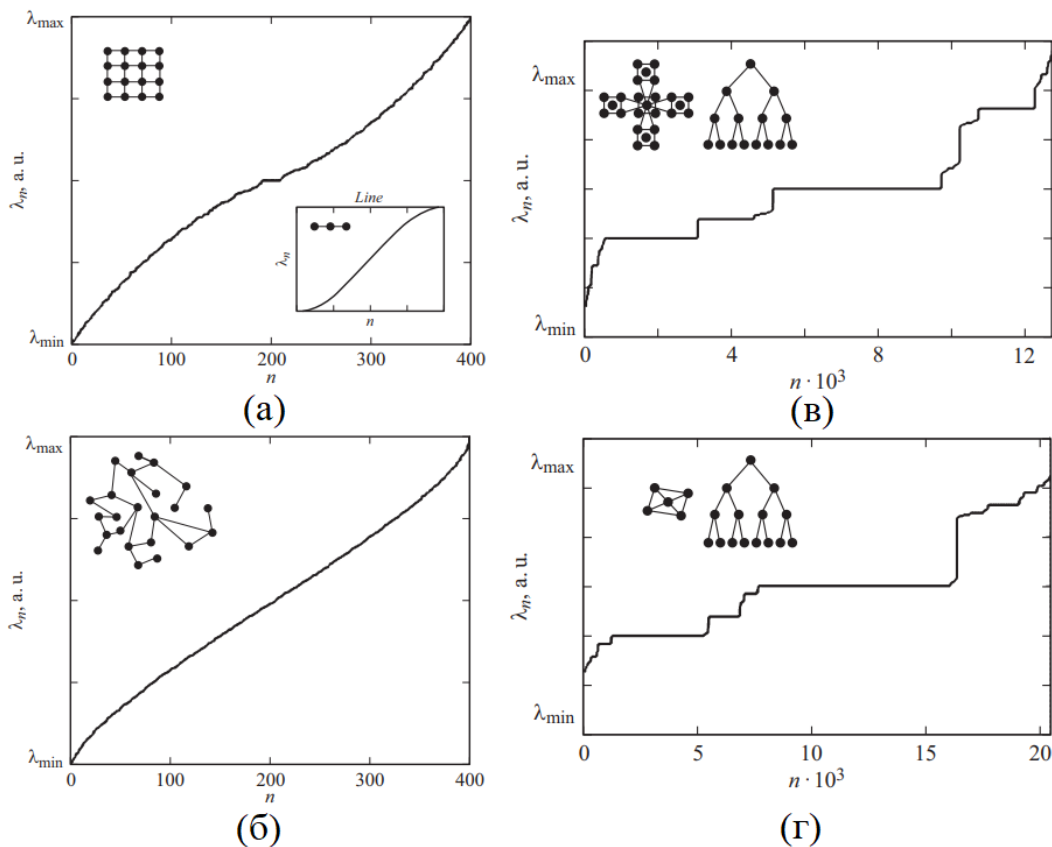


Рис.9. Спектры нормальных мод двумерной решетки (а), случайно организованной сети (б), иерархического дерева с двумя ветвями, в узлах которого расположены разные метаструктуры: иерархический ансамбль (в) и ансамбль вида «конверт» (г) взаимосвязанных спинтронных осцилляторов. На вставке изображен спектр линейки.

Было исследовано влияние выбора топологии объединения осцилляторов в ансамбли на взаимную синхронизацию осцилляторов, а именно на скорость установления синхронного режима. Было проведено численное моделирование уравнения Курамото с инерцией, являющейся моделью антиферромагнитных осцилляторов, а именно системы вида:

$$m\ddot{\theta}_i + \dot{\theta}_i = \Omega_i + \frac{K}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad (10)$$

где θ_i - полярный угол наклона вектора Нееля в легкой плоскости, m - коэффициент инерционности (эффективная масса), Ω_i - частота i -ого осциллятора, K - нормированный коэффициент связи (сцепления), N - количество осцилляторов, a_{ij} - матрица смежности, характеризующая топологию связи осцилляторов. Численное моделирование (рис.10) показывает, что наихудшим с точки зрения времени установления синхронного режима из исследованных различных топологий является линейная, тогда как увеличение количества связей приводит (от кольца до полносвязной системы) к уменьшению времени установления синхронного режима.

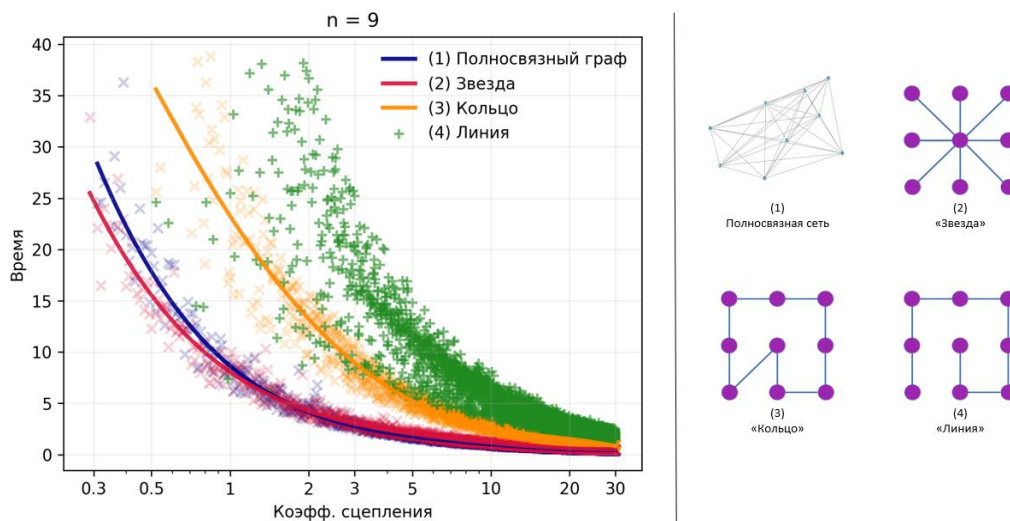


Рис.10. Время установления синхронного режима в зависимости от величины нормированной константы связи K для различных топологий объединения осцилляторов в ансамбли: 1) полносвязный граф, 2) «звезда», 3) «кольцо», 4) «линия» для количества осцилляторов $N=9$.

Исследованы нейроморфные вычислители на основе спинтронных осцилляторов. Реализацию нейроморфного поведения в системе связанных спинтронных осцилляторов можно добиться при нахождении системы вблизи порога перехода в автоколебательный режим, причем переходом от импульсной односпайковой динамики к пачечной берстовой динамике можно управлять, изменяя амплитуду и частоту возбуждающего колебания. Показана возможность реализации нейроморфных вычислений типа «И» и «ИЛИ» в системе трех спинтронных осцилляторов, взаимосвязанных через общий слой тяжелого металла (рис.11а). Найдены условия реализации простейших нейроморфных вычислений на основе массивов спинтронных осцилляторов» (рис.11б).

В заключении перечислены основные результаты работы.

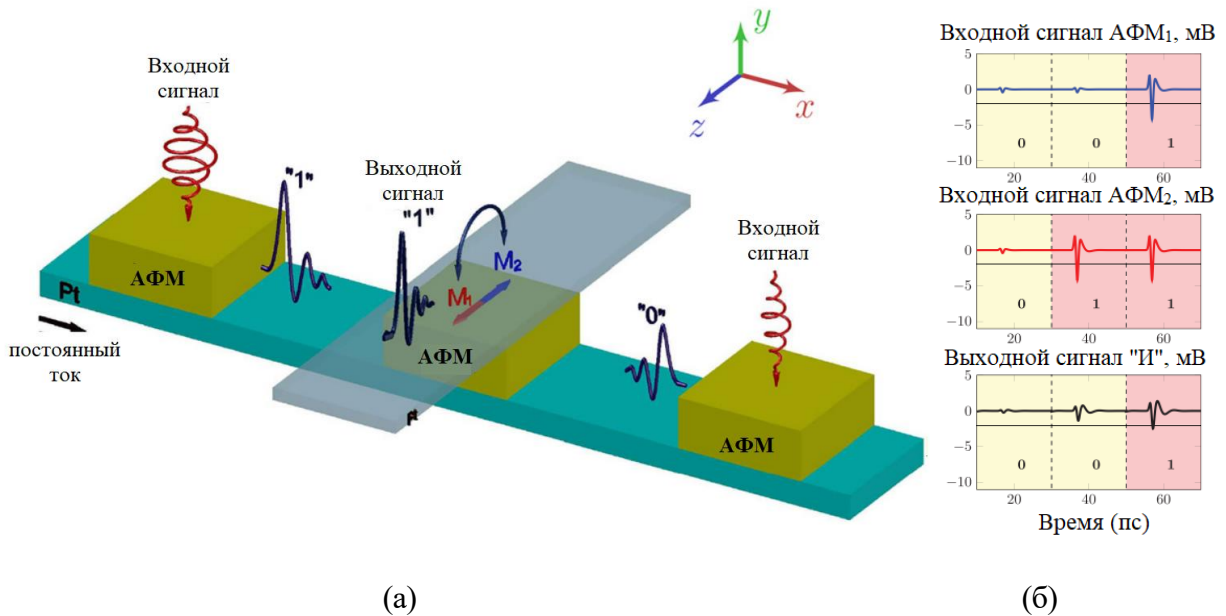


Рис.11. (а) Структура трех связанных спинтронных осцилляторов, два из которых являются входными «нейронами» - генераторами спайков, а третий – выходным (решающим устройством) и осциллограммы реализации логических операций «И».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. *Теория перестраиваемого спин-поляризованным током наноосциллятора на основе антиферро-, ферри- и слабых ферромагнетиков.* Найдены условия отсутствия гистерезиса при переходе из режима затухающих колебаний в режим автоколебаний, связывающие физические параметры магнетика и слоя тяжелого металла. При ориентации вектора поляризации спинового тока параллельно оси легкого намагничивания магнетика существует однородная конусная прецессия вектора Нееля, тогда как при перпендикулярной ориентации имеется неоднородная во времени переменная составляющая. В первом случае, для реализации съема полезного сигнала необходимо использовать слабое дипольное излучение магнетиков, а во втором, обратный спиновый эффект Холла или эффект туннельного магнитосопротивления. Оба варианта целесообразнее реализовывать в составе массива, состоящего из парциальных элементов, т.е. складывать мощность. Возникновение автоколебаний в антиферромагнитном осцилляторе сопровождается возникновением гомоклинической траектории, образованной слиянием сепаратрис седел. Для уменьшения области гистерезисной генерации необходимо уменьшать эффективное поле анизотропии в легкой плоскости. Наличие внешнего постоянного магнитного поля приводит к снятию вырождения с резонансных частот АФМ осциллятора со слабым ферромагнетизмом в докритической области и наличию двух устойчивых состояний равновесия и скачкам режима, а автоколебательный режим характеризуется двухмодовой генерацией.

2. *Теория регенеративного спинтронного детектора, выполненного на основе антиферро-, ферри- и слабых ферромагнетиков.* Показано, что для магнитного кристалла с одной осью анизотропии при возбуждении *линейно* поляризованным током или электромагнитным излучением выпрямленное за счет спинового эффекта Холла напряжение равно нулю. Приложение внешнего постоянного

магнитного поля снимает вырождение с нормальных частот колебаний магнетика, позволяя добиться ненулевого выпрямленного напряжения. При этом чувствительность детектора линейно зависит от внешнего постоянного поля. Для магнитного кристалла с двумя осями анизотропии вырождение нормальных частот снимается и при нулевом постоянном магнитном поле, что приводит к ненулевому выпрямленному напряжению. Альтернативным способом выпрямления линейно поляризованных колебаний является использование проводящих одноосных кристаллов с нарушенной пространственной и временной инверсией. Показано, что выпрямление колебаний *круговой* и *эллиптической* поляризации возможно в нулевом внешнем магнитном поле как для одноосных, так и для двухосных магнетиков. Для увеличения чувствительности выпрямителя предложена магнитная ректенна в виде массива магнитных наноантенн, соединенных общим слоем тяжелого металла.

3. *Теория нелинейной спиновой накачки антиферромагнетика.* В результате полученных в рамках сигма-модели укороченных уравнений для медленно меняющихся амплитуд и фаз нормальных мод колебаний при нелинейном антиферромагнитном резонансе двухосного антиферромагнетика во внешнем магнитном поле были выявлены два взаимообратных действия на резонансные частоты, которые не наблюдаются в линейном случае. С одной стороны, внешнее постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно направлению легкой оси намагничивания, как и при линейном антиферромагнитном резонансе, сдвигает резонансную частоту в сторону увеличения. С другой стороны, электромагнитное излучение достаточно большой мощности уменьшает резонансную частоту. Продемонстрировано совпадение полученных теоретически результатов с экспериментом.

4. *Метод перестройки частоты и изменения критического тока спинтронных осцилляторов и детекторов.* Показано, что путем изменения

эффективной анизотропии магнетиков за счет магнитострикции и температуры можно добиться существенного (на порядок) уменьшения критического тока самовозбуждения осциллятора и увеличения рабочего диапазона перестройки частоты детектора. 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.

5. *Теория суб-ТГц спинтронного эмиттера электромагнитного излучения.* С ростом амплитуды импульса накачки величина отклика спиновой системы магнетика линейно растет на основной (резонансной) квазиантиферромагнитной моде и квадратично на второй гармонике. Перестройка частоты резонансного эмиттера может быть осуществлена спин-поляризованным током, а эффективность излучения увеличена путем организации массива из магнитных наноструктур.

6. *Теория внешней и взаимной синхронизации спинтронных осцилляторов.* Ширина полосы внешней синхронизации спинтронного АФМ осциллятора при параллельной накачке спиновым током на основной частоте колебаний выше, чем при перпендикулярной. Таким образом, реализовывать детектор в автоколебательном режиме на основе антиферромагнитного осциллятора предпочтительнее при параллельной накачке, тогда как в докритической области при перпендикулярной. Наличие эффективной массы (инерции) связанных спинтронных осцилляторов ведет к бистабильному режиму при переходе из синхронного режима в асинхронный. Уменьшить его влияние можно выбором рабочей точки на характеристике «частота - плотность тока», а именно, чем более характеристика линейна, тем меньше проявляется бистабильный режим. Получены аналитические выражения для определения длительности интервала синхронизации при спектральном анализе сигналов, которая пропорциональна

нормированной амплитуде тока возбуждения и обратно пропорциональна скорости сканирования.

7. *Теория 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. Выявлено, что древовидные ансамбли 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. Обнаружено, что наличие иерархии в организации ансамбля ведет к вырожденности спектра нормальных мод, тогда как при рандомизации вырожденность в спектре пропадает. Увеличение количества связей (усложнение топологии ансамбля) приводит к уменьшению времени установления синхронного состояния. Проведенное численное моделирование показало предпочтительным использование топологий типа «каждый с каждым» и «звезда» по сравнению с кольцом и линейкой.

8. *Нейроморфные вычислители на основе спинтронных осцилляторов.* Реализации нейроморфного поведения в системе связанных спинтронных осцилляторов можно добиться при нахождении системы вблизи порога перехода в автоколебательный режим, причем переходом от импульсной односпайковой динамики к пачечной берстовой динамике можно управлять, изменяя амплитуду и частоту возбуждающего колебания. Показана возможность реализации нейроморфных вычислений типа «И» и «ИЛИ» в системе трех спинтронных осцилляторов, взаимосвязанных через общий слой тяжелого металла.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, индексируемых в международных
научнометрических базах данных Web of Science и Scopus

- [A1] **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.
- [A2] Mitrofanova A., **Safin A.R.**, Kravchenko O., Nikitov S., and Kirilyuk A. Optically initialized and current-controlled logical element based on antiferromagnetic-heavy metal heterostructures for neuromorphic computing // **Appl. Phys. Lett.** – 2022. – Vol. 120. No. 072402.
- [A3] Kozlova E.E., **Safin A.R.**, Nikitov S.A. Ferrimagnet based spin Hall detector of subterahertz frequency signals // **Appl. Phys. Lett.** - 2022. - Vol. 121. № 192404.
- [A4] Chumak A., **Safin A.R.**, et al. Roadmap on Spin-Wave Computing // **IEEE Transactions on Magnetics**. - 2022. – Vol. 58. - No. 6. - P. 0800172.
- [A5] Consolo G., Valenti G., **Safin A.R.**, Nikitov S.A., Tyberkevich V., Slavin A. Theory of Electric-Field Controlled Antiferromagnetic Spin-Hall Oscillator // **Physical Review B**. - 2021. - Vol. 103. - No. 134431.
- [A6] Mescheryakov A.A., **Safin A.R.**, Kalyabin D.V., Nikitov S.A., Mednikov A.M., Frolov D.A., Kirilyuk A.I. Temperature tunable oscillator of THz-frequency signals based on the orthoferrite/heavy metal heterostructure // **Journal of Physics D: Applied Physics**. – 2021. – Vol. 54. – No. 195001.
- [A7] **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.
- [A8] 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.
- [A9] Stremoukhov P., **Safin A.**, Kirilyuk A. THz generation and frequency manipulation in AFM/HM interfaces // **Journal of Physics: Conference Series**. – 2020. – Vol. 1461. – P. 012171.
- [A10] Stremoukhov P., **Safin A.**, Logunov M., Nikitov S., Kirilyuk A. Spintronic terahertz-frequency nonlinear emitter based on the canted antiferromagnet-platinum bilayers // **Journal of Applied Physics**. – 2019. – Vol. 125. – P. 223903.
- [A11] Osokin S.A., **Safin A.R.**, Nikitov S.A. Influence of Shape Effects on the Spectrum of Spin Waves in Finite Array of Ferromagnetic Pillars // **JETP Letters**. – 2019. – Vol.110, iss.9. – P.1-2.

- [A12] Osokin S.A., **Safin A.R.**, Barabanenkov Y.N., Nikitov S.A. Spin waves in finite chain of dipolarly coupled ferromagnetic pillars // **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. – 2018. – Vol. 465. – P. 519-523.
- [A13] Mitrofanov A.A., **Safin A.R.**, Udalov N.N., Kapranov M.V. Theory of spin torque nano-oscillator-based phase-locked loop // **Journal of Applied Physics**. 2017. – Vol. 122. – P. 123903.
- [A14] **Safin A.R.**, Udalov N.N., Kapranov M.V. Mutual phase locking of very nonidentical spintorque nanooscillators via spin-wave interaction // **European Physics Journal – Applied Physics** – 2014. – Vol. 67. – P. 20601.

Публикации в изданиях из перечня ВАК

- [A15] Козлова Е.Е., **Сафин А.Р.** Детектирование субтерагерцевых колебаний на основе гетероструктуры антиферромагнетик/тяжелый металл // **Письма в ЖТФ**. – 2022. - Т. 48, Вып. 9. - С. 44-48.
- [A16] **Сафин А.Р.**, Козлова Е.Е., Калябин Д.В., Никитов С.А. Детектирование терагерцевых электромагнитных волн с помощью проводящих антиферромагнетиков // **Письма в ЖТФ**. – 2021. – Т. 47. Вып. 16. – С. 20-23.
- [A17] 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., Кирилюк А.И. Диэлектрическая магноника – от гигагерцев к терагерцам // **Успехи физических наук**. – 2020. – Т. 190, № 10. – С. 1009-1040.
- [A18] **Сафин А.Р.**, Никитов С.А., Кирилюк 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.
- [A19] **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.
- [A20] Сафина О.С., Воронов А.В., **Сафин А.Р.**, Булатов М.Ф., Чуриков Д.В., Суровяткина Е.Д. Спектры нормальных мод иерархических ансамблей взаимосвязанных осцилляторов // **Письма в ЖТФ**. – 2019. – Вып. 17. – С. 24-27.
- [A21] **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.
- [A22] **Сафин А.Р.**, Удалов Н.Н., Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С. Нагрузочные характеристики спин-трансферного наноосциллятора // **Письма в ЖТФ**. – 2017. – Т.43., Вып.6. – С.56-63.
- [A23] Митрофанов А.А., **Сафин А.Р.**, Удалов Н.Н. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты // **Письма в ЖТФ**. – 2015. Т.41, Вып.16. – с.29-35.

- [A24] Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Система фазовой синхронизации спин-трансферного наноосциллятора // **Письма в ЖТФ**. – 2014. – Т. 40, Вып. 13. – С.66-72.
- [A25] Стремоухов П.А., Сафин А.Р., Удалов Н.Н. Рабочие характеристики вихревого спин-трансферного наноосциллятора // **Радиотехника**. –2016. – № 11. – С. 19-26.
- [A26] Сафин А.Р., Капранов М.В., Удалов Н.Н. Особенности взаимной синхронизации неидентичных спин-трансферных наноосцилляторов // **Радиотехника** – 2013. – №10. – С.43-47.
- [A27] Митрофанова А.Ю., Сафин А.Р., Кравченко О.В., Никитов С.А. Взаимная синхронизация антиферромагнитных спинтронных осцилляторов // **Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника**. – 2022. – Т. 25. - № 5. С.80-90. (Входит в ядро РИНЦ).
- [A28] Митрофанов А.А., Сафин А.Р., Торина Е.М., Татаренко А.С., Удалов Н.Н. Шумовые характеристики спин-трансферных наноосцилляторов под внешним воздействием // **Вестник Новгородского государственного университета** – 2020. № 2(118). – С.45-49.
- [A29] Mitrofanov A., Safin A., Torina E., Udalov N. Noise Properties of Two Mutually Coupled Spin-Transfer Nanooscillators in the Phase Locking Regime // **Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника** – 2020. – Vol. 23, No. 2. – P. 19–25. (Входит в ядро РИНЦ).
- [A30] Сафин А.Р., Татаренко А.С. Сложение мощностей многих спинтронных осцилляторов // **Вестник Новгородского государственного университета** – 2019. – №2(114). – С. 39-42.
- [A31] Сафин А.Р., Никитов С.А. Нелинейная динамика антиферромагнитного спинтронного осциллятора // **Известия высших учебных заведений. Радиофизика**. – 2018. – Т. LXI, № 8-9. – С. 937-944. (Входит в ядро РИНЦ).
- [A32] Сафин А.Р., Митрофанов А.А., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Спектральный анализ сигналов с использованием спин-трансферного наноосциллятора в режиме синхронизации // **Вестник МЭИ**. – 2018. – № 5. – С. 166-171.
- [A33] Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Татаренко А.С. Параллельная схема сложения мощностей многих спин-трансферных наноосцилляторов // **Вестник Новгородского Государственного Университета** – 2018. – № 1(107). – С. 41-45.
- [A34] Сафин А.Р., Митрофанов А.А., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Синхронизация спин-трансферных наноосцилляторов // **Вестник МЭИ** – 2015. – №1. – С.96-100.
- [A35] Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Синхронизация связанных спин-трансферных наноосцилляторов с учетом запаздывания // **Вестник МЭИ** – 2013. – №5. – С.123-128.
- [A36] Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Сложение мощностей взаимодействующих спин-трансферных наноосцилляторов // **Вестник МЭИ** – 2012. – №2. – С.136-142.

Патенты РФ

[A37] Митрофанов А.А., **Сафин А.Р.**, Удалов Н.Н., Капранов М.В. Спинтронное устройство генерирования сверхвысокочастотных колебаний. Патент на изобретение № 218118058. Приоритет от 16.05.2018.

[A38] Попов П.А., **Сафин А.Р.**, Стремоухов П.А., Калябин Д.В., Кирилюк А.И., Славин А.Н., Никитов С.А. Осциллятор для генератора терагерцового излучения. Патент на изобретение № 2742569. Приоритет от 29.05.2020.

[A39] Козлова Е.Е., **Сафин А.Р.**, Калябин Д.В., Никитов С.А., Кирилюк А.И. Спинтронный детектор терагерцовых колебаний. Патент на изобретение. Патент на изобретение № 2778980. Приоритет от 08.11.2021.

[A40] Козлова Е.Е., **Сафин А.Р.**, Калябин Д.В., Никитов С.А., Кирилюк А.И. Спинтронный детектор терагерцовых колебаний на основе наногетероструктуры антиферромагнетик-тяжелый металл. Патент на изобретение № 2781081. Приоритет от 25.01.2022.