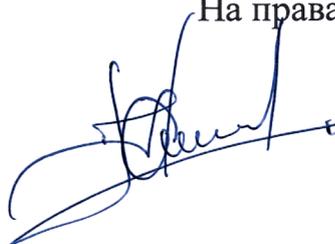


На правах рукописи



Никитин Александр Олегович

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОИСТОЙ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПОЛЯХ В ОБЛАСТИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

Специальность 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Великий Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Научный руководитель:

Петров Роман Валерьевич, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» (ФГБОУ ВО «НовГУ»).

Официальные оппоненты:

Сафин Ансар Ризаевич, доктор физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории Антиферромагнитная спинтроника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН);

Карпенков Дмитрий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры магнетизма Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ).

Ведущая организация:

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

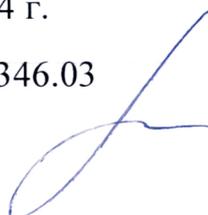
Защита состоится «19» декабря 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.346.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» по адресу: 173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого» и на сайте университета по адресу: <https://portal.novsu.ru/file/2184998>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д.41.

Автореферат разослан «_____» октября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.346.03
доктор физико-математических наук, доцент



М.А.Захаров

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Магнитоэлектрические (МЭ) структуры являются центром притяжения научной мысли не одно десятилетие. Они берут свое название в честь присутствующего в них одноименного эффекта, само существование которого было предсказано в 1956 г. учеными Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем. Суть эффекта заключалась в присутствии в веществе линейной связи между магнитным и электрическим полями [1]. В общепринятом понимании МЭ эффект определяется в возникновении поляризации образца под действием внешнего магнитного поля (прямой МЭ эффект) или проявлении (изменении) намагниченности под действием внешнего электрического поля (обратный МЭ эффект).

Изначально МЭ эффект экспериментально был подтвержден в кристаллах [2–4], позже, с появлением соответствующей технологии исследовательские работы сместились в область композитных материалов [5]. Данное направление считалось более перспективным в связи с обнаружением большего по величине МЭ эффекта в искусственно созданных композитных структурах, содержащих сегнетоэлектрические и ферромагнитные компоненты, в которых связь магнитных и электрических характеристик образца, определяющая МЭ эффект, возникала посредством упругих деформаций [6].

В настоящее время существует большое число работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию данного эффекта как в низкочастотной области, которые касались проектированию МЭ датчиков магнитного поля и тока [7, 8], так и в СВЧ области (в области магнитного резонанса), где МЭ эффект проявляется в виде изменения магнитной восприимчивости во внешнем электрическом поле. Последнее касалось электронно-управляемых МЭ СВЧ устройств [9], в которых реализовано управление электрическим полем, что закладывает потенциальную возможность снижения мощности, потребляемой в цепях управления.

Как было отмечено выше, приложение к МЭ структуре внешнего электрического поля приводит к изменению магнитной проницаемости ферромагнитной компоненты, и, как следствие, к изменению ее внутреннего магнитного поля. В итоге волны, проходящие через данную структуру, обладают фазовым набегом, отличным от ситуации отсутствия внешнего электрического поля. Выявленная особенность стала основой для проектирования электронно-управляемых МЭ фазовращателей [10, 11]. Отмеченные работы экспериментально подтвердили существующую зависимость величины фазового сдвига высокочастотного колебания, распространяющегося в МЭ структуре, от величины приложенного электрического поля.

Очевидно, что подобная зависимость характерна и для волн намагниченности (спиновых волн), которые распространяются в ферритовой компоненте МЭ структуры [12]. И, в предположении существования ситуации с неоднородным МЭ воздействием в плоскости структуры, которое приведет к неоднородному изменению магнитной проницаемости, можно говорить о возможности искусственного создания магнитной неоднородности в масштабе

ферромагнитного слоя. Само влияние магнитной неоднородности на направление распространения спиновой волны было показано в 2020 году [13].

Вышесказанное позволяет рассматривать МЭ эффект в качестве механизма управления направлением распространения спин-волновым колебанием.

С другой стороны, отмеченная выше зависимость величины фазового сдвига спин-волнового колебания от величины приложенного к МЭ структуре электрического поля, позволит качественно улучшить новую нейроморфную вычислительную архитектуру на связанных спин-волновых генераторах.

Термин «нейроморфный» был введен ученым Калифорнийского университета К. Мидом в конце 80-х годов в качестве обозначения искусственных нейронных систем, архитектура и принципы проектирования которых основаны на принципах биологических нервных систем [14]. Сама концепция нейроморфных вычислений на связанных генераторах основана на эффекте синхронизации генераторов колебаний. Первое математическое описание данного эффекта было представлено в 1975 году ученым-математиком Й. Курамото [15]. Однако, попытка математического описания модели взаимодействующих между собой генераторов в свете решения когнитивных задач на основе модели Курамото была осуществлена значительно позже, в 2011 году [16]. Согласно данным моделей одним из решающих параметров, определяющих процесс синхронизации, является значение фазового расстояния между генераторами. Данный параметр подчиняется физике тела, используемого в качестве волноводного канала. И, в предположении построения архитектуры нейроморфных вычислений на спин-волновых генераторах, в качестве связующей основы выступает структура, содержащая ферромагнитную составляющую. Из чего следует, что применение МЭ структуры позволит посредством электрического поля влиять на процессы синхронизации через отмеченную выше фазовую зависимость спиновой волны. Это означает возможность оказания динамического влияния на процессы нейроморфных вычислений через МЭ эффект.

Таким образом, МЭ структуры становятся вероятным кандидатом для построения качественно новой архитектуры нейроморфных вычислений с возможностью электронной перестройки целевой логики, благодаря своей способности оказывать управляемое воздействие на распространение спин-волновых колебаний.

Стоит сказать, что тема нейроморфных вычислений на основе связанных генераторов колебаний является междисциплинарной. И базируется, с одной стороны, на физике источников колебаний (связанных генераторов), а с другой – на математическом (алгоритмическом, программном) аппарате существующих нейронных сетей. Следовательно, выстраиваемые математические модели также должны быть междисциплинарными, т. е. способными не только учитывать поведение (в нашем случае) спин-волновых колебаний во внешних электрических полях, но также иметь возможность интеграции с классическими (программно-реализованными) нейронными сетями. Последнее накладывает ряд требований (ограничений) к математическим моделям:

– оптимальность (должен быть достигнут баланс, с целью сохранения вычислительного ресурса без снижения полноты учета основных эффектов);

- аналитичность (построенная модель должна явным образом описывать основные процессы, происходящие в исследуемой структуре);
- гибкость (построенная модель должна быть способна к последующему развитию, в свете описания новых эффектов, их частных случаев).

Из этого следует, что в настоящее время актуальной остается задача построения математической модели слоистой МЭ структуры в электрических полях для структур нейроморфных вычислений, свободной от указанных ограничений.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка математической модели слоистой МЭ структуры, прогнозирующей динамические фазовые изменения спин-волновых колебаний, распространяющихся в ферритовой компоненте структуры с последующим ее исследованием на предмет применения в структурах нейроморфных вычислений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- осуществить анализ МЭ слоистых структур сегнетоэлектрик-феррит в свете существующих в них эффектов и описывающих их математических моделей;
- разработать математическую модель слоистой МЭ структуры в электрических полях;
- осуществить программную интеграцию разработанной математической модели в программную среду классических (программно-реализованных) нейронных сетей;
- показать возможность практического применения разработанной модели на примере построения моделей базовых электронно-управляемых устройств, участвующих в процессах нейроморфных вычислений.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись спин-волновые колебания, распространяющиеся в ферритовой составляющей слоистых МЭ структур сегнетоэлектрик-феррит в присутствии внешнего электрического поля.

В качестве методов были использованы теоретический анализ объекта исследования и существующих описывающих его моделей. Использовались уравнения магнитостатики, методы потенциальных функций, размагничивающих факторов, принцип описания кристаллографической анизотропии Акулова, выводы теории спин-волновых мод и феноменологической теории макроскопической однородной модели. Компьютерное моделирование осуществлялось на основе программно-аппаратных сред *Python* и *Maple*, программных библиотек, предназначенных для научных и инженерных расчетов.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель слоистой МЭ структуры в электрических полях, свободная от ограничений, накладываемых требованиями полноты учета основных физических процессов, и возможностью интеграции с программно-математическим аппаратом существующих нейронных сетей.

2. На основе интегрированной модели, с последующей автоматизацией процесса математического моделирования, были получены следующие результаты:

– получен спектр спин-волнового колебания, распространяющегося в ферритовой компоненте МЭ структуры, его зависимость от величины прикладываемого электрического поля;

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

3. Разработана модель МЭ базового логического элемента с электронно-изменяемой функциональной логикой, представляющего собой частный случай процесса вычислений на связанных спин-волновых генераторах, описываемых математической моделью Й. Курамото.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается полнотой и корректностью исходных посылок, а также, существующего емкого теоретико-экспериментального ресурса, посвященного объекту исследования и смежных с ним областях, и хорошим согласием с ним.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель слоистой МЭ структуры в электрических полях, прогнозирующая динамические фазовые изменения спин-волновых колебаний, распространяющихся в структуре, при внешнем воздействии электрического поля.

2. Магнитная неоднородность, возникающая в ферритовой компоненте, в следствии МЭ эффекта при приложении к МЭ структуре электрического поля, имеющего градиентное распределение амплитуды пространственной составляющей, приводит к повороту фронта спиновой волны, угол которого зависит от величины градиента.

3. Посредством МЭ эффекта существует возможность влияния на процессы синхронизации связанных генераторов, то есть на вычислительные процессы на спин-волновых генераторах, через существующую связь волнового вектора спин-волнового колебания и электрического поля, приложенного к МЭ структуре.

Практическая ценность результатов

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что в процессе ее выполнения заложена теоретическая база для разработки нового класса перестраиваемых устройств нейроморфных вычислений на спин-волновых колебаниях.

Разработана и интегрирована в программную среду математическая модель, что в совокупности с существующими программными библиотеками и алгоритмами машинного обучения позволяет: перейти к следующему этапу, а именно, к непосредственному проектированию нейронных сетей на основе генераторов спиновых волн; приступить к разработке алгоритмов «обратного

проектирования», то есть алгоритмов, формирующих исходную структуру (МЭ структуру, форму полей) на основе целевой задачи.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на конференциях в виде устных и стендовых докладов:

– Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 2024;

– 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023;

– 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2022;

– 3rd International Scientific and Practical Conference on Mathematical Modeling, Programming and Applied Mathematics (MMPAM 2021), Veliky Novgorod, Russia, 2021;

– отдельные положения относящиеся к теме исследования освещались на международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо) 2016–2024 годов.

Отдельные результаты диссертационного исследования вошли в отчеты по грантам Российского научного фонда: № 22-29-00085 «Исследование магнитоэлектрических градиентных структур для устройств СВЧ»; № 24-19-20045 «Разработка физических основ создания устройств сбора энергии на основе мультиферроидных материалов».

По результатам исследовательской работы было опубликовано 20 научных работ, из них: 2 – статьи в журналах из перечня ВАК, 13 – по материалам докладов на международных конференциях.

Личный вклад автора.

Все результаты, изложенные в диссертационном исследовании, получены как лично автором, так и при его непосредственном участии. Автором проведен комплексный анализ объекта и предмета исследования; разработана математическая модель слоистой МЭ структуры в электрических полях; осуществлена ее интеграция в программную область; проведено математическое моделирование; произведен анализ и интерпретация полученных результатов.

Структура и объем диссертации.

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

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор, посвященный МЭ слоистым структурам сегнетоэлектрик-феррит в свете присутствующих в них эффектов. Приведено

теоретическое обоснование экспериментально фиксируемой зависимости волновых характеристик МЭ структуры от величины приложенного электрического поля через описание зависимостей эффективного поля ферритовой компоненты и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической [17]. Было отмечено доминирующе влияние последнего эффекта. Воспроизведение эксперимента в программном пакете электродинамического моделирования HFSS компании ANSYS подтвердили правильность данных соображений. Изложено обоснование ощутимого влияния на спектр спиновых волн обратного МЭ эффекта и переход к магنونным устройствам, управляемым электрическим полем.

Приведен обзор существующих математических моделей, способных описывать поведение спин-волновых колебаний в ферритовой компоненте МЭ структуры на основе существующих подходов – теории плоских волн и теории спин-волновых мод [18, 19]. Выделены важные для понимания процессов распространения спиновых волн положения.

Также дается краткий обзор современного состояния и тенденций развития теории построения структур нейроморфных вычислений на связанных генераторах.

В заключении отмечено, что на данном этапе исследователю предоставлен емкий исследовательский теоретико-экспериментальный ресурс, позволяющий приступить к изучению различных физических процессов, возникающих в мультиферроидных структурах. Приведенные и, достаточно полно, описанные подходы (модели) позволяют в итоге получить сходные результаты, что также отмечено в [19]. Это является следствием того, что в основе лежат фундаментальные понятия: уравнения Максвелла и линеаризованное уравнение движения намагниченности Ландау-Лившица. Однако, использование данных моделей в рамках оглашенной во введении задачи, в чистом их виде, не является возможным вследствие их сложности и избыточности.

Во второй главе выстраивается новая математическая модель слоистой МЭ структуры в электрических полях на основе дисперсионных выражений спиновых волн [20], полученных на основе уравнений магнитостатики с использованием метода потенциальных функций и электродинамических граничных условий для трех ориентаций постоянного магнитного H_{0e} поля относительно волнового вектора и плоскости ферритовой пластины:

– H_{0e} направлен по нормали к плоскости структуры, существуют прямые объемные спиновые волны:

$$\tan \left[\frac{kd}{2} \sqrt{-(1+\chi)} - \frac{n\pi}{2} \right] = \frac{1}{\sqrt{-(1+\chi)}}; \quad (1)$$

– H_{0e} лежит в плоскости структуры и направлен вдоль распространения спиновой волны, существуют обратные объемные спиновые волны:

$$\tan \left[\frac{kd}{2\sqrt{-(1+\chi)}} - \frac{(n-1)\pi}{2} \right] = \sqrt{-(1+\chi)}; \quad (2)$$

– H_{0e} лежит в плоскости структуры поперек направления распространения спиновой волны, существуют поверхностная спиновая волна:

$$\omega^2 = \omega_0(\omega_0 + \omega_M) + \frac{\omega_M^2}{4}[1 - e^{-2kd}]. \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3): k – постоянная распространения спиновой волны, d – толщина ферромагнетика, n – номер спин-волновой моды ($n = 0, 1, 2, \dots$), χ и κ – диагональный и недиагональный компоненты тензора восприимчивости Польдера:

$$\chi = \frac{\gamma M_0 \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\gamma M_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (4)$$

$$\omega_M = \gamma M_0, \quad \omega_0 = \gamma H_{eff},$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота спиновой волны, M_0 – намагниченность насыщения ферромагнетика, γ – гиромагнитная постоянная, H_{eff} – эффективное магнитное поле ферромагнетика.

В данных дисперсионных выражениях раскрывается вопрос эффективного постоянного магнитного поля феррита через метод эффективных размагничивающих факторов:

$$H_{eff} = [(H_0 + M_0 \sum_i (N_x^i - N_z^i))(H_0 + M_0 \sum_i (N_y^i - N_z^i)) - M_0 \sum_i N_{xy}^i]^{1/2} + \alpha \nabla^2 \mathbf{m}(\mathbf{r}, t), \quad (5)$$

где α – константа неоднородного обменного взаимодействия, $\mathbf{m}(\mathbf{r}, t)$ – переменная намагниченность, $N_{x,y,z,xy}^i$ – эффективные размагничивающие факторы анизотропии. Описываются типы анизотропии и их зависимости от ориентации постоянного магнитного поля относительно плоскости пластины. Вводится зависимость характеристик от величины внешнего электрического поля через МЭ эффект. И, для рассматриваемых взаимных ориентаций вектора напряженности постоянного магнитного поля и волнового вектора выражения для эффективного поля ферритовой пластины с учетом размагничивающих факторов формы [18], кристаллографической анизотропии [21] (с кубической осью – [111] направленной вдоль нормали к плоскости пластины, что имеет место в большинстве пленок железоиттриевого граната (ЖИГ)), магнитоупругого взаимодействия вызванного МЭ эффектом [22] (на основе теории макроскопической однородной модели) и в безобменном приближении примут следующий вид:

– нормальное намагничивание

$$H_{eff} = H_{0e} - 4\pi M_0 + \frac{4}{3} H_c + 2M_0(B_{31} - B_{33})E; \quad (6)$$

– касательное намагничивание и вектор напряженности постоянного магнитного поля со-направлен с проекцией одной из главных диагоналей кубической ячейки на плоскость ферритовой пленки – угол между равновесной намагниченностью и осью (одной из главных осей – [111]) симметрии кристалла $\theta = 0^\circ$

$$H_{eff} = \left[\left(H_{0e} - 3\sqrt{2}H_c \frac{M_y^0}{M_0} + 2M_0(B_{31} - B_{33})E \right) \left(H_{0e} + 4\pi M_0 + H_c \left(1 - \sqrt{2} \frac{M_y^0}{M_0} \right) + 2M_0(B_{31} - B_{33})E \right) \right]^{1/2}; \quad (7)$$

– касательное намагничивание и вектор напряженности постоянного магнитного поля перпендикулярен проекции одной из главных диагоналей кубической ячейки на плоскость ферритовой пленки – угол между равновесной намагниченностью и осью (одной из главных осей – [111]) симметрии кристалла $\theta = 30^\circ$

$$H_{eff} = \left[\left(H_{0e} + \frac{3}{2}M_0(B_{31} - B_{33})E \right) \left(H_{0e} + 4\pi M_0 + H_c + M_0(B_{31} - B_{33})E \right) - 2H_c^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

При учете только линейных МЭ констант, а также факта со-направленности электрического поля с осью симметрии кристалла, можно воспользоваться рассчитанными значениями для наиболее часто встречающихся композитов. И, для структуры, состоящей из ферритовой пленки ЖИГ и сегнетоэлектрической, пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС):

$$2M_0(B_{31} - B_{33}) = 0,125 [\text{Э} \cdot \text{см} / \text{кВ}]. \quad (9)$$

Раскрывается тема учета обменного взаимодействия и обменных граничных условий в терминах свободной энергии.

Вклад обменного взаимодействия тождественен [19]:

$$\alpha \nabla^2 \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) \equiv M_0 \alpha \left[k^2 + \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где k – проекция волнового вектора на направление распространения спиновой волны, d – толщина ферритовой пленки. Для большинства ферромагнетиков константа неоднородного обменного взаимодействия α имеет порядок 10^{-12} см^2 , для ЖИГ $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$. Видно, что основное влияние обменное взаимодействие на спектр спиновых волн оказывает в области больших волновых чисел. Однако, при уменьшении толщины ферритовой пленки, обменное взаимодействие также начинает оказывать влияние на старшие спин-волновые моды. Такое влияние приводит к сдвигу по частоте спин-волновых мод (кроме основной). И в определенный момент происходит их пересечение с основной (низшей) модой. В этих областях происходит расщепление спектра. При определенной толщине возникает ситуация, при которой старшие моды отдаляются вверх по частоте настолько, что уже не пересекают основную моду. Данный факт, а также то, что основная (низшая) мода является основным переносчиком энергии, дает все основания использовать при дальнейших расчетах только основную моду в пренебрежении других спин-волновых мод.

Следующим рассматриваемым вопросом является учет обменных граничных условий. Данный тип граничных условий учитывает состояние закрепления спинов на поверхностях ферритовой пленки. В работе [19] показана зависимость

существования поверхностных волн от параметров закрепления. Полную картину закрепления поверхностных спинов описывают граничные условия Радо-Уиртмана [23], в 2016 была проведена их «ревидия» в терминах плотности свободной энергии [24]:

$$K_{surf}(\theta, \varphi) = d[F^{surf} - F^{bulk}], \quad (11)$$

где $K_{surf}(\theta, \varphi)$ – плотность энергии поверхностной анизотропии; θ, φ – пространственные углы, d – постоянная решетки, F^{surf} и F^{bulk} – поверхностная и объемная плотность свободной энергии, соответственно. Здесь принято рассматривать два предельных частных случая: случай с полностью закрепленными спинами, для которого характерно $K_{surf}(\theta, \varphi) \gg 0$, т.е. $F^{surf} \gg F^{bulk}$ – поверхностная плотности свободной энергии значительно преобладает над объемной. Второй предельный частный случай, который по-другому называют естественное состояние, характеризуется полностью свободными спинами – $K_{surf}(\theta, \varphi) = 0$. В этом случае $F^{surf} = F^{bulk}$ поверхностная и объемная плотность свободной энергии равны. Следует сказать, что закрепление поверхностных спинов носит, в большей степени, искусственный характер, путем введения поверхностных неоднородностей, или же под действием полей особой формы.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что при условии отсутствия внешне определяемых факторов закрепления поверхностных спинов, при нормальных начальных условиях, выполняется равенство свободных энергий в объеме и на поверхности. И, можно с полной уверенностью сделать вывод о том, что выражения (1)–(3) соответствуют ситуации с полностью свободными поверхностными спинами.

В заключении к главе отмечено, что в следствии одного из свойств *прямых спиновых волн*, в частности, отсутствии зависимости дисперсионного выражения от направления волнового вектора в плоскости структуры, в решении поставленной задачи, объективно, использование данного типа спин-волнового колебания. И, в дальнейшем, все последующие расчеты будут строиться на случае нормального намагничивания структуры, то есть на дисперсионном выражении *прямых спиновых волн*.

В третьей главе приводится общая характеристика полученной математической модели с точки зрения требований, предъявляемых во введении. Осуществляется переход разработанной модели в программную среду *Python* в виде программного модуля, позволяющего автоматизировать процессы получения конечных характеристик, а также проводить численные эксперименты в динамике. При построении итоговых волновых характеристик использовались соответствующие библиотеки программной среды *Python*, предназначенные для выполнения научных и инженерных расчетов и их визуализации.

На Рисунке 1 приведен расчетный спектр спин-волнового колебания в безобменном приближении и нулевом внешнем электрическом поле, при величине напряженности внешнего магнитного поля $H_{e0} = 2500$ Э. На рисунке верхняя граница спектра определяется из выражения:

$$\omega_{\perp} = [\omega_0(\omega_0 + \omega_M)]^{1/2}. \quad (12)$$

Последующие расчеты осуществлялись для основной спин-волновой моды ($n = 0$) в свете рассуждений, отмеченных в предыдущей главе. На Рисунке 2 представлен спектр спиновых волн при приложении к структуре электрического поля напряженностью 10 кВ/см и -10кВ/см.

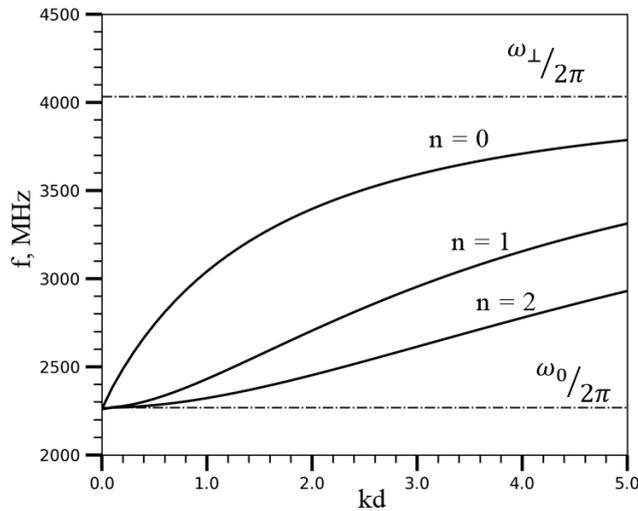


Рисунок 1 – Спектр спин-волнового колебания

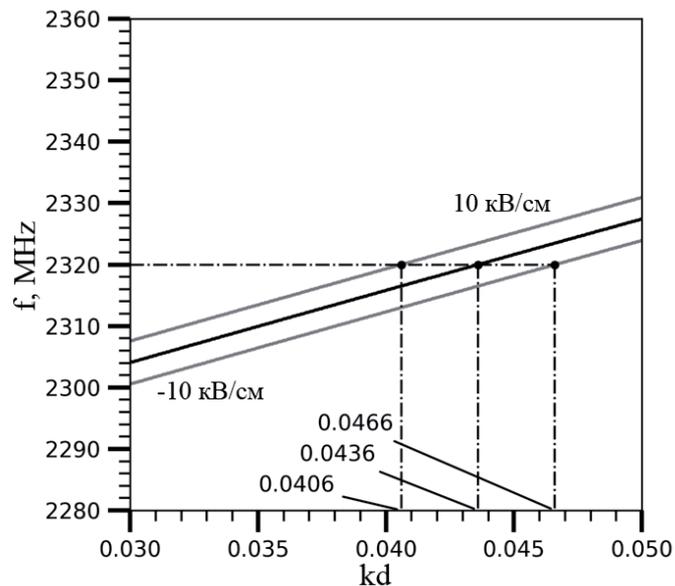


Рисунок 2 – Спектр спин-волнового колебания при приложении к МЭ структуре электрического поля ± 10 кВ/см

Как видно из Рисунка 2, приложение электрического поля к МЭ структуре приводит к небольшому сдвигу по частоте спектра спиновой волны. Но из-за малой групповой скорости $\partial\omega/\partial k$, характерной спиновым волнам, небольшое изменение внутреннего эффективного магнитного поля ферромагнитной компоненты (за счет МЭ эффекта) приводит к небольшому сдвигу линии ФМР, что, в свою очередь, приводит к значительному изменению постоянной распространения (фазовой постоянной) спиновой волны, за счет существующей обратной зависимости, то есть приводит к ощутимому фазовому сдвигу. Существует возможность оценки данного фазового сдвига. На оси абсцисс отложены относительные значения

произведения постоянной распространения и толщины ферритовой пластины kd , следовательно, для расчета фазового набега следует взять отношение длины структуры к толщине ферритового слоя:

$$\Delta kd \cdot \frac{L}{d} = \Delta kL = \Delta \varphi. \quad (13)$$

Предположим, что отношение L/d равно 10^3 , что может соответствовать вполне реальной задаче, в которой рассматривает МЭ структура длиной 1 мм с толщиной ферритовой пластины 1 мкм. В таком случае приложение электрического поля величиной напряженности ± 10 кВ/см даст фазовый сдвиг приблизительно равный ± 172 град. Данное значение сдвига растет по мере увеличения kd , в следствие уменьшения наклона дисперсионной ветви основной моды ($n = 0$).

Далее, в главе рассматривались прикладные задачи. И, первая задача – управление направлением распространения спин-волнового колебания через введение неоднородного распределения магнитной проницаемости в плоскости структуры.

Возможность влияния на направление распространения спин-волнового колебания через неоднородность была показана в 2020 году [13]. Позже, в работе [25], автором была осуществлена попытка создания электронно-управляемого поворота фронта спин-волнового колебания через МЭ эффект. В основе последней лежала построенная автором математическая модель, на основе которой исследовались МЭ градиентные структуры. В данной главе рассматривалась схожая геометрия, (Рисунок 3), где области I–III представляли собой ферритовую пленку ЖИГ на подложке из гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), в области II размещается слой ЦТС для формирования МЭ-структуры.

На основе построенной во второй главе модели, была рассчитана дисперсионная характеристика спиновых волн для двух крайних значений градиента напряженности электрического поля 0 кВ/см и 40 кВ/см. С целью соответствия исследованию [25] была выбрана частота спиновой волны в окрестности волнового числа $k = 20$ см⁻¹.

На Рисунке 4 изображен спектр спиновой волны для двух значениях внешнего электрического поля. В качестве несущей была выбрана частота $f = 2.32$ ГГц, для которой относительные значения $kd(0) = 0,0436$ и $kd(40) = 0,0316$. При условии толщины ферритовой пленки $d = 20$ мкм, значение волнового числа составляло $k(0) = 21,8$ см⁻¹ и $k(40) = 15,8$ см⁻¹.

С целью поворота фронта спин-волнового колебания, для формирования градиентной магнитной неоднородности по ширине структуры (по оси Ox), было смоделировано градиентное распределение амплитуды пространственной составляющей (вдоль оси Oz) приложенного электрического поля по ширине МЭ структуры (вдоль оси Ox) в границах напряженности от 0 кВ/см до 40 кВ/см, (Рисунок 5). В результате градиентное внешнее электрическое поле за счет МЭ эффекта стало причиной градиентного распределения волнового числа спин-волнового колебания по ширине структуры (вдоль оси Ox), то есть была сформирована магнитная неоднородность.

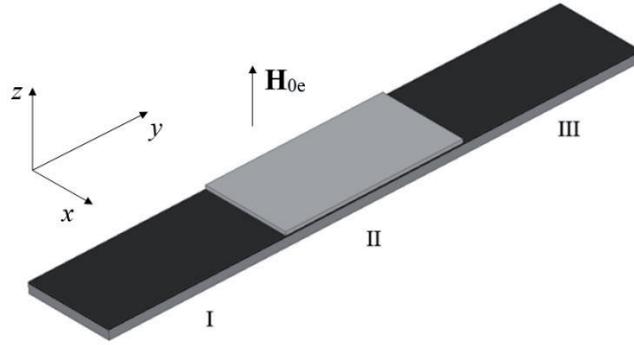


Рисунок 3 – Исследуемая МЭ структура

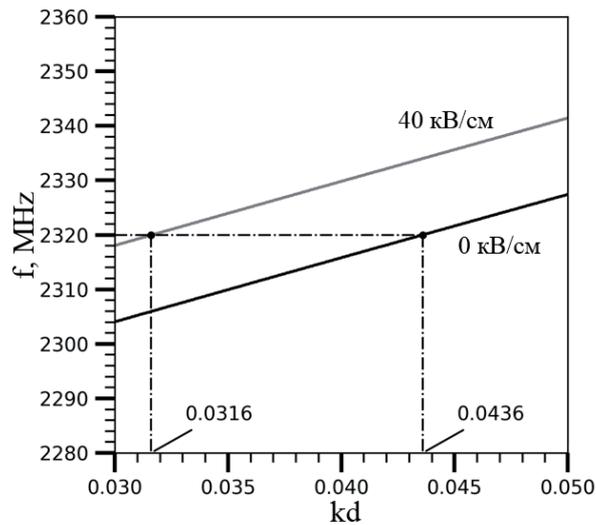


Рисунок 4 – Спектр спин-волнового колебания при значениях, приложенного к МЭ структуре, электрического поля 0 кВ/см и 40 кВ/см

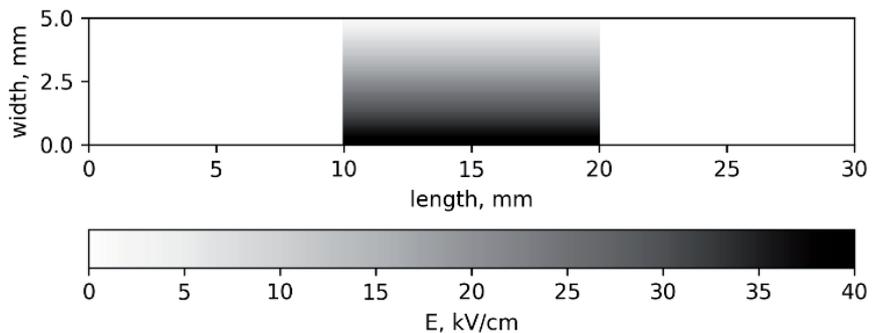


Рисунок 5 – Градиентное распределение приложенного электрического поля по ширине МЭ структуры

Для визуализации в среде *Python*, в библиотеке *Matplotlib*, полученные значения волнового числа k подставлялись в нормализованную волновую функцию, следующей формы:

$$\psi(y) = e^{-jky}. \quad (14)$$

Результаты моделирования на основе построенной модели в среде *Python*, приведены на Рисунке 6.

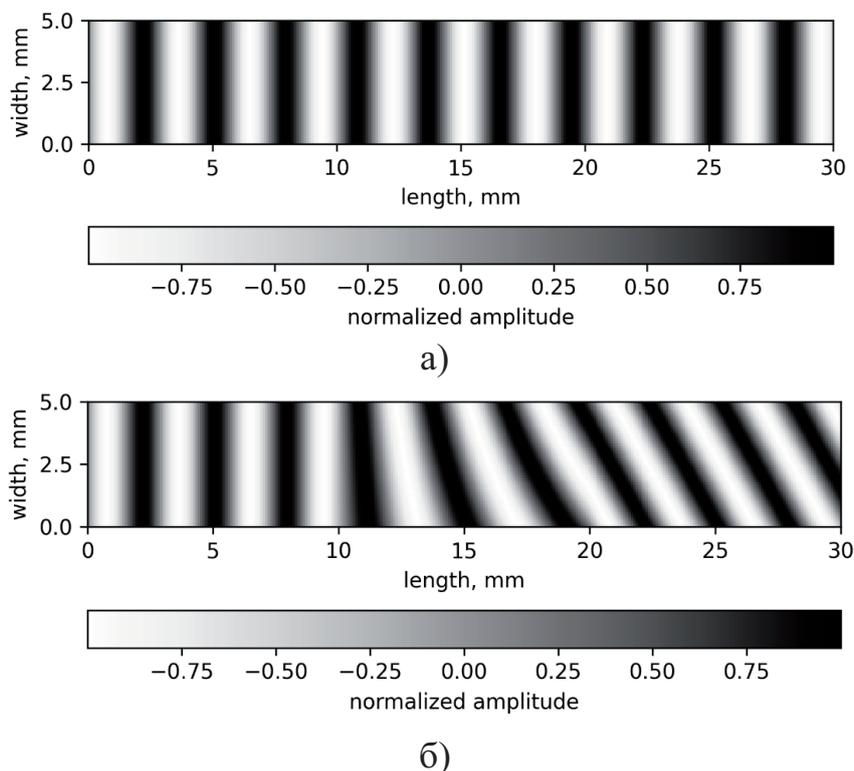


Рисунок 6 – Распределение нормированной амплитуды по длине структуры (по оси Oy): а) в отсутствии внешнего электрического поля; б) при градиентном внешнем электрическом поле

Как видно, приложение к структуре градиентного поля привело к повороту фронта спиновой волны, угол поворота которого может быть оценен исходя из выражения:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{k(0)-k(40)}{k(0)} \cdot \frac{L}{w}\right), \quad (15)$$

где L , w – длина и ширина МЭ структуры. И, в нашем случае поворот составил около 29 градусов, что согласуется с результатами, полученными в [25]. Стоит отметить, что способ задания угла поворота фазового фронта распространяющейся СВЧ электромагнитной волны через введение неоднородностей, в частности диэлектрических, имеет место в линзовых антеннах [26].

Следующей задачей, которая решалась с использованием построенной модели, являлось проектирование электронно-перестраиваемого базового логического элемента, который в зависимости от величины прикладываемого электрического поля менял свое функциональное назначение с **XOR** на **OR**. Термин базовый означает, что роль представленной модели сводится к подтверждению возможности создания электронно-управляемых (за счет электрического поля) структур нейроморфных вычислений за счет управления посредством МЭ эффекта областей фазовых взаимодействий спин-волновых колебаний.

Исследовалась структура (Рисунок 7), подобная модели магнитостатического конвольвера [27], представляющая собой две входные цепи (**A** и **B**), один выходной

контур (С) и МЭ область. Входные цепи **A** и **B** представляют собой генераторы спиновых волн. МЭ структура состоит из пленки ЖИГ на подложке из ГГГ. Сверху размещалась сегнетоэлектрическая пленка ЦТС. Внешние постоянные магнитное и электрическое поля направлены вдоль оси Oz , направление распространения спиновых волн совпадает с осью Oy . Ориентация внешнего постоянного магнитного поля относительно плоскости структуры соответствует ситуации существования прямых спиновых волн.

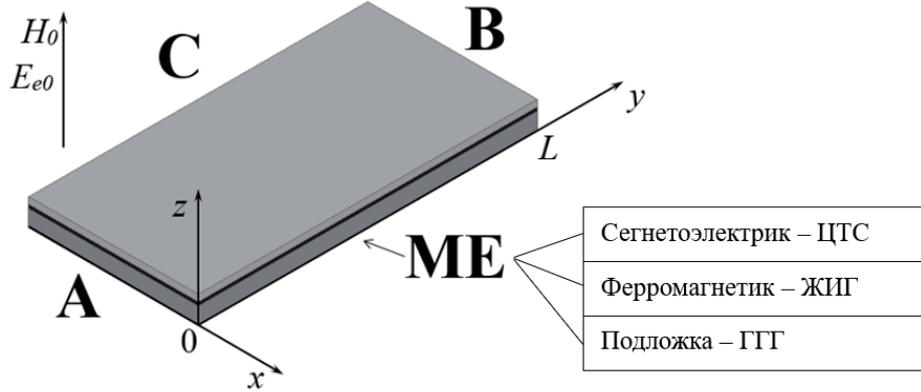


Рисунок 7 – Структура модели МЭ базового логического элемента

Подобие исследуемой модели с моделью магнитоэлектрического конвольвера позволило использовать при расчетах математическую модель последнего, согласно которой сигнал на выходе **C** будет зависеть от проекции переменной составляющей магнитного поля по оси Oy . Последняя, в свою очередь, зависит от фазового расстояния между входами **A** и **B**:

$$V_c = - \left(\gamma \mu_0 \frac{W}{2\pi f} \right) \kappa \int h_y \frac{\partial h_y}{\partial t} dy, \quad (16)$$

$$h_y = h_A + h_B, \quad (17)$$

где

$$h_{A,B} = A(B) \cos(2\pi f_{A,B} \mp \varphi_{A,B}). \quad (18)$$

В случае, если входы **A** и **B** идентичные, то есть $A = B$ и $f_A = f_B$:

$$h_y = 2A \cos(2\pi f) \cos\left(\frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}\right), \quad (19)$$

$$\varphi_A + \varphi_B = k(y_A + y_B) = kL. \quad (20)$$

В выражениях (16)–(20) W – геометрический параметр выходной цепи **C**, κ – недиагональный компоненты тензора восприимчивости Польдера $\bar{\chi}$, h_y – переменная составляющая магнитного поля вдоль оси Oy , k – волновое число спиновой волны, распространяющейся в плоскости структуры.

В предположении, что сигналы на входах **A** и **B** идентичны, на выходе **C** сигнал будет отсутствовать, если фазовое расстояние kL будет равно $n\pi$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) – имеем ситуацию, при которой сигналы находятся в противофазе. Соответственно, максимум выходного сигнала будет при условии синфазности входных сигналов, то есть $kL = n2\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Для моделирования были использованы параметры МЭ структуры: толщина ферритового слоя $d = 20$ мкм, длина $L = 10$ мм, $H_{e0} = 2500$ Э. За исходный случай принята ситуация синфазности входных сигналов, а приложенным внешним электрическим полем было получено состояние противофазы, Рисунок 8.

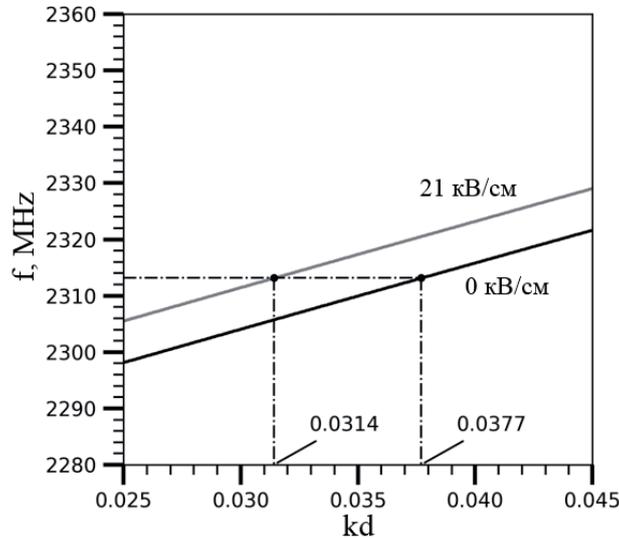


Рисунок 8 – Спектр спин-волнового колебания при значениях, приложенного к МЭ структуре, электрического поля 0 кВ/см и 21 кВ/см

Здесь, в качестве несущей частоты выбрано значение $f = 2313$ МГц. Значение $kd = 0,0377$ соответствует состоянию синфазности:

$$kL = kd \cdot \frac{L}{d} = 0,0377 \cdot \frac{1}{0,002} = 18,85 \approx 6\pi. \quad (21)$$

Приложение внешнего постоянного электрического поля напряженностью E_{e0} около 21 кВ/см приводит к сдвигу по частоте спектра, и для $f = 2313$ МГц значение kd будет составлять 0,0314, что соответствует состоянию противофазы:

$$kL = kd \cdot \frac{L}{d} = 0,0314 \cdot \frac{1}{0,002} = 15,7 \approx 5\pi. \quad (22)$$

Другими словами, при нулевом внешнем электрическом поле, при условии, что входные сигналы на входах **A** и **B** одинаковы по частоте $f = 2313$ МГц и амплитуде, на выходе **C** будет сигнал, если хотя бы на одном из входов присутствует сигнал, то есть эта ситуация имитирует логическую функцию **OR**. Приложение внешнего электрического поля напряженностью 21 кВ/см приводит к сдвигу дисперсионной характеристики вверх по частоте, что приводит к уменьшению фазового расстояния между входами **A** и **B** (для той же частоты) на величину π . В результате сигналы со входов переходят в противофазное состояние, при котором на выходе будет сигнал в том случае, когда входной сигнал присутствует на одном из входов, а на другом его нет, т. е. моделируется логическая операция **XOR**.

На Рисунках 9 показано распределение нормированной амплитуды спиновой волны по длине МЭ структуры отдельно для каждого входа, и результирующее распределение после выполнения процедуры согласно выражениям (17)–(20) для

двух случаев. Как видно в случае синфазности (Рисунок 9а) мы имеем двойную амплитуду, как и предсказывается из выражения (19).

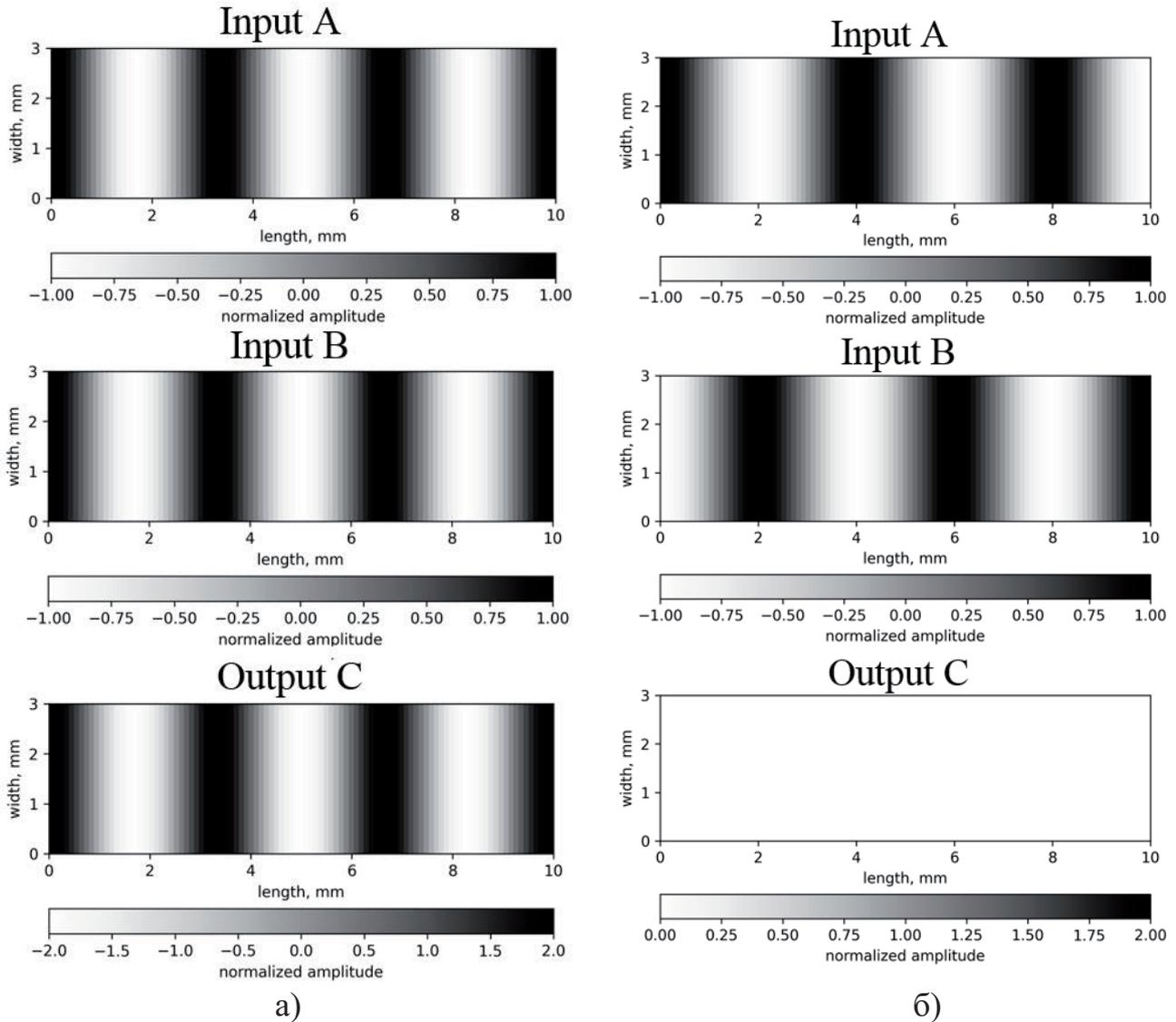


Рисунок 9 – Распределение нормированной амплитуды по длине структуры: а) для синфазного случая ($kL = n2\pi$); б) для случая противофазы ($kL = n\pi$)

Таким образом, за счет эффектов, происходящих в МЭ структурах, а именно МЭ эффекта, за счет изменения величины внешнего приложенного электрического поля, исследуемая модель подтвердила функциональную возможность осуществлять не только основные логические операции, но и переключаться между ними.

И, в завершении в данной главе проводится параллель рассматриваемых задач с вопросами построения электронно-управляемых структур нейроморфных вычислений на спин-волновых колебаниях. А, также проводится приблизительная оценка в скорости выполнения операции **XOR** относительно подобной задачи, рассматриваемой во вступительном курсе машинного обучения [28]. Относительная оценка в скорости выполнения вычислительных операций на спин-волновых колебаниях показала вероятный прирост в более чем на три порядка.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная математическая модель слоистой магнитоэлектрической структуры в электрических полях, прогнозирующая динамические фазовые изменения спин-волновых колебаний, распространяющихся в структуре, при внешнем воздействии электрического поля, представляет собой своеобразный конструкт, состоящий из элементов, право на существование которых имеет теоретическое и экспериментальное подтверждение большого числа работ, отмеченных в вводной первой главе. Модель строилась на классическом описании через потенциальную функцию, в которую в последствии были введены понятия, касающиеся обменных граничных условий, обменного взаимодействия, анизотропии и, ключевого момента, магнитоэлектрического взаимодействия. В результате было получено относительно простое, лаконичное, дисперсионное уравнение для спин-волновых колебаний, которое явным образом связало спектр спиновых волн с воздействием на слоистую магнитоэлектрическую структуру электрического поля. А, приобретенное свойство простоты позволило провести ее интеграцию в среду программирования *Python*, которая в свою очередь имеет широкое распространение в области искусственного интеллекта. Последнее, в перспективе, закладывает основу совместного применения программного модуля построенной модели и программных модулей машинного обучения.

На основе построенной модели было показано, что:

– магнитная неоднородность, возникающая в ферритовой компоненте, в следствии МЭ эффекта при приложении к МЭ структуре электрического поля, имеющего градиентное распределение амплитуды пространственной составляющей, приводит к повороту фронта спиновой волны, угол которого зависит от величины градиента;

– опираясь на результаты исследования МЭ базового логического элемента было показано, что посредством МЭ эффекта существует возможность влияния на процессы синхронизации связанных генераторов, то есть на вычислительные процессы на спин-волновых генераторах, через существующую связь волнового вектора спин-волнового колебания и электрического поля, приложенного к МЭ структуре.

Дополнительно:

– была осуществлена сравнительная оценка в скорости вычислений на основе спиновых волн и классически построенной программно-реализованной нейронной сетью однотипной задачи. Оценка показала возможный прирост в скорости вычисления более чем на три порядка;

– на основе математического описания принципа синхронизации связанных генераторов (модели Курамото) были заложены основные тезисы для последующего построения электронно-управляемых структур нейроморфных вычислений на спин-волновых колебаниях.

Таким образом, построенная математическая модель, благодаря своим вышеотмеченным свойствам, представляет собой функциональный инструмент, позволяющий перейти к проектированию нейронных вычислительных структур с

приобретенным качеством динамического (управляемого извне) изменения своих функциональных задач.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

П.1. Никитин А.О. Математическая модель поведения слоистой мультиферроидной структуры в неоднородных электрических полях в области сверхвысоких частот // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2024. № 1 (135). С. 137–153.

П.2. Петров Р.В., Никитин А.О., Захаров М.А., Эминов С. И. Моделирование магнитоэлектрического материала для антенн // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2023. № 5 (134). С. 824–832.

Публикации в изданиях, входящих в базы Web of Science или Scopus:

П.3. Misilin V.A., Kiselev V.A., Mikhailov A.A., Petrov R.V., Nikitin A.O. Magnetolectric Basic Logic Element for Neuromorphic Computing // Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS). 2024. Chengdu, China. DOI: 10.1109/PIERS62282.2024.10618426.

П.4. Nikitin A., Petrov R., Kiselev V., Misilin V., Bozhkov S., Milenov I., Bozhkov P. Magnonic Commutator on Magnetolectric Gradient Structure for Artificial Neural Networks // 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2023. Varna, Bulgaria. DOI: 10.1109/ELMA58392.2023.10202336.

П.5. Nikitin A., Kiselev V., Misilin V., Kiliba Yu., Petrov R., Bozhkov S., Milenov I., Bozhkov P. Antenna Model Based on Magnetolectric Gradient Structure with Electronic Switching of Radiation Direction // 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA). 2022. Bourgas, Bulgaria. DOI: 10.1109/SIELA54794.2022.9845723.

П.6. Nikitin A.O., Kiselev V.A., Misilin V.A., Kiliba Y.V., Petrov R.V. Magnetolectric Gradient Structures: Properties and Applications // Journal of Advanced Dielectrics. 2022. Vol. 12 (4). N 2250008. DOI: 10.1142/S2010135X22500084.

П.7. Nikitin A.O., Petrov R.V. Magnetolectric gradient structures // Phys. Conf. Ser. Vol. 2052. N 012029. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012029.

П.8. Petrov R.V., Nikitin A.O., Bichurin M.I., Srinivasan G. Magnetolectric Antenna Array // The International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP). 2020. Vol. 10 (6). P. 371–376. DOI: 10.15866/IRECAP.V10I6.18658.

П.9. Nikitin A.O., Petrov R.V., Khavanova M.A., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. Modeling of Magnetolectric Effect in Multiferroic Antenna // Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS-Spring). 2019. P. 953–956. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017230.

П.10. Tatarenko A.S., Nikitin A.O., Petrov R.V., Bichurin M.I. Modeling of Microwave Antenna Array with Magnetolectric Effect Control // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). 2017. P. 633–637. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261817.

П.11. Tatarenko A.S., Nikitin A.O., Petrov R.V., Bichurin M.I., Tomita S., Ueda T. Modelling of Multiferroic Microwave Patch Antenna // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). 2016. P. 2769–2773. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735120.

Публикации в журналах и материалах конференций:

П.12. Никитин А.О., Киселев В.А., Мисилин В.А., Петров Р.В. Применение магнитоэлектрических градиентных структур // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3 (128). С. 102–107.

П.13. Никитин А.О., Петров Р.В., Хаванова М.А. Управление магнитоэлектрической антенной электрическим полем // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-1. С. 228–229.

П.14. Никитин А.О., Хаванова М.А., Петров Р.В. Исследование мультиферроидной структуры магнитоэлектрических СВЧ устройств // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-2. С. 263–264.

П.15. Nikitin A.O., Petrov R.V., Khavanova M.A. Control of Magnetolectric Antenna by Electric Field // 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), ITM Web of Conferences. 2019. Vol. 30. N 05028. DOI: 10.1051/itmconf/20193005028.

П.16. Никитин А.О., Петров Р.В., Хаванова М.А., Лаврова И.Г., Бичурин М.И. Электродинамическое моделирование магнитоэлектрической структуры устройств СВЧ коммутации // 28 Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2018). 2018. Т. 5. 2018. С. 771–777.

П.17. Никитин А.О. Симуляция магнитоэлектрической структуры в СВЧ диапазоне // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2018. № 3 (109). С. 27–31.

П.18. Хаванова М.А., Никитин А.О., Петров Р.В., Бичурин М.И. Моделирование диаграммы направленности антенной решетки с магнитоэлектрическими элементами // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо2017). 2017. С. 611–617.

П.19. Хаванова М.А., Никитин А.О., Петров Р.В., Бичурин М.И. Модель двухэлементной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности // 26 Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2016). 2016. Т. 5. 2016. С. 1044–1050.

П.20. Никитин А.О., Хаванова М.А., Петров Р.В., Уеда Т., Томита С. Моделирование антенной решетки с магнитоэлектрическим управлением // Вестник НовГУ Сер.: Технические науки. 2016. №4 (95). С. 72–76.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд., стереот. / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 656 с.

2. Дзялошинский И.Е. К вопросу о магнитоэлектрическом эффекте в антиферромагнетиках // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. № 3. С. 881–882.

3. Астров Д.Н. О магнитоэлектрическом эффекте в антиферромагнетиках // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. № 3. С. 984–985.
4. Астров Д.Н. Магнитоэлектрический эффект в окиси хрома // ЖЭТФ. 1961. Т. 40. № 4. С. 1035–1041.
5. Van den Boomgard J., van Run A.M.J.G., van Suchtelen J. Piezoelectric–Piezomagnetic Composites with Magnetoelectric Effect // *Ferroelectrics*. 1976. Vol. 14. P. 727–732.
6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. *Magnetoelectric Composites* / N.-Y.: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2019, 296 p.
7. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric Magnetic Field Sensors: A Review // *Sensors*. 2020. Vol. 21 (18). N 6232. DOI: 10.3390/s21186232.
8. Никитин А.О., Леонтьев В.С., Петров Р.В., Мельничук Д.Г. Магнитоэлектрический датчик тока с улучшенной схемой обработки сигнала // Вестник НовГУ Сер.: Физико-математические науки. 2015. № 6 (89). С. 90–94.
9. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Kapralov G.N., Kiliba Yu.V., Bukashev F.I., Smirnov A.Yu., Tatarenko A.S. Magnetoelectric Microwave Devices // *Ferroelectrics*. 2002. Vol. 280. P. 211–218.
10. Bichurin M.I., Petrov R.V. Magnetoelectric Phasers for PAS // *Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Satellite Communications (ICSC'96)*, Moscow. 1996. P. 236–241.
11. Bichurin M.I., Petrov R.V., Kiliba Yu. V. Magnetoelectric Microwave Phase Shifters // *Ferroelectrics*. 1997. Vol. 202. P. 311–319.
12. Serha R.O., Vasyuchka V.I., Serga A.A., Hillebrands B. Towards an Experimental Proof of the Magnonic Aharonov-Casher Effect // *Phys. Rev. B*. 2023. Vol. 108. N L220404. DOI: 10.1103/PhysRevB.108.L220404.
13. Mieszczak S., Busel O., Gruszecki P., Kuchko A.N., Kłos J.W., Krawczyk M. An Anomalous Refraction of Spin Waves as a Way to Guide Signals in Curved Magnonic Multimode Waveguides // *Phys. Rev. Applied*. 2020. Vol. 13. N 054038. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.054038.
14. Indiveri G., et al. Neuromorphic Silicon Neuron Circuits // *Front Neurosci, Neuromorphic Engineering*. 2011. Vol. 5 (73). DOI: 10.3389/fnins.2011.00073.
15. Kuramoto Y. Self-Entrainment of a Population of Coupled Non-Linear Oscillators // *Int. Symp. on Math. Probl. in Theor. Phys. Lecture Notes in Phys*. 1975. Vol. 39. P. 420–422. DOI: 10.1007/BFb0013365.
16. Vassilieva E., Pinto G., Acacio de Barros J., and Suppes P. Learning Pattern Recognition Through Quasi-Synchronization of Phase Oscillators // *IEEE Trans Neural Network*. 2011. Vol. 22(1). P. 84–95. DOI: 10.1109/TNN.2010.2086476.
17. Petrov R.V., Nikitin A.O., Bichurin M.I., Srinivasan G. Magnetoelectric Antenna Array // *The International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*. 2020. Vol. 10 (6). P. 371–376. DOI: 10.15866/IRECAP.V10I6.18658.
18. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны / М.: ФИЗМАТЛИТ, 1994. 464 с.

19. Григорьева Н.Ю., Калиникос Б.А. Теория спиновых волн в пленочных ферромагнитных многослойных структурах: Монография / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 176 с.
20. Stancil D.D., Prabhakar A. Spin Waves. Theory and Applications / Gewerbestrasse.: Springer, 2009. 355 p. DOI: 10.1007/978-0-387-77865-5.
21. Шавров В.Г., Щеглов В.И. Ферромагнитный резонанс в условиях ориентационного перехода / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 568 с.
22. Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах / Великий Новгород.: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2005. 226 с.
23. Rado G.T., Weertman J.R. Spin-Wave Resonance in a Ferromagnetic Metal // J. Phys. Chem. Solids. 1959. Vol. 11. P. 315–333. DOI: 10.1103/PhysRev.97.1558.
24. Puzkarski H. Rado-Weertman Boundary Equation Revisited in Terms of the Free-Energy Density of a Thin Film // ACTA Physica Polonica A. 2016. Vol. 129. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.RK.129.6.1-1.
25. Nikitin A., Petrov R., Kiselev V., Misilin V., Bozhkov S., Milenov I., Bozhkov P. Magnonic Commutator on Magnetoelectric Gradient Structure for Artificial Neural Networks // 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2023. Varna, Bulgaria. DOI: 10.1109/ELMA58392.2023.10202336.
26. Zhan Y., Aratani Y., Nakazima H. A Microwave Free-Space Method Using Artificial Lens with Anti-reflection Layer // Sens. Imaging. 2017. Vol. 18 (17). DOI: 10.1007/s11220-017-0166-7.
27. Parekh J.P., Tuan H.S., Chang K.W. Magnetostatic Wave Convolvers // Circuits Systems and Signal Process. 1985. Vol. 4. P. 253–263. DOI: 10.1007/BF01600084.
28. Грас Д., Data Science. Наука о данных с нуля: Пер. с англ. - 2-е изд., перераб. и доп. / СПб.: БХВ-Петербург, 2021. 416 с.

Подписано в печать 11.10.2024 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Печ. листов 1,5. Тираж 100 экз.
Заказ 10-11-135 оп.

Отпечатано ООО «ТПК «Печатный Двор»
г. Великий Новгород, ул. Нехинская, д.61,
производственный корпус 3,
тел.: 8 (816-2) 502-225
vnovgorod.net