

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
НИУ МИЭТ,

кандидат технических наук

А.А. Дронов

декабрь 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Никитина Александра Олеговича на тему «Математическая модель слоистой магнитоэлектрической структуры в электрических полях в области сверхвысоких частот», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертационного исследования

Тема искусственного интеллекта (ИИ) уже давно вышла за рамки прикладной математики. Исследователи из разных областей активно участвуют в изучении и развитии мира ИИ. Этот процесс не прекращается, поскольку технологии ИИ постоянно совершенствуются и находят все новые сферы применения. На сегодняшний день данная область приобрела междисциплинарный характер, затрагивая психологию, философию, экономику, право и т. д.

Тенденция перехода к вычислениям на связанных генераторах является закономерным этапом развития архитектуры нейроморфных вычислений. В свою очередь, введение магнитоэлектрических структур в данную область представляет собой следующий шаг в эволюции, позволяющей осуществлять внешнюю динамическую перестройку целевой логики за счет

присутствующего магнитоэлектрического эффекта. Это означает, что системы смогут адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям, обеспечивая более гибкое и эффективное решение задач.

В этом контексте диссертационная работа Никитина А. О., посвященная построению математической модели магнитоэлектрической структуры, выступающей в качестве функциональной основы связанных генераторов спин-волновых колебаний в составе электронно-управляемой архитектуры для реализации нейроморфных вычислений, представляет собой актуальное и перспективное исследование. Она может положить начало дальнейшим исследованиям в области создания вычислительных нейроморфных элементов и разработки новых технологий обработки информации.

Научная новизна

К основным результатам работы, характеризующим ее научную новизну, следует отнести:

1. Разработку математической модели слоистой магнитоэлектрической структуры, управляемой электрическим полем, свободной от ограничений, накладываемых требованиями полноты учета основных физических процессов и возможностью интеграции с программно-математическим аппаратом существующих нейронных сетей.

2. Исследование поведения спин-волнового колебания, распространяющегося в ферритовой компоненте магнитоэлектрической структуры, при внешнем воздействии электрического поля:

– зависимости его спектра от величины прикладываемого электрического поля;

– зависимость угла поворота фронта спиновой волны от величины градиента амплитуды пространственной составляющей электрического поля, приложенного к магнитоэлектрической структуре.

3. Разработку модели магнитоэлектрического базового логического элемента с контролируемой посредством электрического поля функциональной логикой, представляющего собой частный случай процесса вычислений на связанных спин-волновых генераторах, описываемых математической моделью Йошики Курамото.

Достоверность полученных результатов подтверждается полнотой и корректностью исходных данных, наличием обширной теоретической и экспериментальной базы для проведения исследований, а также

соответствием полученных по итогам диссертации результатов уже имеющимся сведениям об объекте исследования.

Практическая значимость работы

Результаты исследований имеют практическое значение, поскольку они создают теоретическую основу для разработки нового вида перестраиваемых устройств нейроморфных вычислений, использующих спин-волновые колебания. Созданная и внедренная в программную среду математическая модель совместно с существующими библиотеками и алгоритмами машинного обучения может быть использована при непосредственном проектировании нейронных сетей на базе генераторов спиновых волн с реализованной функцией динамической перестройки.

Рекомендации по использованию выводов диссертационной работы

Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских институтах и предприятиях, занимающихся разработками и исследованиями в области аппаратной реализации нейронных сетей. Результаты также могут быть использованы в качестве теоретической базы для проектирования управляемых СВЧ устройств, работающих на магнитоэлектрическом эффекте. Помимо этого, результаты рекомендуются к использованию в учебном процессе ВУЗов по специальностям, связанными с физикой твердого тела.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа Никитина А.О. «Математическая модель слоистой магнитоэлектрической структуры в электрических полях в области сверхвысоких частот», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Направление исследования соответствует пункту 6 «Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения».

Оценка структуры и содержания работы,

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 100 наименований. Общий объем составляет 115 страниц, включая 28 рисунков.

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основная цель и задачи работы, показана научная новизна, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен аналитический обзор, посвященный магнитоэлектрическим слоистым структурам сегнетоэлектрик-феррит в свете присутствующих в них эффектов. Приведено теоретическое обоснование экспериментально фиксируемой зависимости волновых характеристик магнитоэлектрической структуры от величины приложенного электрического поля через описание зависимостей эффективного поля ферритовой компоненты и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической. Обосновано ощутимое влияние обратного магнитоэлектрического эффекта на спектр спиновых волн и переход к магنونным устройствам, управляемым электрическим полем. Приведен обзор существующих математических моделей, способных описывать поведение спин-волновых колебаний в ферритовой компоненте магнитоэлектрической структуры на основе существующих подходов: теории плоских волн и теории спин-волновых мод. Далее, дается краткий обзор современного состояния и тенденций развития теории построения структур нейроморфных вычислений на связанных генераторах.

В заключении сформулирована основная задача диссертационного исследования.

Глава 2 посвящена построению новой математической модели магнитоэлектрической структуры в электрических полях на основе дисперсионных выражений спиновых волн, полученных на основе уравнений магнитостатики с использованием метода потенциальных функций и электродинамических граничных условий для трех ориентаций постоянного магнитного поля относительно волнового вектора; раскрывается вопрос эффективного постоянного магнитного поля феррита через метод эффективных размагничивающих факторов; описываются типы анизотропии и их зависимости от ориентации постоянного магнитного поля относительно плоскости пластины; вводится зависимость характеристик от величины внешнего электрического поля через магнитоэлектрический эффект; раскрывается тема учета обменного взаимодействия и обменных граничных условий в терминах свободной энергии.

Глава 3 посвящена переносу разработанной модели в программную среду *Python* в виде модуля, который автоматизирует получение конечных характеристик и позволяет проводить численные эксперименты в динамике. Рассматривается задача управления фронтом спиновой волны через внешнее, приложенное к магнитоэлектрической структуре, электрическое поле, а также

задача построения магнитоэлектрического базового логического элемента с изменяемой электрическим полем функциональной логикой. В заключении проводится параллель рассматриваемых задач с вопросами построения электронно-управляемых структур нейроморфных вычислений на спин-волновых колебаниях.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Диссертация написана понятным профессиональным научным языком. Каждая глава содержит краткие выводы.

Замечания по диссертационной работе

1. В разрабатываемой математической модели не принимается во внимание, как будет меняться поведение слоистого магнитоэлектрического композита при изменении температуры. Это может привести к неточным результатам моделирования и прогнозам. Поэтому важно усовершенствовать модель, добавив в нее учет температурных эффектов.

2. В диссертационном исследовании не был подробно рассмотрен вопрос о взаимосвязи обменных граничных условиях и магнитоэлектрическим эффектом, т. е. между состоянием закрепления спинов на поверхностях ферромагнетика и упругой деформацией, которая возникает вследствие магнитоэлектрического эффекта.

3. В диссертационной работе не хватает деталей о том, как именно математическая модель взаимодействует с программными комплексами машинного обучения при создании архитектуры нейроморфных вычислений на основе спин-волновых генераторов. Более подробное описание этих аспектов поможет выявить возможные проблемы и ограничения, которые могут возникнуть при реализации данной системы.

4. В свете применения магнитоэлектрического эффекта к созданию элементной базы нейроморфной вычислительной архитектуры не проводится качественное и количественное сравнение с конкурирующими концепциями аппаратной реализации элементов искусственных нейросетей на основе других физических эффектов, такими как: 1) нейросети на основе спиновых диодов (spin-transfer-torque diodes), 2) нейросети на основе спин-трансферных наногенераторов (spin-transfer-torque nanooscillators), 3) нейросети на основе ферроэлектрических транзисторов, 4) нейросети на основе элементов с резистивным переключением состояния (RRAM-based neural network).

5. В диссертации не в полной мере раскрыты практические перспективы использования разработанной модели для построения нейроморфной архитектуры: это касается оценки пределов масштабирования нейросети на базе предложенной концепции магнитоэлектрических структур, описания схемы управления их состоянием и возможных алгоритмов синхронизации связанных генераторов спиновых волн на их основе (в том числе, алгоритмов динамической перестройки генераторов электрическим полем), а также оценки ожидаемого энергопотребления нейросети на магнитоэлектрических элементах для выполнения базовых логических операций.

6. Наличие в тексте диссертационной работы опечаток и стилистических ошибок.

Однако, отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научной и практической значимости.

Заключение

Диссертационная работа Никитина Александра Олеговича на тему «Математическая модель слоистой магнитоэлектрической структуры в электрических полях в области сверхвысоких частот», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой получен ряд новых результатов, имеющих как научную, так и практическую значимость. Основные результаты отражены в 20 научных работах, в том числе: 2 статьи в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности Физика конденсированного состояния; 9 статей в научных изданиях, индексируемых базами Scopus. Материалы докладывались на международных и отечественных конференциях. Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Диссертационная работа Никитина Александра Олеговича на тему «Математическая модель слоистой магнитоэлектрической структуры в электрических полях в области сверхвысоких частот» представляет собой законченное научное исследование и **соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»**, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Материал диссертации и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на объединенном заседании Института физики и прикладной математики и Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» «19» ноября 2024 г., протокол № 2.

Директор Института ФПМ,
д.ф.-м.н., профессор



Боргардт Н.И.

Директор Института ИнЭл,
д.т.н., доцент



Лосев В. В.

Отзыв составил:

Демин Глеб Дмитриевич,

к.ф.-м.н., начальник научно-исследовательской лаборатории «Исследование изделий нано- и микросистемной техники» ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", ст. преподаватель Института ИнЭл



Демин Г.Д.

Подписи Боргардта Н.И., Лосева В.В. и Демина Г.Д. заверяю
Ученый секретарь НИУ МИЭТ, к.т.н.



МП

«19» ноября 2024 г.

Козлов А.В.

Полное название организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Телефон: (499) 731-44-41; **Факс:** (499) 710-22-33.

Электронная почта: netadm@miec.ru.